



Hochschule Neubrandenburg  
University of Applied Sciences

Fachbereich Landschaftsarchitektur, Geoinformatik, Geodäsie und  
Bauingenieurwesen (LGGB)

**Studiengang Geoinformatik und Geodäsie**

# **Testwand zur Prüfung von mobilen 3D-Messsystemen**

*Masterarbeit*

Vorgelegt von Lisa Knaack

Eingereicht beim LGGB der Hochschule Neubrandenburg

Ausgeführt bei AiMESS Services GmbH

August 2012

Betreuer: Prof. Dr. H. J. Larisch (HS Neubrandenburg)

Dipl. Ing. M. Noack (AiMESS)

**urn:nbn:de:gbv:519-thesis2012-0627-8**

## **Zusammenfassung**

Die Masterarbeit beschäftigt sich mit der Umsetzung der in der VDI/VDE 2617 Blatt 10 beschriebenen Testwand sowie mit dem dort dargestellten Prüfverfahren. Dafür beleuchtet die Arbeit zunächst die theoretischen Grundlagen des Qualitätsmanagements und von Lasertrackern. Weiterführend wird auf die Richtlinie selbst, die Realisierung der Testwand sowie auf die durchgeführten Testmessungen und deren Auswertung eingegangen.

Ziel der Masterarbeit ist es durch die Installation der Referenzwand und dessen Verifizierung eine Grundlage für die Prüfmittelüberwachung im Zuge des Qualitätsmanagements zu schaffen. Darauf aufbauend ist zusätzlich eine Prozessanweisung entstanden, die es allen Mitarbeitern ermöglichen soll eine Überprüfung eines Lasertrackers durchzuführen.

## **Abstract**

The master thesis deals with the implementation of a testing arrangement of measuring lines and the inspection of laser tracker which is described in the guideline VDI/VDE 2617 part 10. Therefore the thesis describes theoretical basics like the quality management and laser tracker in the first two parts. Afterwards it details the guideline, the installation of the arrangement and also testing measurements and its analysis.

As a result of the thesis there should be an installation and its verification for use in quality management. Additionally a process instruction is created which allows all members of the company to perform the inspection step by step according to sample.



## **Aufgabenstellung**

### **Testwand zur Prüfung von mobilen 3D-Messsystemen**

#### **Aufgabe**

Zur messtechnischen Rückführung von mobilen 3D-Messsystemen soll, im Zuge der Erstellung eines Qualitätsmanagementhandbuches der AiMESS Services GmbH, eine hochgenaue Referenzwand , gemäß VDI/VDE 2617 Blatt 10, richtlinienkonform und praxisgerecht, für die Verifizierung der Längenmessunsicherheit von Lasertrackern für ein Volumen bis 10m x 6m x 3m, realisiert werden.

Die Kandidatin hat im Rahmen ihrer Masterarbeit die Aufgabe, eine solche Referenzwand entsprechend den Gegebenheiten zu realisieren und Testmessungen zur Bestimmung der Längenmessabweichung mit unterschiedlichen Lasertrackern durchzuführen. Zur festen Integration in das Qualitätsmanagementhandbuch soll zusätzlich eine Prozessanweisung ausgearbeitet werden.

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit bestätige ich, Lisa Knaack, die vorliegende Masterarbeit „Testwand zur Prüfung von mobilen 3D-Messsystemen“ selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Burg, 16.08.2012

---

(Lisa Knaack)

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>ii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>ii</b>
<b>Aufgabenstellung</b> .....	<b>iii</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung</b> .....	<b>iv</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>v</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>9</b>
<b>2. Qualitätsmanagement</b> .....	<b>10</b>
2.1    DIN EN ISO 9000 Normenfamilie.....	10
2.2    Begriffe aus dem Qualitätsmanagement.....	11
2.2.1    Qualität.....	12
2.2.2    Qualitätsmanagement.....	12
2.2.3    Qualitätsmanagementsystem.....	12
2.3    Zweck.....	12
2.4    Aufgabenbereiche des Qualitätsmanagements .....	14
2.5    Anforderungen an ein Qualitätsmanagementsystem .....	16
2.6    Struktur der Qualitätsdokumentation.....	19
2.6.1    Inhalt und Struktur des Qualitätsmanagementhandbuches.....	19
2.6.2    Inhalt und Struktur der Verfahrensanweisungen .....	20
2.6.3    Inhalt und Struktur der Arbeitsanweisungen.....	20
<b>3. Lasertracker</b> .....	<b>22</b>
3.1    Physikalische Grundlagen.....	22
3.1.1    Interferenz.....	22
3.1.2    Kohärenz.....	23
3.2    Strecken- und Winkelmessung .....	24
3.2.1    Interferometrische Streckenmessung.....	24
3.2.1.1    Homodynes Interferometer.....	25
3.2.1.2    Heterodynes Interferometer .....	26

---

3.2.2	Absolute Streckenmessung.....	28
3.2.3	Winkelmessung.....	29
3.3	Aufbau und Funktionsweise .....	30
3.4	Anwendungsgebiete .....	33
<b>4.</b>	<b>VDI/VDE Richtlinie .....</b>	<b>34</b>
4.1	Kenngößen .....	35
4.2	Bestimmung der Antastabweichung.....	35
4.3	Bestimmung der Längenmessabweichung .....	36
<b>5.</b>	<b>Messmittel .....</b>	<b>37</b>
5.1	Messsoftware Metrolog XG.....	37
5.2	Lasertracker.....	38
5.2.1	Leica Absolute Tracker AT901 LR .....	38
5.2.2	Leica Absolut Tracker AT401 .....	39
5.2.3	FARO Laser Tracker Xi / X v2.....	40
5.3	Reflektoren.....	41
5.4	AT MeteoStation .....	41
5.5	Spiegelkonstruktion.....	42
<b>6.</b>	<b>Testwand .....</b>	<b>44</b>
6.1	Messaufbau .....	44
6.2	Idealbedingungen .....	45
6.3	Gegebenheiten der Testwand.....	46
6.3.1	Testmessung Temperatur .....	48
6.3.2	Testmessung Boden .....	50
6.4	Realisierung der Testwand .....	51
6.4.1	Konstruktion der Wandhalterung.....	51
6.4.2	Festlegung des Wandkoordinatensystems.....	52
6.4.3	Absteckung der Wandpunkte .....	53
6.4.4	Montage und Ausrichtung der Wandhalterungen.....	55

---

<b>7. Richtlinienkonforme Lasertrackerprüfung .....</b>	<b>62</b>
7.1 Nomenklatur.....	62
7.2 Vorbereitung .....	63
7.3 Messung der Antastabweichung Maß/Form.....	63
7.4 Messung der synthetische Prüflänge .....	65
7.5 Messung der Referenzlängen .....	67
7.5.1 Allgemeine Aspekte der Referenzlängenbestimmung.....	67
7.5.2 Ausrichten der Spiegelkonstruktion und des Lasertrackers.....	69
7.5.3 Messung der Referenzlängen .....	71
7.6 Messung der Istlängen.....	71
<b>8. Auswertung der Messungen .....</b>	<b>73</b>
8.1 Auswertung der Antastabweichung.....	73
8.2 Auswertung Messung der synthetische Prüflänge .....	74
8.3 Auswertung der Referenzlängen.....	75
8.3.1 Auswertung der Messdaten von Metrolog.....	76
8.3.2 Auswertung der Messdaten von FARO Insight .....	76
8.4 Auswertung Längenmessabweichung .....	77
8.5 Darstellung und Beurteilung der Ergebnisse.....	77
8.5.1 Antastabweichung Maß (PS).....	78
8.5.2 Antastabweichung Form (PF).....	81
8.5.3 Synthetische Prüflänge .....	83
8.5.4 Referenzlängen.....	85
8.5.5 Längenmessabweichung.....	87
<b>9. Prozessanweisung.....</b>	<b>91</b>
<b>10. Schlussfolgerung und Ausblick.....</b>	<b>94</b>
<b>Begriffserläuterungen .....</b>	<b>96</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>99</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>102</b>

---

<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>104</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>110</b>
A – Protokolle Betriebsart und Betriebsbedingungen.....	110
B – Protokolle Antastabweichung Maß/Form.....	113
C – Protokolle synthetische Prüflänge .....	117
D – Protokoll Referenzlängenbestimmung.....	119
E – Protokoll Längenmessabweichung .....	122
F – Ergebnisdiagramme der Längenmessabweichung.....	129



## 1. Einleitung

Die Masterarbeit „Testwand zur Prüfung mobiler 3D-Messgeräte“ ist in Zusammenarbeit mit der AiMESS Services GmbH entstanden. Gegründet wurde die Firma 2007 als AfM Technology GmbH Ost und 2010 in AiMESS Services umfirmiert. Der Name steht für Advanced Industrial Measurement Engineering and Software Solutions und spiegelt damit das Aufgabenfeld des Betriebes wieder. Als Dienstleister im Bereich der 3D-Messtechnik misst, berät und entwickelt AiMESS für Kunden aus den Branchen Automobil, Luftfahrt, Schiff-, Stahl- und Anlagenbau sowie deren Zulieferer. In den letzten Jahren konnte die Firma durch innovative Leistungsangebote und Messsysteme seine Marktanteile sowohl national, als auch international steigern und so ein überdurchschnittliches Wachstum erzielen. (1)

Zur Sicherstellung der Genauigkeits- und Qualitätsansprüche der Kunden ist es notwendig, die eingesetzten Instrumente regelmäßig zu überprüfen. Dazu gehört zum einen die Kalibrierung des Gerätes durch den Hersteller und zum anderen auch die Kontrolle durch den Anwender selbst. Die Prüfergebnisse sind jedoch nur eindeutig zu interpretieren und zu vergleichen, wenn sie auch nach einheitlichen Prüfverfahren durchgeführt werden. Zur Überprüfung von Koordinatenmessgeräten (KMG) wurde daher die Richtlinie VDI/VDE 2617 herausgegeben. Diese definiert zum einen die Kenngrößen zur Genauigkeitsbeschreibung und zum anderen die Prüfverfahren. Besonders interessant für die AiMESS Services GmbH, die hauptsächlich mit Lasertrackern arbeitet, ist das Blatt 10 der Richtlinie, welches Verfahren zur Überprüfung von Lasertrackern aufführt. Die dort beschriebenen Prüfstrategien eignen sich zur Prüfmittelüberwachung gemäß der DIN ISO 9000er Familie und können damit als Prüfverfahren im Qualitätsmanagementhandbuch aufgenommen werden. Dies strebt auch die AiMESS Services GmbH an und bildet die Grundlage für die vorliegende Masterarbeit. Aufgabe ist es eine Testwand richtlinienkonform und praxisgerecht in den Räumlichkeiten der Firma umzusetzen und durch Testmessungen mit unterschiedlichen Lasertrackern zu verifizieren. Mit Hinblick auf die Einführung eines Qualitätsmanagementhandbuches soll zusätzlich eine Prozessanweisung zur Durchführung der Überprüfung angefertigt werden.

## 2. Qualitätsmanagement

Aufgrund der engen Verknüpfung des Masterarbeitsthemas mit dem Qualitätsmanagement (QM) soll zunächst ein Einblick in das Themengebiet gewährt werden.

Die Geschichte des Qualitätswesens reicht bis in die Frühgeschichte und das Altertum zurück, wo die Qualität durch eine einfache Funktionsprüfung festgestellt wurde. Im Mittelalter wurde diese einfache Prüfung wesentlich umfassender. Denn die zu der Zeit entstanden Handwerkerzünfte hatten bereits klar definierte Regeln, für z.B. die Ausbildung, Zulassung und den Absatz der Handwerksbetriebe, die auf ihre Einhaltung hin überprüft wurden. Darüber hinaus gab es erste Normen, die die Beschaffenheit der Produkte vorgaben. Die zunehmende Industrialisierung und die immer kleiner werdenden Aufgabenbereiche eines einzelnen Arbeiters führten auch zu einem immer umfangreicheren und komplexeren Bedarf an Qualitätsprüfung. Aus der einst einfachen Funktionsprüfung hat sich so bis heute ein umfassendes und spezifiziertes Qualitätsmanagement mit einer Reihe von Normen entwickelt. (2)

### 2.1 DIN EN ISO 9000 Normenfamilie

Eine häufig verwendete Normenfamilie ist die DIN EN ISO 9000 Familie, auf die im Folgenden mehrfach Bezug genommen wird, sodass zunächst eine kurze Einführung erfolgt.

Die DIN EN ISO 9000 Normenfamilie besteht aus einer Reihe von Regelwerken, die sich mit dem Thema Qualitätsmanagementsysteme auseinandersetzen. Die Entwicklung hin zu einer solchen Norm ist begründet in der Globalisierung, welche eine Vereinheitlichung der bis dahin nationalen branchenspezifischen Normen forderte. In den 80er Jahren wurde daraufhin ein ISO-Komitee mit der Ausarbeitung eines internationalen und branchenübergreifenden Regelwerks beauftragt. Die zunächst nur ISO 9000 bezeichnete Norm wurde seitdem von vielen Normungsorganisationen in die nationale Normung übernommen, und seit der Ersterscheinung 1987 mehrere Male überarbeitet. Das führte dazu, dass der Name sich mittlerweile wie in Tabelle 1 dargestellt zusammensetzt. (3)

Abkürzung	Bedeutung	Erläuterung
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung	Überführt in die deutsche Normung
<b>EN</b>	Europäische Normung	Überführt in die europäische Normung
<b>ISO</b>	International Organisation for Standard	Internationale Normung
<b>9000:2008</b>	Normennummer : Stand	Kennzeichnet die letzte Aktualisierung

**Tabelle 1: Namenszusammensetzung DIN EN ISO 9000**

Das Regelwerk besteht insgesamt aus drei Normen die sich inhaltlich wie folgt darstellen:

- **DIN EN ISO 9000:2005:** Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe
- **DIN EN ISO 9001:2008:** Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen
- **DIN EN ISO 9004:2009:** Leiten und Lenken für den nachhaltigen Erfolg einer Organisation - ein Qualitätsmanagementansatz

Die DIN EN ISO 9000:2005 beschreibt zum einen das gesamte Normensystem und die acht Grundsätze des QM und zum anderen erfolgt die Definition von Begriffen mit Hilfe von Begriffsdiagrammen. Die Diagramme sind aufgeteilt in verschiedene Begriffsgruppen, wie z.B. qualitätsbezogene, managementbezogene und organisationsbezogene Begriffe. (2)

Die DIN EN ISO 9001:2008 legt einleitend den Geltungsbereich der Norm dar und geht anschließend auf den prozessorientierten Ansatz ein. Ebenfalls Inhalt ist die Erläuterung der Beziehungen und der Verträglichkeit mit anderen Managementsystemen. Wesentlicher Bestandteil dieser Norm ist die Darstellung der Anforderungen an ein Qualitätsmanagementsystem (QMS). (2)

Die DIN EN ISO 9004:2009 definiert zunächst die Unterschiede zwischen der ISO 9001 und ISO 9004 und geht anschließend darauf ein, wie ein bereits eingeführtes Qualitätsmanagementsystem auf das Niveau eines Total Quality Management (TQM) gebracht werden kann. (2)

## **2.2 Begriffe aus dem Qualitätsmanagement**

Grundlage für die Vergleichbarkeit und auch für die Zertifizierung von Qualitätsmanagementsystemen ist ein einheitliches Verständnis von themenbezogenen Begriffen, wie z.B. Qualität. Zur Sicherstellung dessen werden in der DIN EN ISO 9000 grundlegende Begriffsdefinitionen für das Qualitätsmanagement aufgeführt. Für ein besseres Verständnis werden nachfolgend einige wichtige Begriffe definiert.

### **2.2.1 Qualität**

„Qualität ist der Grad, in dem ein Satz inhärenter (innewohnender) Merkmale Anforderungen erfüllt.“ (4) Die Merkmale charakterisieren immer die qualitativen Eigenschaften eines Objektes im Gegensatz zu dem Merkmalswert, der das quantitative Maß darstellt. Der Wert wird dabei meist als Soll- bzw. Istwert angegeben und bildet somit die Grundlage für die Prüfbarkeit. Die Anforderungen, die erfüllt werden sollen, werden zum einen vom Kunden und dem Markt definiert und zum anderen durch die Gesellschaft, die die Rechte des Kunden vertritt. (2)

### **2.2.2 Qualitätsmanagement**

„Qualitätsmanagement sind die aufeinander abgestimmten Tätigkeiten zum Leiten und Lenken einer Organisation bezüglich Qualität“ (5) und ist Bestandteil des Gesamtmanagements. Es reiht sich damit in die Reihe von z.B. dem Finanz-, dem Versicherungs- und dem Personalmanagement ein und muss genauso die Aspekte der Wirtschaftlichkeit beachten. Die Besonderheit des Qualitätsmanagements liegt darin, dass es von allen Instanzen, also von der Geschäftsleitung bis zum ausführenden Mitarbeiter des Unternehmens beachtet und wahrgenommen werden muss. (2)

### **2.2.3 Qualitätsmanagementsystem**

Zum besseren Verständnis der Definition des Qualitätsmanagementsystems ist es sinnvoll, vorher den Begriff Managementsystem zu definieren. „Ein Managementsystem ist ein System zum Festlegen von Politik und Zielen sowie zum Erreichen dieser Ziele.“ (5) In Verbindung mit der Definition: „Das Qualitätsmanagementsystem ist ein Managementsystem zum Leiten und Lenken einer Organisation bezüglich der Qualität.“ (6) stellt sich klar heraus, dass das QMS sowohl die organisatorischen als auch die technischen Mittel umfasst, die notwendig sind, um Qualitätsmanagement durchführen zu können. Für eine Zertifizierung muss eine schriftliche Dokumentation, die QM-Darlegung, erstellt werden. (2)

## **2.3 Zweck**

Durch den hohen Konkurrenzkampf in vielen Branchen ist die Qualität eines Produktes oder einer Dienstleistung zu einem entscheidenden Faktor für die Existenz eines Unternehmens geworden. Nur durch einen gleichbleibenden hohen Qualitätsstandard kann die Kundenzufriedenheit erreicht und der Kunde an die Firma gebunden werden. Neben der Zufriedenheit des Kunden kann eine gute Qualität auch zu Kostenersparnissen führen.

Denn durch eine produktionsbegleitende Qualitätsprüfung können frühzeitig Fehler erkannt und behoben werden, sodass eine teure Nachbearbeitung nicht mehr notwendig ist.

(7) Zur Sicherstellung des angestrebten Qualitätslevels erfolgt in vielen Firmen die Einführung eines Qualitätsmanagements, welches folgende Ziele verfolgt:

- Sicherung der Produktions- und Leistungsqualität,
- langfristige Sicherung der Marktposition durch innovative Produkt- und Leistungsentwicklung und
- Schaffung eines Vertrauensverhältnisses zum Kunden.

Durch die Einführung und Umsetzung eines Qualitätsmanagements erhofft sich ein Unternehmen positive interne und externe Effekte. Die Externen, wozu z.B. das Vertrauen der Kunden oder auch die Verbesserung der Rechtsposition gehört, werden in der Tabelle 2 als Ziele und Vorteile formuliert und zusätzlich begründet. (2)

Vorteile und Ziele	Begründung
<b>Vertrauen der Kunden</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Der Kunde kann auf grundlegende Analysen und Audits beim Lieferanten verzichten.</li> <li>2. Der Kunde kann seine Wareneingangsprüfung reduzieren, ggf. auf eine Produktprüfung verzichten.</li> <li>3. Umfang und Anzahl der Reklamationen sinken.</li> <li>4. Der Kunde kennt seine Ansprechpartner beim Lieferanten.</li> <li>5. Der Kunde weiß, dass er ggf. in relevante Dokumente oder Prozesse beim Lieferanten Einsicht nehmen kann.</li> </ol>
<b>Marketing- und Werbeeffekte, Konkurrenzfähigkeit, Marktposition</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>6. Der potentielle Kunde weiß, dass mit einem zertifizierten QMS die erforderlichen Maßnahmen zur Erfüllung der Qualitätsforderungen beim Lieferanten sichergestellt sind.</li> <li>7. Zertifizierte Unternehmen werden bei Auftragsvergaben bevorzugt.</li> <li>8. Die Zertifikate werden in der EU und in weiteren Staaten anerkannt.</li> </ol>
<b>Verbesserung der Rechtsposition</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>9. Bei Rechtsfällen nach dem Produkthaftungsgesetz und nach §823 BGB verbessert ein zertifiziertes QMS die Rechtsposition.</li> <li>10. Ein zertifiziertes QMS dient der Entlastungsbeweisführung im Schadensfall.</li> </ol>
<b>Reduzierung von Haftungsumfängen</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>11. Ein wirksames QMS nutzt Methoden der Fehlerreduzierung und lässt damit eine Verringerung der Haftungsfälle erwarten.</li> <li>12. Ein reduziertes Haftungsrisiko kann zu reduzierten Versicherungsprämien führen.</li> </ol>
<b>Produkt- und Leistungsentwicklung</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>13. Ein QMS fordert die Entwicklung von Kunden- und Marktforderungen ständig zu verfolgen. Es garantiert damit eine Leistungsentwicklung im Unternehmen.</li> </ol>

**Tabelle 2: Externe Gründe und Ziele für die Entwicklung und Einführung eines wirksamen QMS (2)**

Der Nutzen im Unternehmen selbst liegt hauptsächlich in der Kostenminimierung und Verbesserung des Betriebsklimas, was durch das Analysieren, Bewerten, Optimieren und Festlegen von qualitätsrelevanten Vorgängen erreicht wird. Weitere interne Effekte sind in Tabelle 3 dargestellt. (2)

Vorteile und Ziele	Begründung
<b>Abläufe sind sicher gestaltet</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Vermeiden von Fehlern in den Abläufen.</li> <li>2. Vermeiden von Redundanzen erhöht die Produktivität.</li> <li>3. Abläufe werden personenunabhängig, kein Know-how-Verlust bei Personalwechsel.</li> <li>4. Die Mitarbeiter werden besser befähigt, ihre Aufgaben wahrzunehmen.</li> <li>5. Mit abnehmender Fehlerzahl und reduzierten Reklamationen verringern sich auch die Fehlerkosten.</li> <li>6. Abläufe sind beschrieben, sodass eine Einarbeitung schneller und reibungsloser verlaufen kann.</li> <li>7. Die Organisation wird transparenter.</li> </ol>
<b>Verantwortungen und Kompetenzen sind festgelegt</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>8. Durch klare Aufgabenzuordnung werden Fehler vermieden.</li> <li>9. Das Qualitätsbewusstsein der Mitarbeiter wird gefördert; Mitarbeiter werden motiviert.</li> <li>10. Die Eigenverantwortlichkeit der Mitarbeiter wird entwickelt.</li> <li>11. Grundlage für ein wirksames Controlling</li> </ol>
<b>Kontinuierliche Qualitätsarbeit</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>12. Das QMS fordert eine kontinuierliche Bewertung und Neufestsetzung der Qualitätsziele; das System und die Einzelprozesse werden ständig verbessert.</li> <li>13. Das QMS ist eine wichtige Voraussetzung und Grundlage für die Beteiligung an unternehmensübergreifenden, branchenspezifischen Qualitätsförderungs- und -nachweisprogrammen.</li> </ol>
<b>Integration weiterer Managementsysteme</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>14. Weitere Managementsysteme nach EN ISO 14001 f. oder Eigenkontrollsysteme sind in ein umfassendes Managementsystem des Unternehmens integrierbar.</li> </ol>

**Tabelle 3: Interne Gründe und Ziele für die Entwicklung und Einführung eines wirksamen QMS (2)**

## 2.4 Aufgabenbereiche des Qualitätsmanagements

Insgesamt sind dem Qualitätsmanagement vier Aufgabenbereiche zugeordnet, die dazu dienen, die eben aufgeführten positiven Nutzen zu erzielen. Der Erste ist die *Qualitätsplanung*, welche die Aufgabe hat die Qualitätsziele, die notwendigen Ausführungsprozesse sowie die Ressourcen zur Erfüllung der Qualitätsziele festzulegen. Im besonderen Blickpunkt der Qualitätsplanung steht dabei die Planung der Entwicklung des Qualitätsniveaus, was auch die Planung der Produkt- bzw. Leistungsqualität beinhaltet. Bevor jedoch die Planung erfolgen kann, muss der aktuelle Qualitätsstand eingeschätzt werden. Die Einschätzung kann mit den Methoden

- Ist-Stand-Analyse,
- Qualitätskostenanalyse und
- Qualitätsaudit

erfolgen. Nach Abschluss der Analysen können auf Grundlage der Ergebnisse firmenspezifische Qualitätsziele aufgestellt werden. Für die Planung der Produkt-/Leistungsqualität müssen die Qualitätsmerkmale, welche sich aus

- Kundenanforderungen,
- Markttrends,
- technische Entwicklung sowie
- Randbedingungen (Verordnungen, Normen)

ableiten lassen, herausgearbeitet werden. Dazu sollten die notwendigen Informationen aus den Bereichen der Forschung, Entwicklung und dem Marketing geliefert werden. Die Qualitätsmerkmale sind die Ausgangsposition für die Prüfplanung. (8)

Der zweite Aufgabenbereich des Qualitätsmanagements, die *Qualitätslenkung*, beschäftigt sich mit der Erfüllung von Qualitätsanforderungen. Dafür werden vorbeugende, überwachende und korrigierende Tätigkeiten ausgeübt. Grundlage all dieser Handlungen sind Qualitätsprüfungen und Analysen, aus denen Sofortmaßnahmen oder langfristige Maßnahmen abgeleitet werden können. In diesem Zusammenhang wird auch von unmittelbarer und mittelbarer Qualitätslenkung gesprochen. Bei Ersterer erfolgt eine sofortige Korrektur eines durch Prüfung festgestellten Fehlers und bezieht sich zumeist auf Einzelfälle. Die mittelbare Qualitätslenkung hingegen beschäftigt sich mit der Strukturierung der Prozesse, um Qualitätsabweichungen vorzubeugen und ist somit ein langwieriger Prozess. Aus diesem Grund werden die Maßnahmen auch als Ziele im Qualitätsplan aufgenommen. (8) Die Masterarbeit integriert sich in diesen Aufgabenbereich, da durch die regelmäßige Überprüfung der Lasertracker eine Prüfmittelüberwachung erfolgt. Dies ist eine vorbeugende Maßnahme, da somit sichergestellt wird, dass das Instrument seine angegebenen Spezifikationen erfüllt. Dadurch wiederum ist der Grundstein zur Erfüllung der Qualitätsanforderungen des Kunden gelegt.

Die *Qualitätssicherung* stellt den dritten Aufgabenbereich dar und ist auf die Erzeugung von Vertrauen, dass Qualitätsanforderungen erfüllt werden, ausgerichtet. Wichtiges Werkzeug zur transparenten Darstellung des Qualitätsmanagements ist das Qualitätsmanagementhandbuch (QMH). Es stellt alle Verantwortlichkeiten, Kompetenzen und Abläufe dar, sodass es auch ein Hilfsmittel zur Klärung von Produkthaftungsfällen ist. (8)

Der letzte Aufgabenbereich ist die *Qualitätsverbesserung*. Dahinter versteckt sich die Weiterentwicklung des Qualitätsmanagements. Dabei soll erreicht werden, dass das Verhältnis zwischen den aufgewandten Mitteln und dem Ergebnis sich verbessert. Grundlage dafür sind interne Qualitätsaudits oder auch Zertifizierungs- bzw. Überwachungsaudits. Kommt es zu Änderungen in den Prozessen, müssen diese in die Qualitätsmanagementdokumente, vor allem in das QMH, übertragen werden. (8)

Alle Bereiche des Qualitätsmanagements und ihr Aufgaben sind in Abbildung 1 noch mal dargestellt.

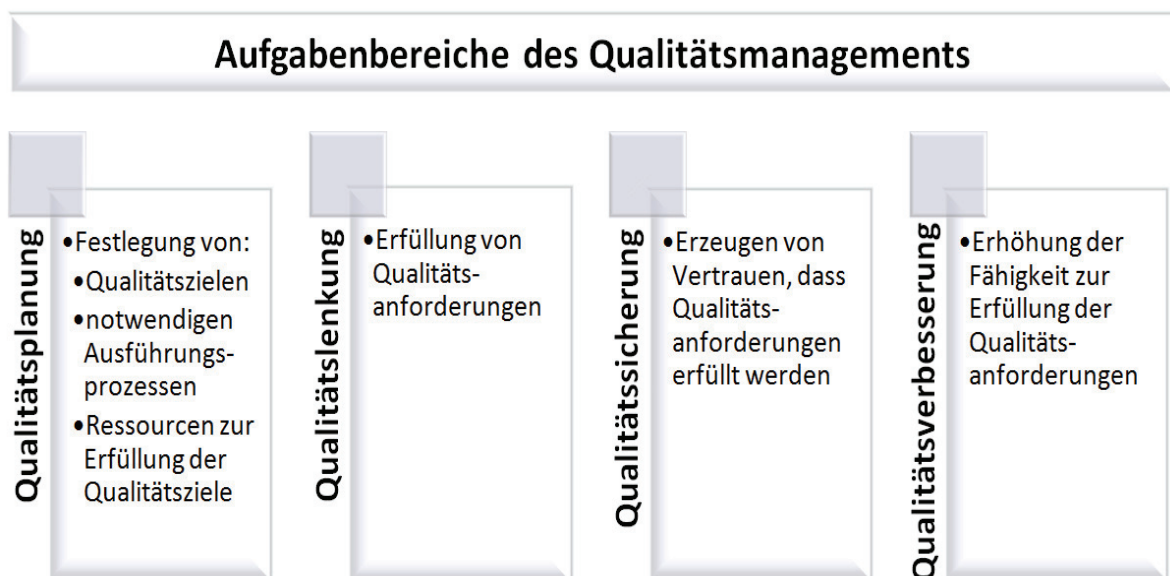


Abbildung 1: Aufgabenbereiche des Qualitätsmanagements (8)

## 2.5 Anforderungen an ein Qualitätsmanagementsystem

Generell können Qualitätsmanagementsysteme auf Grundlage unterschiedlicher Standards aufgebaut werden. Zu diesen gehören z.B.:

- DIN EN ISO 9000 ff



- TQM - Total Quality Management
- KVP - Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
- Kaizen - Veränderungen zum Besseren und
- Six Sigma - Null-Fehler-Modell.

Der am weitesten verbreitete Standard ist dabei die DIN EN ISO 9000er Normenfamilie (9), nach der auch die AiMESS Services GmbH ihr Qualitätsmanagementsystem aufbauen wird. Nachfolgend werden daher nur die Anforderungen nach der DIN EN ISO 9001 erläutert.

Alle Forderungen, die die Unternehmensleitung ansprechen, werden unter der Anforderung *Verantwortung der Leitung* zusammengefasst. Wichtigste Aufgabe der Leitung ist die Ausarbeitung und Darstellung der Qualitätspolitik und die damit verbundenen Qualitätsziele. Eine umfassende Qualitätsplanung soll dabei die Umsetzung der Ziele gewährleisten, indem sie alle notwendigen Maßnahmen und Methoden festlegt. Zusätzlich müssen die Verantwortlichkeiten und Befugnisse erarbeitet und im Qualitätsmanagementhandbuch dokumentiert werden. Ebenfalls Aufgabe der Leitung ist die Gewährleistung des Aufbaus eines Systems, das die Verteilung und Pflege von Dokumenten und Aufzeichnungen ermöglicht. Zur Sicherstellung der geforderten Anforderungen verpflichtet sich das Management zusätzlich, die Prozesse und das QMS regelmäßig bewerten zu lassen. (10)

Eine weitere Anforderung an ein Qualitätsmanagementsystem ist das *Management der Ressourcen*. Das bedeutet, dass das Unternehmen nachweisen muss, dass es in der Lage ist, erforderliche Mittel zur Realisierung der Produkte bzw. Dienstleistung zu erkennen und bereit zu stellen. Dabei zu berücksichtigen sind die Personalauswahl, die Bereitstellung von Einrichtungen und die Schaffung eines geeigneten Arbeitsumfeldes. (10)

Die dritte Anforderung ist die *Produktrealisierung*. Es soll gezeigt werden, dass der Betrieb Kundenforderungen identifizieren und vereinbaren kann. Zusätzlich verbirgt sich hinter der Anforderung der Aufbau eines Prozessmanagements sowie die Einführung und Pflege eines Prüfmittelmanagements. (10) Zum Prüfmittelmanagement gehört z.B. die regelmäßige Überprüfung der eingesetzten Instrumente, sodass deren Funktionstüchtigkeit auf dem angegebenen Genauigkeitsniveau nachgewiesen werden kann. Die Prüfung des

Lasertrackers nach der VDI/VDE 2617 Blatt 10 kann somit ins Prüfmittelmanagement eingeordnet werden.

*Messung, Analyse und Verbesserung* ist die vierte und letzte Anforderung an ein Qualitätsmanagementsystem. Am Ende eines jeden Prozesses im QMS müssen Messungen und Analysen durchgeführt werden. Die dafür erforderlichen Maßnahmen sollen vom Unternehmen geplant und eingeführt werden. Dabei erfolgt eine Auflistung, welche Messungen an den unterschiedlichen Produkten oder Dienstleistungen vorgenommen werden sollen. Aus einer anschließenden Analyse sollen ggf. Korrektur- oder Vorbeugungsmaßnahmen resultieren. Um einschätzen zu können, ob alle Mechanismen ineinandergreifen, werden interne Audits durchgeführt. Alles zusammen soll zu einem stetigen Verbesserungsprozess führen. (10)

Alle vier Anforderungen können im Prozessmodell der DIN EN ISO 9001 (Abbildung 2) zusammengebracht und um den Aspekt der Kundenorientierung erweitert werden.

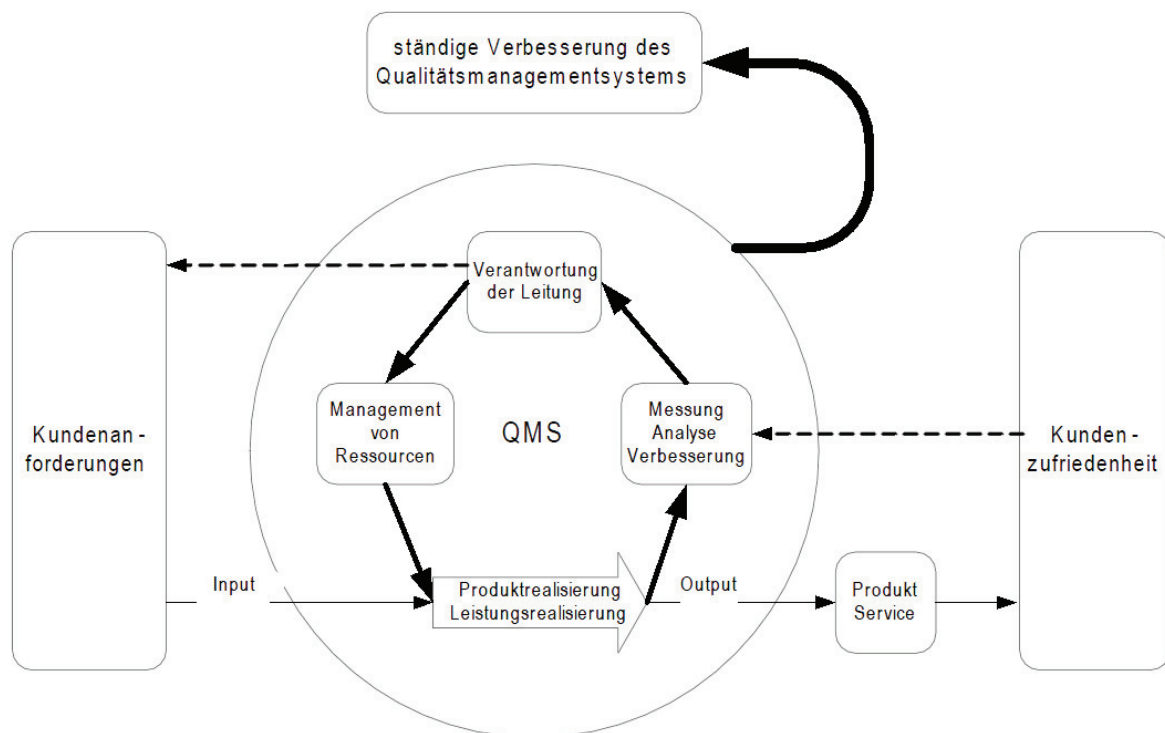


Abbildung 2: Prozessmodell nach DIN EN ISO 9001:2008 (2)

## 2.6 Struktur der Qualitätsdokumentation

Die Qualitätsdokumentation ist wesentlicher Bestandteil eines Qualitätsmanagementsystems, was hauptsächlich ein Dokumentationssystem ist, und hat die Aufgabe jeden Schritt sorgfältig zu dokumentieren. Gegliedert ist die Qualitätsdokumentation in drei Ebenen (Abbildung 3). Die Erste ist das Qualitätssicherungshandbuch/Qualitätsmanagementhandbuch (QS-Handbuch/QMH), die Zweite die Verfahrensanweisungen (VA) und die Dritte die Arbeitsanweisungen (AA). Für jede Ebene wird ein gesondertes Dokument angelegt. (11)

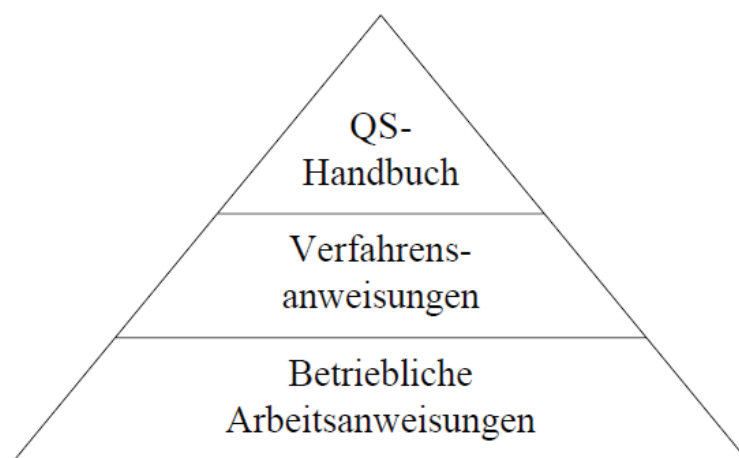


Abbildung 3: QM-Pyramide / Dokumentationspyramide (11)

### 2.6.1 Inhalt und Struktur des Qualitätsmanagementhandbuches

Die wichtigste Qualitätsaufzeichnung des Unternehmens ist das Qualitätsmanagementhandbuch, welches die Einhaltung und Forderungen der ISO-Norm dokumentiert. Bei der Ausarbeitung sollte sorgfältig vorgegangen werden, da es zum Teil auch kunden- und lieferantenoffen ist.

Die Gliederung des Qualitätssicherungshandbuches richtet sich oft nach den Kapiteln der Norm und sieht wie folgt aus. Einleitend werden im Handbuch kurz die Geschäftstätigkeiten und die grundsätzliche Qualitätspolitik des Unternehmens beschrieben. Mit der ebenfalls enthalten Verbindlichkeitserklärung der Geschäftsleitung wird das QMH in Kraft gesetzt. Dieser Teil kann, wenn gewünscht dem Kunden oder Lieferanten offengelegt werden. Im zweiten Abschnitt werden grundlegende im Qualitätssicherungshandbuch verwendete Begriffe definiert, sodass das Handbuch für alle Mitarbeiter verständlich ist. Den Großteil des Handbuches macht der Hauptteil aus, in dem

überwiegend Prozessbeschreibungen zu finden sind. Diese stellen die betrieblichen Abläufe mit formalen Darstellungsmitteln dar. Dabei müssen noch nicht einzelne Arbeitsabläufe beschrieben werden. Eine Darstellung wie die Forderungen der Norm erfüllt wurden genügt. Spezifizierte Angaben zu den Prozessen erfolgen erst in den Verfahrensanweisungen. (11)

### 2.6.2 Inhalt und Struktur der Verfahrensanweisungen

In den Verfahrensanweisungen, auch Prozessanweisungen genannt, erfolgt die Darstellung aller im Unternehmen potenziell möglichen Arbeitsschritte mittels formaler Mittel. Zusätzlich sind Entscheidungsregeln enthalten, die aber abstrakt und generell gehalten sind. Zugunsten der Übersichtlichkeit wird häufig ein Nummernsystem eingeführt, worüber einzelne Arbeitsabläufe eindeutig identifiziert und abgerufen werden können. (11)

### 2.6.3 Inhalt und Struktur der Arbeitsanweisungen

Die Arbeitsanweisungen stellen eine Vertiefung der Verfahrensanweisungen dar und enthalten die einzelnen konkreten Arbeitsschritte. Diese stellen somit die Umsetzung der VA im Einzelfall dar. Jede Ausführung einer Arbeitsanweisung und ggf. auch Abweichungen von dieser müssen stets dokumentiert werden. Dadurch entsteht eine Flut von Dokumenten, was die Einführung eines Dokumentenmanagementsystems mit Datenbankbindung notwendig macht. Dadurch können bei Haftungsklagen zu einem Produkt oder einer Dienstleistung alle dazugehörigen Dokumentationen abgerufen, und ggf. als Nachweise vorgelegt werden. (11)

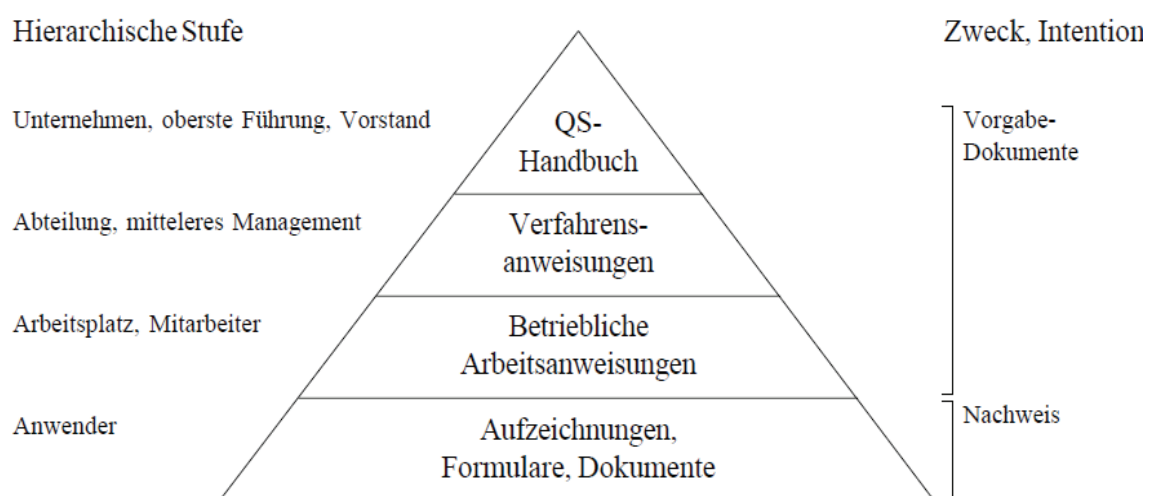


Abbildung 4: Erweiterte QM-Pyramide (11)

Die vorgeschriebene Dokumentation der ausgeführten Anweisungen ist ebenfalls fester Bestandteil der Qualitätsdokumentation und kann daher mit in die Qualitätspyramide aufgenommen werden. Das führt zu einer erweiterten QM-Pyramide, welche in Abbildung 4 dargestellt ist. Aus der Grafik sind neben den verschiedenen Ebenen der Qualitätsdokumentation auch noch der Zweck und die Intension sowie die betroffenen Personen einer einzelnen Ebene zu entnehmen. Deutlich wird durch die Pyramide auch, dass das QMH den kleinsten und die Dokumentation den größten Teil der Qualitätsdokumentation ausmacht.

### 3. Lasertracker

Neben dem eben vorgestellten Themengebiet Qualitätsmanagement spielt der Lasertracker ebenfalls eine große Rolle in der Masterarbeit, weshalb auch auf dieses Thema etwas genauer eingegangen werden soll.

Die Industrievermessung muss gegenüber den anderen Bereichen der Vermessung ganz anderen Anforderungen genügen. So ist zum Beispiel eine Anbindung an ein übergeordnetes Netz meist nicht notwendig, da die Messung im Werkstückkoordinatensystem erfolgt. Auch die Genauigkeitsanforderungen unterscheiden sich stark. Im Kataster z.B. ist eine Erfassung eines Gebäudes auf den Zentimeter vollkommen ausreichend, im Automobilbau hingegen sind Genauigkeitsanforderungen unter einem Millimeter gängig. Diese unterschiedlichen Anforderungen haben dazu geführt, dass sich auch die Messinstrumente unterscheiden. Ein in der Industrievermessung häufig eingesetztes Instrument ist der Lasertracker. Mit dessen Markteinführung 1991 konnte die 3D-Messgenauigkeit von unter einem Zehntelmillimeter auch außerhalb eines Labors realisiert werden. Ausschlaggebend dafür war die Verwendung eines Interferometers zur hochgenauen Streckenmessung. In den nachfolgenden Unterkapiteln soll daher ein Einblick in die physikalischen Grundlagen der Interferometrie sowie in die Strecken- und Winkelmessung gegeben werden. (12)

#### 3.1 Physikalische Grundlagen

Die zwei wichtigsten physikalischen Erscheinungen, die bei der Interferometrie eine Rolle spielen, sind die Interferenz und die Kohärenz.

##### 3.1.1 Interferenz

Die Interferenz ist ein Phänomen, das auftritt, wenn zwei oder mehrere Wellen aufeinandertreffen und sich überlagern. Zu beobachten ist Interferenz bei allen Arten von Wellen, wie z.B. Licht. Voraussetzung ist jedoch, dass die Wellen kohärent sind. Das bedeutet, dass sie eine feste Phasenbeziehung zueinander haben. (13)

Je nach Gangunterschied entsteht bei der Überlagerung eine Verstärkung oder eine Schwächung, sodass von konstruktiver und destruktiver Interferenz gesprochen wird. Erstere (Abbildung 5) entsteht aufgrund eines Gangunterschiedes, der ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist. Dadurch treffen immer Wellenberge bzw. Wellentäler aufeinander, wodurch es zu einer Addition der Wellenamplituden kommt. (13)

Bei der destruktiven Interferenz hingegen treffen immer Wellenberge auf Wellentäler, wodurch es zu einer Abschwächung oder Auslöschung kommt. Auslöschung entsteht aber nur, wenn die Amplituden der interferierenden Wellen gleich groß sind (Abbildung 6). Bei der destruktiven Interferenz beträgt der Gangunterschied ein Vielfaches der halben Wellenlänge. (13)

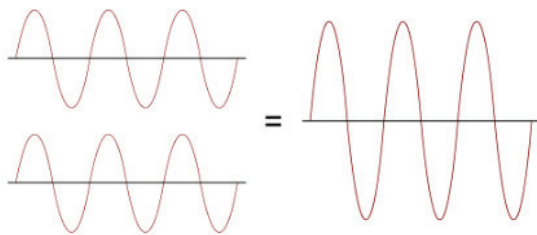


Abbildung 5: Konstruktive Interferenz bei gleicher Amplitude (13)

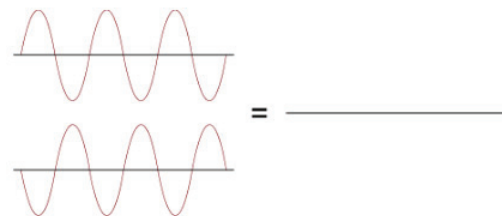


Abbildung 6: Destruktive Interferenz bei gleicher Amplitude (13)

### 3.1.2 Kohärenz

Interferenzen können nur beobachtet werden, wenn die interferierenden Wellen kohärent sind. Das bedeutet, dass ihre Zeit- und Ortsabhängigkeit bis auf eine Phasenverschiebung gleich ist. Weitergehend kann die Kohärenz in Zeitliche und Räumliche unterschieden werden (Abbildung 7).

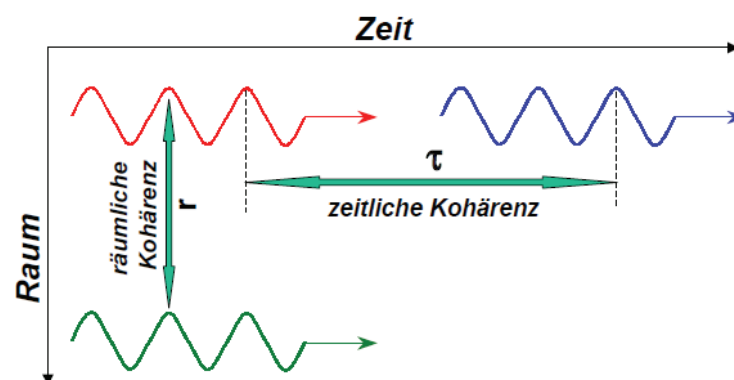


Abbildung 7: Zeitliche und räumliche Kohärenz (14)

Zeitliche Kohärenz tritt auf, wenn die Werte des Wellenfeldes am gleichen Ort zu unterschiedlichen Zeiten gleich sind. Durch die Analyse der zeitlichen Kohärenz kann die Kohärenzzeit  $\tau_c$  und daraus wiederum die Kohärenzlänge  $l_c$  abgeleitet werden. Diese Länge definiert gewissermaßen den Messbereich eines Interferometers, da bei Gangunterschieden größer  $l_c$  keine Interferenz mehr auftritt. Die Kohärenzlänge ergibt sich aus der Kohärenzzeit  $\tau_c$  und der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  der Welle.

$$l_c = c * \tau_c \quad (3.1)$$

Räumliche Kohärenz tritt auf, wenn die Werte des Wellenfeldes an verschiedenen Orten zur gleichen Zeit identisch sind. Analog zur Kohärenzzeit kann aus der räumlichen Kohärenz eine Kohärenzfläche  $F_c$  definiert werden. Durch die Kohärenzlänge und -fläche wird ein Kohärenzvolumen aufgespannt und nur innerhalb dessen können Interferenzeffekte registriert werden. (14)

$$V_c = F_c * l_c \quad (3.2)$$

### 3.2 Strecken- und Winkelmessung

Dadurch, dass der Lasertracker zu den polarmessenden Instrumenten gehört, spielt sowohl die Strecken- als auch die Winkelmessung bei der Bestimmung der dreidimensionalen Koordinaten eine Rolle. Die Streckenmessung kann beim Tracker interferometrisch oder absolut erfolgen, sodass das Grundprinzip beider Messverfahren näher beleuchtet werden soll.

#### 3.2.1 Interferometrische Streckenmessung

Zur Durchführung von interferometrischen Streckenmessungen werden Interferometer verwendet. Dies sind Instrumente, mit denen hoch genau Längen-, Brechzahl- und Wellenlängenmessungen durchgeführt werden können. Abgeleitet werden diese Messgrößen aus dem durch Wellenüberlagerung entstandenen Interferenzmuster. Je nach Anzahl der interferierenden Strahlen oder nach Art der Strahlenteilung können Interferometer wie folgt eingeteilt werden:

<b>Anzahl der interferierenden Strahlen</b>	Zweistrahlintferometer (z.B. Michelson-Interferometer)
	Vierstrahlinterferometer (z.B. Fabry-Perot-Interferometer)
<b>Art der Strahlenteilung</b>	Amplitudenteilung
	Wellenfrontenteilung

**Tabelle 4: Einteilung Interferometer (15)**

Unter Amplitudenteilung wird eine physikalische Teilung verstanden. Dabei wird der Strahl durch einen Strahlenteiler oder halbdurchlässigen Spiegel zum Teil reflektiert und zum anderen Teil hindurch gelassen. Anschließend werden durch weitere Spiegel die Strahlen wieder zusammengeführt und erzeugen so auf einem Schirm ein Interferenzmuster, welches zur Messgrößenbestimmung ausgewertet wird. (15)



Die weniger verbreitete Wellenfrontteilung ist eine geometrische Teilung. Dabei erfolgt die Aufteilung des Strahls nicht wie oben beschrieben an einem Punkt, sondern an zwei räumlich getrennten Punkten. Von jedem Punkt breiten sich Wellen aus, die auf dem Schirm wieder aufeinandertreffen und so ebenfalls ein Interferenzmuster erzeugen. (16)

Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Unterteilungen können Interferometer auch noch in homodyn und heterodyn messende Instrumente eingeteilt werden. Homodyn bedeutet dabei, dass das Interferometer mit einer Frequenz arbeitet und heterodyn mit zwei. Nachfolgend sollen beispielhaft die Funktionsweisen dieser beiden Interferometertypen beschrieben werden.

### 3.2.1.1 Homodynes Interferometer

Das einfachste und geläufigste Interferometer ist das Michelson-Interferometer, welches 1887 vom gleichnamigen Erfinder entwickelt wurde. Es besteht im Wesentlichen aus einer Strahlungsquelle (Laser), einem Strahlenteiler, einem festen Referenzspiegel, einem beweglichen Spiegel und einem Detektor (Abbildung 8).

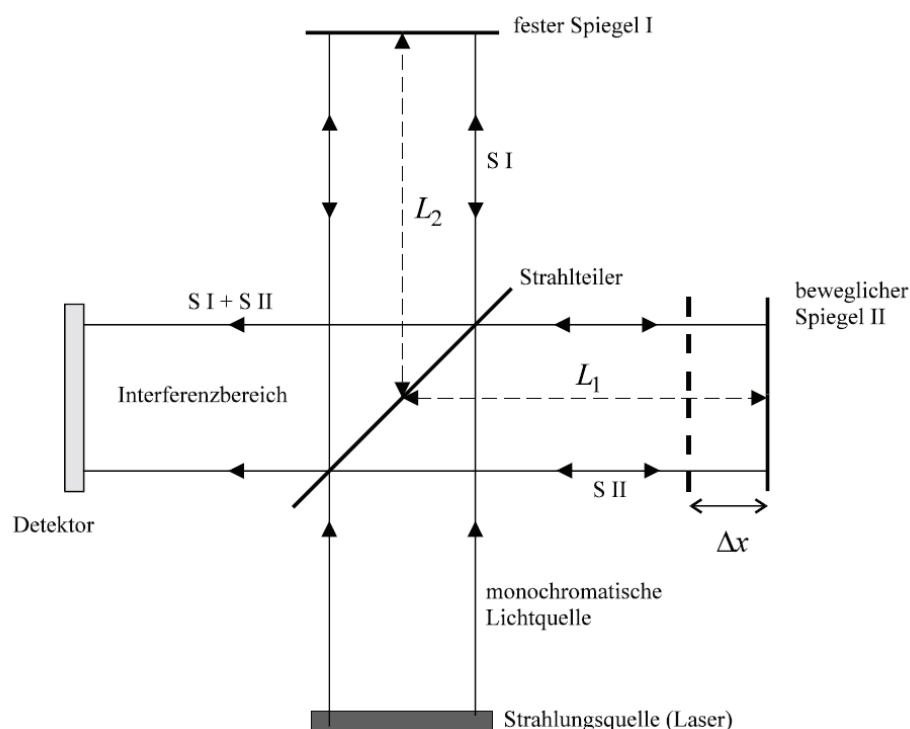


Abbildung 8: Aufbau Michelson-Interferometer (17)

Zur Bestimmung einer Längenänderung wird vom Laser ein Laserstrahl ausgesendet, welcher zunächst auf einen Strahlenteiler trifft. Dort wird die Wellenfront aufgespalten,

sodass ein Teilstrahl zum Referenzspiegel und einer zum Objektspiegel gesendet wird. Dort wird der jeweilige Strahl erneut reflektiert und trifft wiederum auf den Strahlenteiler. Das führt dazu, dass die beiden Teilstrahlen wieder zusammengeführt werden und miteinander interferieren. Wird nun der Objektspiegel bewegt, entstehen auf dem Bildschirm durchlaufende Interferenzringe, die vom Detektor registriert werden. Mittels der gezählten Interferenzen  $n$  und der Wellenlänge  $\lambda$  lässt sich dann eine Längenänderung  $\Delta L$  berechnen.

$$\Delta L = n * \frac{1}{2} * \lambda \quad (3.3)$$

Nachteil der Einfrequenz-Interferometer sind Licht- und Intensitätsschwankungen, die die Genauigkeit der Messung beeinflussen. Verursacht werden die Schwankungen z.B. durch die Alterung des Lasers oder durch Störungen des Messstrahls wie z.B. Turbulenzen. Zur Umgehung dieses Problems werden Zwei-Frequenz-Interferometer verwendet. (17)

### 3.2.1.2 *Heterodynes Interferometer*

Bei der Messung mit einem Zwei-Frequenz-Interferometer erfolgt eine Überlagerung von zwei Frequenzen, wobei eine davon dopplerverschoben ist. Die andere ist so gewählt, dass unabhängig von der Lage des Messspiegels die Mischfrequenz nicht null wird. Zur Erzeugung der unterschiedlichen Frequenzen muss ein einzelner Laser verwendet werden, da unterschiedliche Quellen niemals synchron arbeiten würden. Das führt zum Problem der Frequenzaufspaltung, welche nicht leicht zu realisieren ist, da sowohl eine optische als auch eine geometrische Trennung erfolgen muss. Zur Realisierung wird eine Zeeman-Aufspaltung in einem Magnetfeld durchgeführt und ein Polarisationsfilter eingesetzt. Durch die Zeeman-Aufspaltung werden zwei zirkular entgegengesetzt polarisierte Frequenzen erzeugt, die jedoch eine geringfügige Überlappung aufweisen. Die anschließende Strahlentrennung wird daher durch ein Polarisationsfilter realisiert. (17)

Das Funktionsprinzip eines Zwei-Frequenz-Interferometers (Abbildung 9) sieht wie folgt aus. Ein Laser in einer Magnetspule erzeugt, wie eben beschrieben, einen Laserstrahl mit zwei Frequenzen. Dieser Strahl durchläuft dann zunächst einen Strahlenteiler, wodurch es zur Aufteilung in Mess- und Referenzstrahl kommt. Der Messstrahl trifft anschließend auf den Polarisationsstrahlenteiler. Von dort aus wird ein Strahl mit der Frequenz  $f_2$  zum festen Reflektor geleitet und ein Strahl mit der Frequenz  $f_1$  zum Beweglichen. Als nächstes

erfolgt eine Reflexion des Messstrahls am festen bzw. am beweglichen Retroreflektor, wobei  $f_1$  bei Reflektorbewegungen dopplerverschoben wird. Die Dopplerverschiebung setzt sich zusammen aus der Frequenz  $f_1$ , der Geschwindigkeit  $v$  und der Lichtgeschwindigkeit  $c_0$ .

$$\Delta f = f_1 * \frac{v}{c_0} \quad (3.4)$$

Nach der Reflexion passieren beide Teile des Messstrahls wieder den Polarisationsstrahlenteiler und interferieren anschließend, wodurch Helligkeitsschwankungen mit der Differenzfrequenz  $f_2 - (f_1 + \Delta f_1)$  entstehen. Der Detektor 1 wandelt diese in elektrische Pulse um, sendet sie an den Verstärker V1 und dieser führt sie anschließend dem Vorwärtszähler zu. (17)

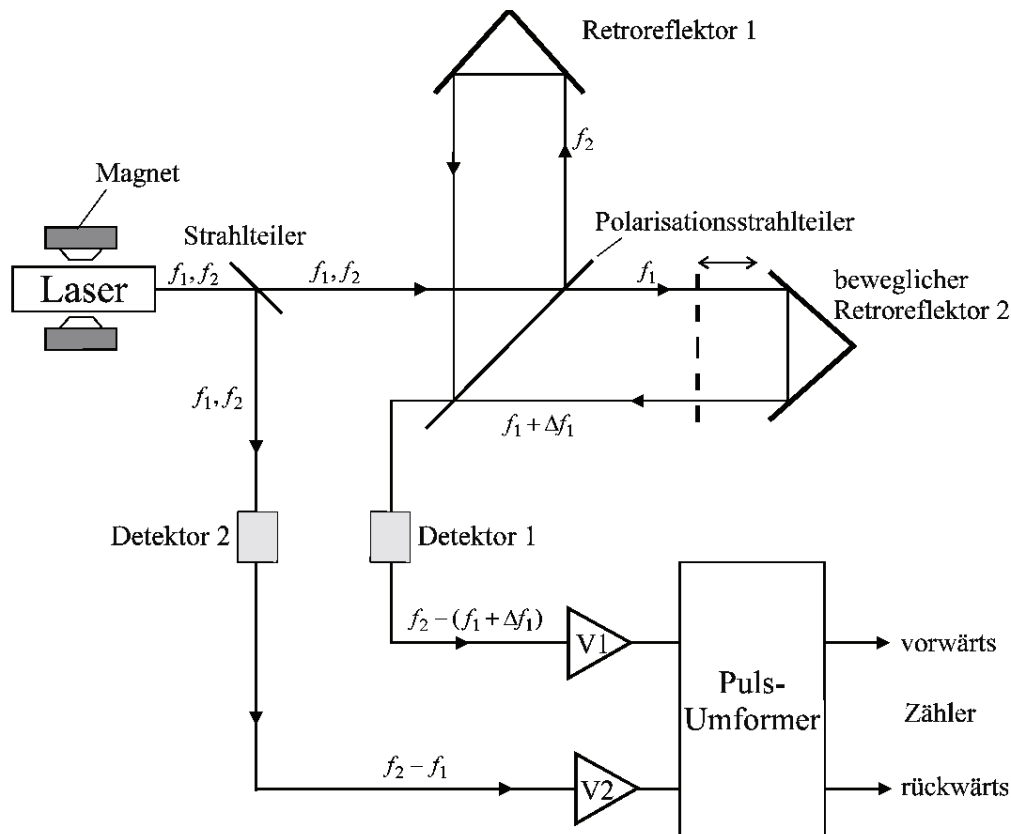


Abbildung 9: Zwei-Frequenz-Interferometer (17)

Parallel zum Messstrahl wird der Referenzstrahl durch Detektor 2 ebenfalls in einen elektrischen Puls mit der Frequenz  $(f_2 - f_1)$  umgewandelt und durchläuft dann den

Verstärker V2, sodass er anschließend in den Rückwärtseingang des Zählers gelangt. Abschließend bildet der Differenzzähler die Differenz der eingegangenen Impulse.

$$E_1 - E_2 = f_2 - (f_1 + \Delta f_1) - (f_2 - f_1) = \Delta f_1 \quad (3.5)$$

Bei einer Bewegung des Spiegels registriert der Zähler  $\Delta n$  Impulse in einer Zeit  $\Delta t$  die zusammen mit der Differenz der Impulse und einer Integration die Längenänderung  $\Delta L$  ergeben. (17)

$$\Delta L = \Delta n * \frac{\lambda_0}{2} \quad (3.6)$$

### 3.2.2 Absolute Streckenmessung

Neben der interferometrischen Streckenmessung spielt auch die Absolute eine Rolle bei Lasertrackermessungen. Die Distanz kann dabei zum einen mit den Impulsmessverfahren oder zum anderen mit dem Phasenvergleichsverfahren bestimmt werden.

Beim Impulsmessverfahren wird vom Sender ein Lichtimpuls ausgesandt, vom Reflektor reflektiert und anschließend vom Empfänger wieder aufgenommen. Dabei wird durch einen Zähler die Laufzeit bestimmt. Ausgelöst wird die Zeitmessung durch das Aussenden des Impulses und gestoppt durch das Empfangen. Aus der Laufzeit  $t$  und der Lichtgeschwindigkeit im Medium  $c$  lässt sich die Distanz  $D$  wie folgt berechnen.

$$D = \frac{1}{2} * c * t \quad (3.7)$$

Bei dem Phasenvergleichsverfahren wird ein sinusförmiges Signal als Maßeinheit für die Streckenmessung verwendet. Bei einer Messung wird das Signal ausgesendet und über das Objekt zurück zum Empfänger reflektiert. Dabei trifft die Messwelle phasenverschoben gegenüber der ausgesendeten Welle auf, sodass sich die Strecke aus folgender Gleichung bestimmen lässt:

$$D = \frac{N * \lambda + \Delta \lambda}{2} \quad (3.8)$$

Das Phasenreststück  $\Delta \lambda$  wird aus der Verschiebung zwischen ausgesendeter und empfangener Welle bestimmt. Das Vielfache der Modulationsfrequenz  $N$  wird über eine Fein- und Grobmessung ermittelt. Das bedeutet, dass mindestens zwei Phasenmessungen mit unterschiedlichen Wellenlängen durchgeführt werden müssen. Die Messung mit einer kleinen Maßstabswelle liefert dann  $\Delta \lambda_{Fein}$  und die mit einer Großen  $\Delta \lambda_{Grob}$ . Aus diesen

beiden Größen kann  $N$  näherungsweise bestimmt (Formel 3.9) und daraus wiederum  $D$  berechnet werden (Formel 3.10). (18)

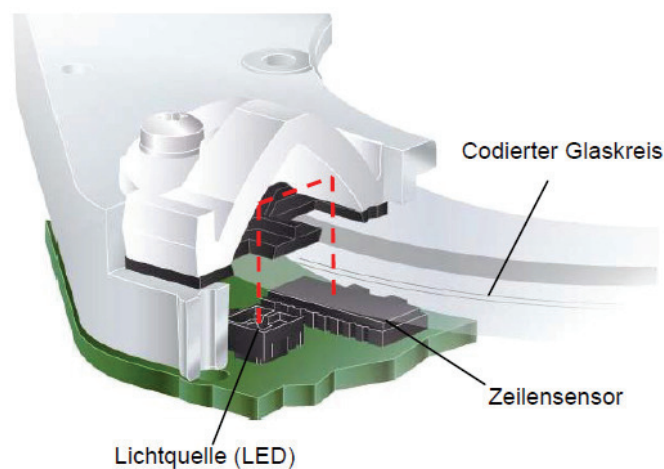
$$N = \frac{\Delta\lambda_{Grob} - \Delta\lambda_{Fein}}{\Delta\lambda_{Fein}} \quad (3.9)$$

$$D = \frac{N * \lambda_{Fein} + \Delta\lambda_{Fein}}{2} \quad (3.10)$$

### 3.2.3 Winkelmessung

Die zur Berechnung der Koordinate nun noch notwendige Winkelmessung soll exemplarisch am Beispiel des Leica Lasertrackers AT401 beschreiben werden.

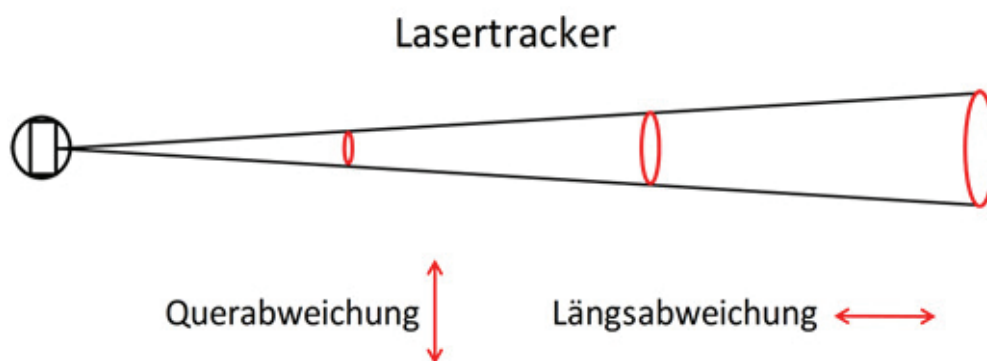
Die Hauptbestandteile des Winkelmesssystems sind ein codierter Glasteilkreis und vier Winkelencoder. Der Code des Teilkreises ist durch radial ausgerichtete Striche realisiert und so aufgebaut, dass er absolut und kontinuierlich ist. Dies ermöglicht eine Messung ohne Initialisierung des Winkelmesssystems vor der Messung. Die Winkelencoder (Abbildung 10) bestehen jeweils aus einer Lichtquelle, aus Spiegeln, die den ausgesendeten Strahl reflektieren, und einem Zeilensensor. (19)



**Abbildung 10: Aufbau Winkelencoder (19)**

Die Bestimmung der relativen Winkelangabe erfolgt über die Decodierung des auf dem Zeilensensor entstandenen Bildes. Dieses entsteht durch den von der Lichtquelle ausgestrahlten, über Spiegel reflektierten und durch den Glasteilkreis auf den Zeilensensor projizierten Lichtstrahl. Die Ermittlung läuft in zwei Teilschritten ab. Zunächst wird der Winkel grob anhand der codierten Striche bestimmt und anschließend wird durch ein, von Leica Geosystems entwickelten, Algorithmus die genaue Position der Codestriche

ermittelt. Dafür müssen mindestens 10 Codestriche erfasst werden. Zur Steigerung der Interpolationsqualität werden jedoch immer wenigstens 30 Striche verwendet. Dieser Algorithmus zur Bestimmung der Winkelangabe wird zeitgleich an allen vier Winkelabgriffen realisiert. Das führt dazu, dass systematische und periodische Fehler eliminiert, die Messgenauigkeit gesteigert und die Zuverlässigkeit der Messung verbessert werden. Insgesamt kann so die Winkelmessgenauigkeit, im Vergleich zu zwei Winkelencodern, um den Faktor 0,7 verbessert werden. (19) Die Winkelmessung ist jedoch immer noch schlechter als die Streckenmessung. Abbildung 11 verdeutlicht das Verhältnis zwischen Winkel- und Streckenmessgenauigkeit.



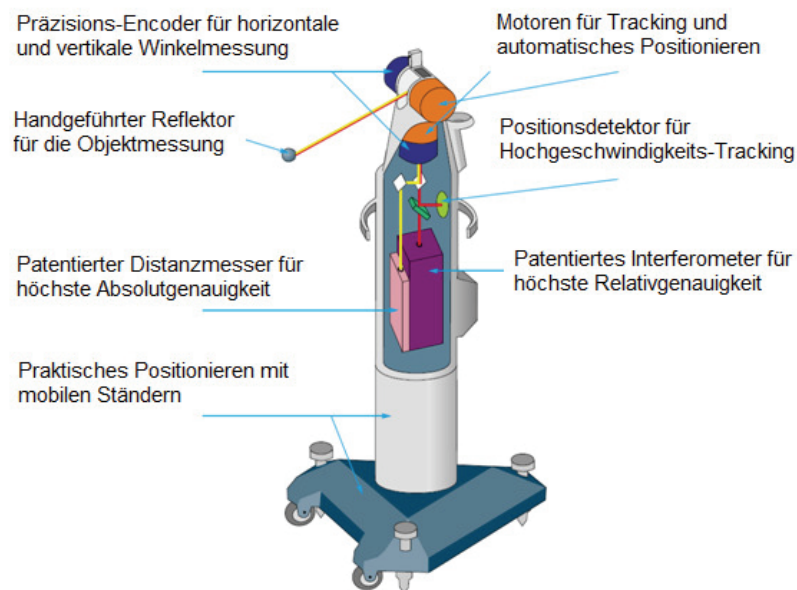
**Abbildung 11: Verhältnis Winkel- und Streckenmessgenauigkeit (20)**

Auf Grundlage dieses Wissens sollte der Messaufbau daher so gewählt werden, dass die Messpunkte möglichst in Zielrichtung des Lasertrackers liegen. Dadurch kann der Anteil des Winkelfehlers minimiert werden. (20)

### 3.3 Aufbau und Funktionsweise

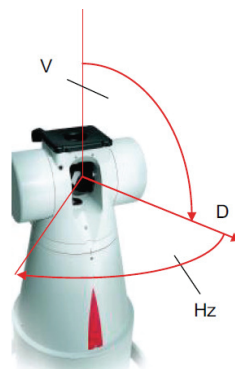
Nach der Erläuterung der grundlegenden Messprinzipien eines Lasertrackers, kann nun der Aufbau und die Funktionsweise beschrieben werden.

Ganz allgemein besteht ein Lasertrackersystem immer aus einem Computer mit einer Messsoftware, einem Controller und dem Tracker selbst. Der Aufbau des Lasertrackers ist in Abbildung 12 zusehen und wird im Folgenden zusammen mit der Funktionsweise erläutert.



**Abbildung 12: Aufbau Lasertracker (21)**

Zur Bestimmung von dreidimensionalen Koordinaten mit einem Lasertracker werden zum einen die Horizontalrichtung und der Vertikalwinkel mittels Winkelencodern und zum anderen die Strecke bestimmt (Abbildung 13).



**Abbildung 13: Messelemente (27)**

Die Winkelmessung erfolgt dabei wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben. Die Streckenmessung erfolgt typischerweise interferometrisch (IFM) und läuft wie im Abschnitt 3.2 beschrieben ab. Dadurch, dass die Interferometrie aber nur Relativstrecken misst, ist es notwendig, vor der eigentlichen Messung, eine Referenzmessung zum sogenannten „Vogelbad“ durchzuführen. Dieses befindet sich direkt am Lasertracker und hat eine kalibrierte Position, sodass anschließend eine absolute Strecke zum angetasteten Messpunkt ermittelt werden kann. Sollte es jedoch bei den Folgemessungen zu einer Unterbrechung des Strahls

kommen, muss erneut das „Vogelbad“ angemessen werden. Dies erweist sich im normalen Messbetrieb als schwierig und zeitaufwendig, sodass Lasertracker zusätzlich einen Absolutdistanzmesser (ADM) eingebaut haben. Dieser ermöglicht eine Messung nach Strahlenunterbrechung ohne erneutes Anmessen der kalibrierten Ausgangsposition. Dazu wird nach Signalverlust die absolute Strecke zur aktuellen Reflektorposition bestimmt und anschließend die relativen Messungen angehängen. (22) Nachteil des ADM-Verfahrens ist die, im Vergleich zu IFM, lange Integrationszeit, die das Messen von bewegten Reflektoren fehleranfälliger macht. Um jedoch trotzdem Messungen mit sehr hohen Genauigkeiten nach Laserstrahlunterbrechungen zu erreichen, hat Leica Geosystems 2008 ein neuartiges Messverfahren entwickelt. Das „Absolutinterferometer“ (AIFM) ist in der Lage absolute Distanzen zu einem sich in Bewegung befindlichen Reflektor zu messen und das mit einer Update-Rate und einer dynamischen Leistungsfähigkeit eines Interferometers. Das führt dazu, dass nach einem unterbrochenen Laserstrahl sofort eine absolute Streckeninformation vorliegt. Mit diesem Verfahren ist es Leica Geosystems gelungen die Vorteile von IFM und ADM zu vereinen. (23) Voraussetzung für eine kontinuierliche Messung zum Reflektor ist jedoch das Tracken des Reflektors. Dazu wird während einer Messung ein Teil des vom Target reflektierten Strahls im Tracker zu einem Positionsdetektor (PSD) geleitet. Sollte der Zielstrahl nicht im Zentrum des Reflektors aufkommen, so kommt auch der Teilstrahl nicht mittig auf dem PSD auf. Die Abweichung zum Zentrum wird dann erfasst und als Stellgröße an die Motoren der Winkelencoder weitergegeben, sodass der Lasertracker nachgeführt werden kann. (22)

Zusätzlich zu den bereits aufgeführten Bestandteilen gibt es noch die Möglichkeit den Tracker um die T-Produkte T-Cam, T-Probe, T-Mac und T-Scan zu erweitern (Abbildung 14 – 16). Dadurch kann der Anwendungsbereich des Lasertrackers erweitert werden. Mittels der T-Probe können zum Beispiel auch verdeckte Punkte angetastet werden.



**Abbildung 14: Leica AT901 mit T-Cam und T-Probe (24)**



**Abbildung 15: Leica AT901 mit T-Cam und T-Scan (25)**



**Abbildung 16: Leica T-Mac (26)**



### 3.4 Anwendungsgebiete

Durch die Erreichbarkeit hoher Genauigkeiten, die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten, das große Messvolumen und dem Einmannbetrieb wird der Lasertracker in vielen Bereichen der Industrie, wie Luft- und Raumfahrt, Automobilindustrie und Schiffbau eingesetzt. Mittels Tracker können beispielsweise folgende Messaufgaben erfüllt werden:

- Begleitung von Montageprozessen bei z.B. Vorrichtungen,
- Vergleichsmessungen gegen CAD-Daten,
- Kalibrierung und Führung von Maschinen und Robotern,
- Prüfung von Vorrichtungen und Bauteilen sowie
- Reverse Engineering (27).

Die Vorteile des Lasertrackers liegen vor allem in der intuitiven Handhabung, die es ermöglicht überall am Objekt Koordinaten zu bestimmen. Voraussetzung dafür ist jedoch eine Sicht zum Messpunkt. Darüber hinaus sorgt eine geringe Messzeit dafür, dass auch komplexe Messaufgaben schnell erfüllt werden können. Weitere Vorteile von Trackern sind die große Reichweite von bis zu 160 m und die Mobilität, die es ermöglicht das Messsystem beim Messobjekt aufzubauen. Mit der erreichbaren Genauigkeit und den eben genannten Vorteilen ist der Lasertracker für viele Anwendungen eine gute Alternative zu stationären Koordinatenmessmaschinen. (28)

Trotz der vielen Vorteile sind auch einige Nachteile von Lasertracker-Systemen anzuführen, die die Einsatzfähigkeit begrenzen. Die Messung erfolgt immer über die Antastung des Objektes und ist somit nicht berührungslos, was bei einigen Anwendungen problematisch ist. Hinzu kommt, dass durch den Reflektorkugelradius der kleinste messbare Radius limitiert ist. Ebenfalls kritisch ist z.T. die Anfälligkeit gegenüber Umgebungsveränderungen während der Messung, da das Messsystem abhängig von Lufttemperatur, Luftfeuchte und Luftdruck ist. Weitere Nachteile sind die Größe und das Gewicht sowie die Anschaffungskosten einiger Lasertracker. (28)

#### 4. VDI/VDE Richtlinie

Nachdem die Erläuterungen zu den Grundlagenthemen QM und Lasertracker abgeschlossen sind, soll in diesem Kapitel kurz die VDI/VDE Richtlinie vorgestellt werden.

Richtlinien sind generell nicht rechtsbindend, sondern sollen als richtungsweisende und praktische Arbeitsunterlage dienen. Die enthaltenen Beurteilungs- und Bewertungskriterien sollen es dem Nutzer ermöglichen, fundierte Entscheidungen zu treffen. Und obwohl die Richtlinien den Anwender nicht von der Verantwortung für sein eigenes Handeln entbinden, gelten sie doch als anerkannte Regeln der Technik und geben dem Nutzer so eine gewisse Sicherheit. (29) Neben den für den Nutzer positiven Aspekt, tragen Richtlinien auch dazu bei, dass ein globaler Marktzugang ermöglicht und erleichtert wird und dass technische Prozesse und Produkte auf einem hohen Qualitätsniveau gehalten werden können. Durch die zweisprachige Ausgabe der Richtlinien sind sie auch für international agierende Firmen interessant. (30) Die Richtlinien können über den Beuth Verlag oder als Download im Onlineshop bezogen werden und sind so für jeden zugänglich. Um die Arbeit an neuen Richtlinien finanzieren zu können, sind alle Ausgaben kostenpflichtig. Es gibt jedoch die Möglichkeit der kostenlosen Einsichtnahme an öffentlichen Auslegestellen. Diese befinden sich sowohl im Inland als auch im Ausland und sind meist in Universitätsbibliotheken zu finden. Auf Grund der Kostenpflichtigkeit ist es nicht gestattet, komplette Auszüge aus den Richtlinien zu zitieren. Die folgenden Erläuterungen zu einzelnen Vorgehensweisen sind daher nur oberflächlich beschrieben. (29)

Die vom Verein Deutscher Ingenieure und dem Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik im Januar 2011 herausgegebene Richtlinie VDI/VDE 2617 Blatt 10 stellt die Grundlage zur Prüfung der Lasertracker dar und ist somit die Basis der Masterarbeit. Die Richtlinie beschreibt Genauigkeitskenngrößen und Prüfverfahren von Koordinatenmessgeräten und setzt sich aus einzelnen Blättern zusammen. Dazu gehören neben dem Blatt 10 *Annahme- und Bestätigungsprüfung von Lasertrackern* z.B. auch Blatt 5 *Überwachung durch Prüfkörper* und Blatt 3 *Komponenten der Messabweichung des Gerätes*. Blatt 10 beschreibt, neben Zweck und Geltungsbereich, die Vorgehensweise der Annahmeprüfung und Überwachung von Lasertrackern. Mit der Annahmeprüfung soll festgestellt werden, ob die vom Hersteller angegebenen Spezifikationen bezüglich der

Antast- und Längenmessabweichung eingehalten werden. Bei der Überwachung hingegen wird geprüft, ob die vom Anwender selbst definierten Grenzwerte zur Überprüfung nicht überschritten werden. (31) An diesem Punkt setzt die Masterarbeit an. Durch die Bestimmung der Längenmessabweichung, die ca. alle 6 Monate durchgeführt werden soll, erfolgt eine Überprüfung, sodass die für das Qualitätsmanagement geforderte Prüfmittelüberwachung eingehalten wird.

#### **4.1 Kenngrößen**

Die in der Richtlinie angeführten Kenngrößen zur Beschreibung der Genauigkeit eines Lasertrackers sind die bereits erwähnte Antastabweichung und Längenmessabweichung, die wie folgt definiert sind.

Die *Antastabweichung* unterteilt sich in die Antastabweichung Form (PF), Maß (PS) und Ort (PL) und beschreibt das Abweichungsverhalten in einem sehr kleinen Teilbereich des Messvolumens. Die Überprüfung der Form- und Maßabweichung sind stets zu bestimmen. Die Antastabweichung Ort hingegen muss nur ermittelt werden, wenn im normalen Messbetrieb verschiedene Reflektoren bzw. Taster verwendet werden. (31)

Die *Längenmessabweichung* beschreibt, das durch Überlagerung verschiedener Einzelabweichungen entstehende dreidimensionale Abweichungsverhalten in einem spezifizierten Messvolumen. Mögliche auftretende Abweichungen sind z.B. systematische Abweichungen im Längenmesssystem und den Winkelencodern, zufällige Messabweichungen sowie die geometrische Unvollkommenheit der Dreh- und Schwenkachsen oder des Reflektors/Tasters. (31)

#### **4.2 Bestimmung der Antastabweichung**

In der VDI/VDE Richtlinie wird zur Bestimmung der Antastabweichung zum einen auf die Durchführung und zum anderen auf die Auswertung der Messung eingegangen. Dabei werden Messanordnungen, Antastmuster und Antaststrategien vorgeschlagen. Ebenfalls beschrieben werden mögliche Prüfkörper. Eine streng bindende Vorschrift zur Durchführung wird jedoch nicht gegeben, denn es wird stets darauf verwiesen, dass andere Strategien und Prüfkörper anzuwenden sind. Für die Auswertung und Beurteilung der Messung stellt die Richtlinie Formeln sowie Bewertungskriterien vor. Die Umsetzung der in der Richtlinie vorgeschlagenen Durchführung wird im Kapitel 7 genauer erläutert.

### 4.3 Bestimmung der Längenmessabweichung

Auch im Kapitel Längenmessabweichung der VDI/VDE Richtlinie 2617 Blatt 10 werden zunächst die Prüfmittel vorgestellt, die zur Bestimmung herangezogen werden können. Dazu werden diese kurz definiert und anschließend werden Hinweise zu dessen Verwendung gegeben. Für die Durchführung werden auch hier mögliche Messaufbauten und –strategien vorgestellt, die je nach verwendetem Prüfmittel anders ausfallen können. Auch die beschriebene Auswertung unterscheidet sich je nach Prüfmittel, sodass jeweils unterschiedliche Formeln angeführt werden. Die Bewertung hingegen ist für alle Messstrategien gleich und wird ebenfalls erläutert. Bei der Bestimmung der Längenmessabweichung sind abweichende Messanordnungen ebenfalls erlaubt. Die für den konkreten Fall durchgeführte Bestimmung der Längenmessabweichung wird im Kapitel 7 dargelegt.

Die in der Richtlinie vorgestellten Verfahrensweisen sind sowohl auf die Annahmeprüfung als auch auf die Überwachung von Lasertrackern anzuwenden. Zur Überwachung kann jedoch der Messumfang reduziert werden. Zusätzlich zu diesen beiden Überprüfungen, die sehr zeitaufwendig sind und daher nicht im normalen Messbetrieb durchgeführt werden können, werden noch schnelle Zwischenprüfungen erläutert. Diese ermöglichen es den Lasertracker auch vor Ort mit wenig Zeitaufwand zu prüfen. Die Überwachung hingegen wird lediglich ein bis zwei Mal im Jahr durchgeführt und dient als Prüfmittelüberwachung im Zuge des Qualitätsmanagements.

## 5. Messmittel

Für die Messungen zur Bestimmung der geforderten Kenngrößen der VDI/VDE-Richtlinie werden verschiedene Instrumente und Hilfsmittel verwendet. Diese sollen im folgenden Kapitel kurz beschrieben werden.

### 5.1 Messsoftware Metrolog XG

Zur Steuerung des Lasertrackers ist eine Messsoftware unerlässlich, sodass diese fester Bestandteil eines jeden Lasertracker-Systems ist. Die für die Messung verwendete Software ist Metrolog XG von der Firma Metrologic Group GmbH. Metrolog ist eine objektbasierte 3D Kontroll-Software, die unter anderem zum Standard in der Automobil-, Luft- und Raumfahrtindustrie geworden ist. Durch über 50 Anschlüsse sowohl zu stationären, als auch mobilen Koordinatenmessgeräten ist die Software vielfältig einsetzbar. Auch Merkmale wie

- die freie Definition von verschiedenen Prismen,
- der automatisierte Ablauf von Programmen,
- verschiedene Farbdarstellungen und
- ein integrierter Bericht-Editor

haben dazu beigetragen, dass Metrolog mehr und mehr zum Einsatz kommt. (32)

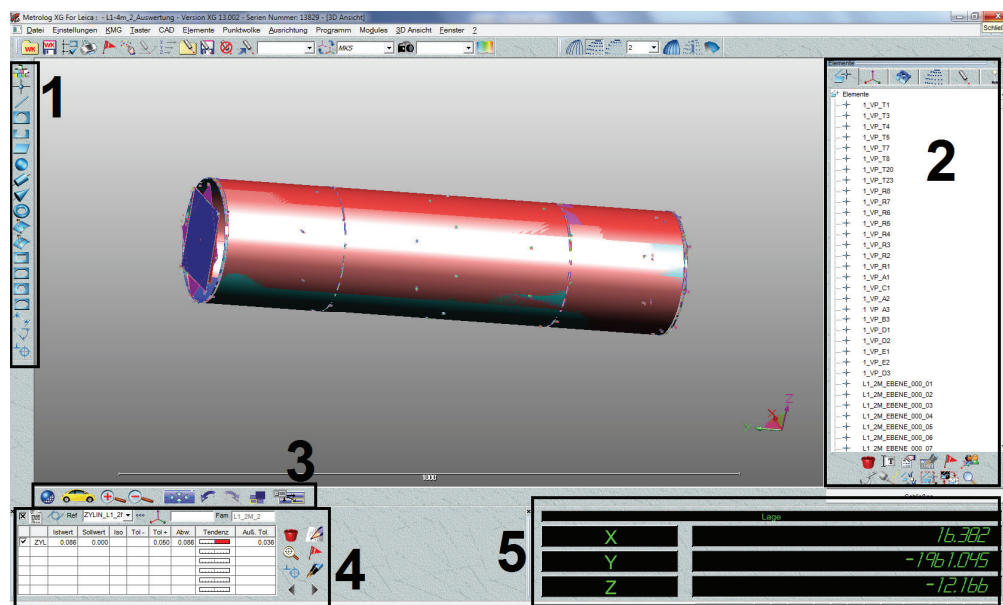


Abbildung 17: Aufbau Softwareoberfläche Metrolog

Der prinzipielle Aufbau der Softwareoberfläche sieht wie in Abbildung 17 dargestellt aus. Im mittleren Bereich werden die gemessenen und eingeladenen Messelemente visualisiert. Im Bereich 1 sind alle Elemente aufgeführt, die gemessen, konstruiert oder definiert werden können. Dazu gehören zum Beispiel Geometriepunkte, Ebenen, Zylinder oder auch Flächenpunkte. Die erzeugten Geometrien werden links im Fenster 2 angezeigt. Durch die Auswahl von Instrumenten aus dem Bereich 3 kann die Ansicht auf die Elemente verändert werden. Das Ergebnisfenster unten links zeigt für die ausgewählte Geometrie die Koordinaten, Abweichungen, Eigenschaften und Toleranzen an. Die aktuelle Position des Reflektors wird im Bereich 5 angezeigt.

## 5.2 Lasertracker

Zur Verifizierung der Wand werden die Längenmessabweichungen und Antastabweichungen verschiedener Lasertracker bestimmt. Zum Einsatz kommen der Leica AT 901, FARO X v2 und der FARO Xi. Die Wahl ist auf diese drei Instrumente gefallen, um einen guten Gesamteindruck der in der Firma verwendeten Lasertracker herzustellen. Zusätzlich dazu müssen mindestens zwei Geräte in der Lage sein, interferometrische Strecken zu messen. Das ist daher so wichtig, da die später zu bestimmenden Referenzlängen von einem unabhängigen Lasertracker interferometrisch bestimmt werden müssen. Dies erfolgt mit dem Leica AT901 oder dem FARO Xi.

### 5.2.1 Leica Absolute Tracker AT901 LR

Der Leica Absolute Tracker AT901 (Abbildung 18) ist in drei Ausführungen erhältlich, die sich hinsichtlich ihrer Reichweite und der Kompatibilität mit den T-Produkten unterscheiden (Tabelle 5).

Modell	AT901 B (Basis)	AT901 MR (Mid Range)	AT901 LR (Long Range)
Absolutinterferometer	ja	ja	Ja
Typisches Messvolumen	160 m	50 m	160 m
Kompatibel mit T-Produkten	nein	ja	Ja
Max. Messvolumen mit T-Produkten	-	18 m	30 m

Tabelle 5: Übersicht Leica AT901 Modelle (33)

Bei der Messung an der Testwand wird ein Leica AT901 LR verwendet, der mit einer Reichweite von 160 m vor allem für großvolumige Anwendungen geeignet ist. Besonders hilfreich bei Messungen über lange Distanzen ist die PowerLock Funktion. Durch diese hat

der Lasertracker die Möglichkeit ein Ziel zu identifizieren, sobald es sich innerhalb des Sensorsichtfeldes befindet. Nach einer Laserstrahlunterbrechung ist es somit nicht mehr notwendig mit dem Reflektor den Strahl wieder einzufangen, denn der Strahl findet den Reflektor selbst. Zusätzlich ist der AT901 mit dem in Abschnitt 3.3 erwähnten Absolutinterferometer ausgestattet. Weitere von Leica angeführte Eigenschaften des Trackers sind

- robustes und leichtes Design,
- geringe Abmessungen,
- 6 Freiheitsgrade Lösung,
- geringer Strahldurchmesser und
- Mehrzweckhalterung.



**Abbildung 18: Leica Absolute Tracker AT901 LR**

Die Messunsicherheit einer Koordinate im gesamten Messvolumen wird für 360° horizontal und 45° vertikal mit  $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$  angegeben. (33)

### **5.2.2 Leica Absolut Tracker AT401**

Der Leica AT401 (Abbildung 19) ist ein All-in-one-System, dass von außen einem Tachymeter sehr ähnelt. Der Tracker zeichnet sich besonders durch seine geringe Größe und Gewicht und somit durch eine hohe Mobilität aus. Darüber hinaus ist das Gehäuse komplett abgedichtet, sodass der Lasertracker auch in schwierigen Umgebungsbedingungen eingesetzt werden kann. Ebenfalls zu den positiven Eigenschaften gehört der kabellose Betrieb. Durch die im Sensor und im Controller befindlichen Batterien ist eine Messung über den ganzen Arbeitstag möglich. Das

Messvolumen des AT401 ist mit 360° horizontal, 290° vertikal und einem Radialvolumen von 320 m besonders groß. Zu den eben genannten Eigenschaften, verfügt der Tracker auch über die PowerLock Funktion.



Abbildung 19: Leica Absolute Tracker AT401

Die Messunsicherheit einer Koordinate im gesamten Messvolumen für 360° horizontal und 45° vertikal wird mit  $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$  angegeben. (34)

### 5.2.3 FARO Laser Tracker Xi / X v2

Der FARO Laser Tracker Xi (Abbildung 20) hat mit 70 m im Vergleich zu den Leica Absolute Trackern einen wesentlich kleineren Messbereich. Ausgestattet ist der Tracker mit einem Interferometer und einem XtremADM, welches die 3D Position des Reflektors in Echtzeit darstellt. Zusätzlich ist in dem Lasertracker eine Wetterstation integriert, die es ermöglicht Umwelteinflüsse automatisch zu kompensieren. Weitere automatisierte Kompensationsprozesse, die von der SelfComp durchgeführt werden, sorgen für ein sofortiges Messen mit hohen Genauigkeiten.



Abbildung 20: FARO Laser Tracker Xi



Abbildung 21: FARO Laser Tracker X v2



Die Messgenauigkeit des FARO Laser Trackers Xi wird für interferometrische Messungen mit  $\pm 2 \mu\text{m} + 0,4 \mu\text{m/m}$  angegeben. (35)

Der FARO X v2 (Abbildung 21) hat im Wesentlichen die gleichen Eigenschaften wie der Xi, hat jedoch nicht die Fähigkeit rein interferometrisch zu messen. Die Messgenauigkeit liegt bei  $\pm 18 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m/m}$ . (32)

### 5.3 Reflektoren

Je nachdem, ob ein Leica oder ein FARO Lasertracker verwendet wird, kommen auch entweder Leica oder FARO Reflektoren (Abbildung 22, Abbildung 23) zum Einsatz. Denn die vom Hersteller angegebenen Genauigkeiten werden ebenfalls unter Verwendung der firmeneigenen Messkugeln bestimmt. Diese sind in den Größen 1,5“ oder 0,5“ erhältlich. Für die Messung an der Testwand kommen jedoch nur 1,5“ Kugeln zum Einsatz. Die Genauigkeit des Reflektors hat maßgeblichen Einfluss auf die Qualität der Messung, weshalb beide Hersteller präzise und robuste Reflektoren anbieten. Für die unterschiedlichen Reflektoren werden allgemein Spezifikationen wie Radius, Form und ADM Streckenoffset angegeben. Zusätzlich wird zu jedem Reflektor ein Kalibrierschein mitgeliefert.



Abbildung 22: FARO Reflektoren (37)



Abbildung 23: Leica Reflektoren (38)

### 5.4 AT MeteoStation

Bei interferometrischen Messungen in der Luft wird die Luftbrechzahl entlang des Strahlengangs benötigt, da die Wellenlänge je nach vorherrschenden atmosphärischen Bedingungen variiert. Für eine exakte Bestimmung der Entfernung muss die Länge jedoch genau bekannt sein. Zur Bestimmung der Brechzahl werden die Lufttemperatur, der Luftdruck und die relative Luftfeuchtigkeit erfasst. Mittels dieser Größen und der empirischen Formel nach Edlén kann die Luftbrechzahl berechnet werden. Lasertracker

führen die Brechzahlkompensation geräteintern durch, benötigen dafür aber eine angeschlossene Metrostation.

Das bei der Testwandmessung verwendete Messgerät ist die AT MetroStation von Leica Geosystems (Abbildung 24). Dieses wird während der gesamten Messung mit dem Lasertracker verbunden und kann somit kontinuierlich die atmosphärischen Daten übertragen. Die AT MetroStation ist in der Lage den Luftdruck mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  hPa, die Temperatur mit  $\pm 0,3^\circ\text{C}$  und die Luftfeuchtigkeit mit  $\pm 5\%$  zu messen. (39) Beim FARO Laser Tracker ist das Anschließen der Metrostation nicht notwendig, da dieser bereits über eine interne verfügt. Es muss lediglich der Temperaturfühler angeschlossen werden.



Abbildung 24: Leica AT MetroStation (38)

Die Tabelle 6 zeigt den Zusammenhang zwischen der Änderung der atmosphärischen Parametern und der Brechzahl. Dabei ist anzumerken, dass das Verhältnis Längen- und Brechzahländerung wie folgt aussieht. (40)

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta n}{n} \approx \Delta n \quad (5.1)$$

Einflussparameter	Änderung	Effekt
Temperatur	$\Delta t = +1^\circ\text{C}$	$\Delta n = -1 \cdot 10^{-6}$
Druck	$\Delta p = +1$ hPa	$\Delta n = +2,7 \cdot 10^{-7}$
Relative Feuchte	$\Delta RH = +1\%$	$\Delta n = +1 \cdot 10^{-8}$

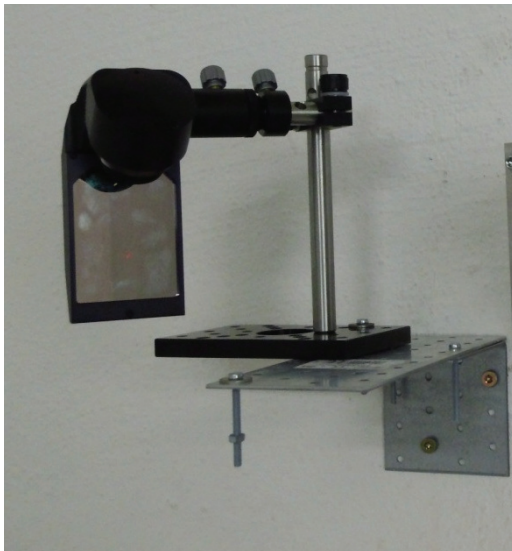
Tabelle 6: Einfluss der atmosphärischen Parameter auf die Brechzahl  $n$  (40)

## 5.5 Spiegelkonstruktion

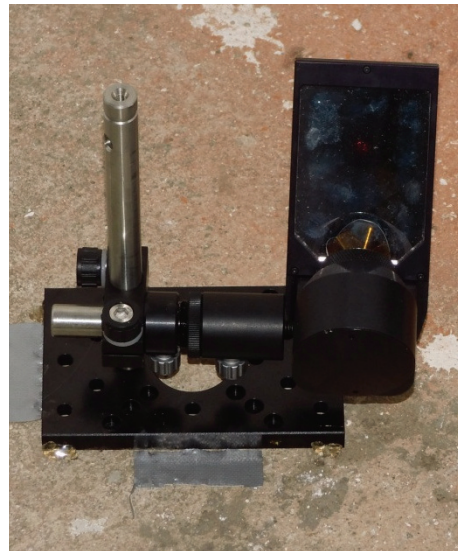
Der in Abbildung 25 und Abbildung 26 dargestellte Spiegel mit Halterung wird zur Bestimmung der Referenzlängen für die Längenmessabweichung eingesetzt und erfüllt den gleichen Zweck, wie das Spiegelwerkzeug von Leica Geosystems. Im Wesentlichen ist die

Spiegelkonstruktion so aufgebaut, dass der Spiegel sowohl in Längs- als auch in Querrichtung geneigt und in der Höhe verstellt werden kann. Das hat den Vorteil, dass nicht der Lasertracker exakt zur Messlinie ausgerichtet werden muss, sondern das Spiegelwerkzeug. Dadurch kann der Standpunkt des Trackers freier gewählt und an die vorherrschenden Messbedingungen angepasst werden. Zusätzlich wird so der Fehlereinfluss der Winkelmessung minimiert und die Genauigkeit gesteigert.

Zur Bestimmung der Strecke wird der vom Lasertracker kommende Laserstrahl über den ausgerichteten Spiegel auf den ersten Reflektor gelenkt. Wichtig ist dabei, dass der Strahl so umgelenkt wird, dass eine geradlinige Verbindung zwischen den beiden Reflektorpositionen entsteht. Durch das Bewegen des Reflektors von einer Position zur anderen erfolgt eine interferometrische Streckenmessung, die eine zehnmal höhere Genauigkeit aufweist als die Messung ohne Spiegelspiegelkonstruktion. (41)



**Abbildung 25: Spiegelkonstruktion in der Frontansicht**



**Abbildung 26: Spiegelkonstruktion mit Verstellerschrauben für die Längs- und Querachse**

## 6. Testwand

Die Umsetzung der in der VDI/VDE 2617 Blatt 10 beschriebenen Referenzwand soll in den Räumlichkeiten der Firma umgesetzt werden. Zur besseren Vorstellung wird daher zunächst der gesamte Messaufbau, die idealen Bedingungen, dann die vorherrschenden Gegebenheiten und abschließend die Realisierung der Testwand vorgestellt. Darüber hinaus werden Testmessungen beschrieben und ausgewertet, die die Bedingungen dokumentieren.

### 6.1 Messaufbau

Wie im Kapitel 4.3 bereits erwähnt, beschreibt die VDI/VDE 2617 Blatt 10 unterschiedliche Messaufbauten. Dabei wird zwischen einem räumlichen und einem ebenen Aufbau unterschieden. Bei der ersten Variante wird dem Lasertracker ein Standpunkt zugewiesen und die Referenzlängen werden räumlich angeordnet, sodass ein dreidimensionaler Raum entsteht. Bei der zweiten Messanordnung werden alle Referenzlängen in einer Ebene realisiert und der Standpunkt des Lasertrackers wird während der Messung mehrfach gewechselt. Diese Art des Aufbaus erfolgt auch im Zuge der Masterarbeit, weshalb im Folgenden darauf genauer eingegangen wird.

Der Messaufbau an der Testwand gestaltet sich so, dass zwölf Reflektorhalter insgesamt fünf Messlinien bilden. Diese werden mit A, B, C, D und E bezeichnet. Die Linien A, B und C bestehen jeweils aus drei Messpunkten und die Messlinien D und E aus je vier. Insgesamt wird so ein Messvolumen von ca. 9 m x 3 m aufgespannt (Abbildung 27).

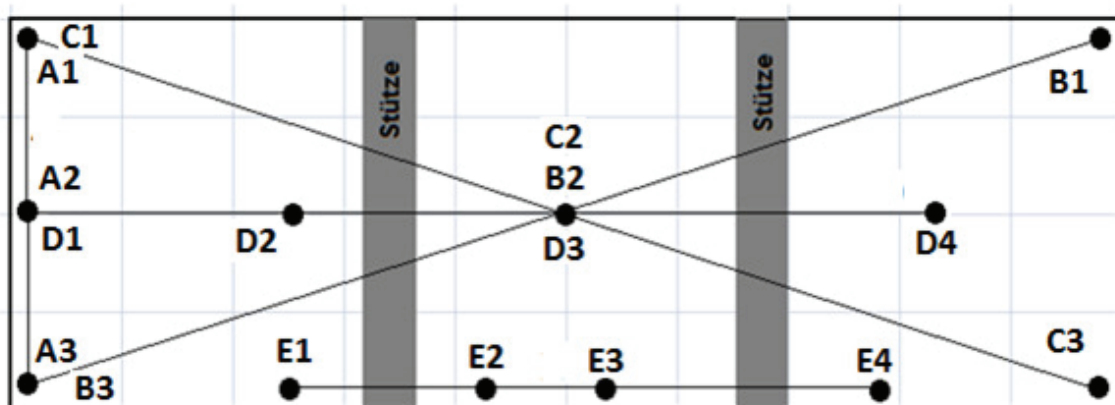


Abbildung 27: Testwand mit Wandpunkten und Messlinien

Wie bereits angedeutet, werden die dargestellten Punkte von unterschiedlichen Lasertrackerstandpunkten, insgesamt 7, aufgenommen (Abbildung 28). Zusätzlich dazu

erfolgt die Messung in drei Orientierungen, sodass die ebene Messanordnung mit der räumlichen Anordnung gleichwertig ist und somit auch die Messergebnisse. Damit bei der Durchführung der Prüfung keine Punktverwechselungen auftreten, werden sowohl die Wandpunkte, als auch die Standpunkte gekennzeichnet und beschriftet.

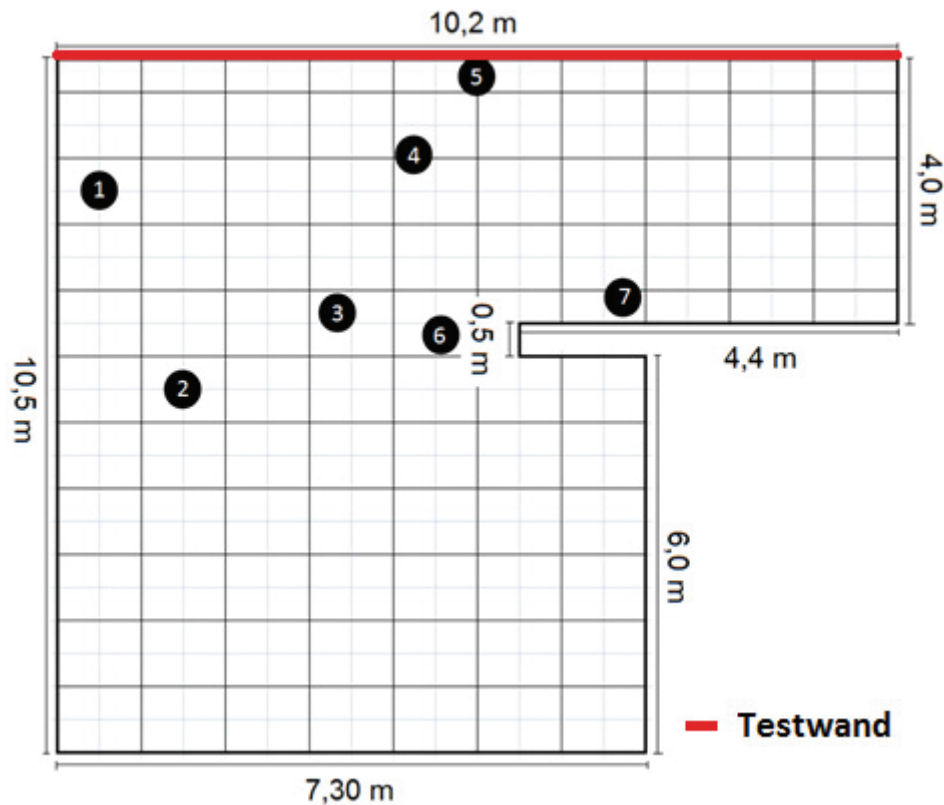


Abbildung 28: Übersicht Lasertrackerstandpunkte

Der hier dargestellte Messaufbau wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst, sodass bei der Realisierung einige Aspekte berücksichtigt werden müssen.

## 6.2 Idealbedingungen

Die besten Messergebnisse können unter Idealbedingungen erzielt werden, jedoch herrschen diese nur selten vor. Daher ist es zur Steigerung der Genauigkeit wichtig, die auftretenden Einflussfaktoren zu identifizieren und ggf. zu berücksichtigen. Diese Herangehensweise wird auch bei der Umsetzung des oben beschriebenen Messaufbaus angewandt. Bevor die konkrete Realisierung jedoch erläutert wird, werden zunächst die Idealbedingungen und Möglichkeiten zur Schaffung dieser dargelegt.

Ideal zur Prüfung des Lasertrackers ist ein Raum, in dem die Umgebungsbedingungen annähernd gleichbleibend sind. Grund dafür ist die in Kapitel 5.4 beschriebene Abhängigkeit von den atmosphärischen Parametern, sowie der Einfluss auf die Maßverkörperungen. Zur Realisierung von gleichbleibenden Bedingungen ist es möglich den Messraum zu klimatisieren, sodass die Temperatur, der Luftdruck und die Luftfeuchtigkeit stabil sind. Zu beachten ist jedoch, dass keine Luftströme auftreten. Diese könnten sich ebenfalls nachteilig auf das Messergebnis auswirken. Darüber hinaus sind auch direkte Sonneneinstrahlungen oder andere Wärmequellen im direkten Instrumentenumfeld kritisch zu sehen und daher zu vermeiden.

Ebenso wichtig wie die atmosphärischen Bedingungen im Raum sind auch die bautechnischen Voraussetzungen. Dazu gehört z.B., dass der Boden schwingungsfrei ist. Das bedeutet, dass der Lasertrackerstandpunkt stabil bleibt, auch wenn während der Messung Personen durch den Raum gehen. Idealerweise sollte der Messraum daher im Keller oder im Erdgeschoss liegen. Zusätzlich sollte der Bodenbelag so gewählt sein, dass das Eigengewicht des Trackers kein Einsinken verursacht. Sehr weiche Böden, wie z.B. PVC sind daher nicht geeignet. Für einen sicheren Stand des Instrumentes sollte der Boden des Weiteren frei von groben Verschmutzungen und Unebenheiten sein, sodass keine Kippbewegungen entstehen können. Neben den Voraussetzungen für den Boden sind auch einige für die Testwand anzuführen. Die Referenzwand sollte so aufgebaut sein, dass sie spannungsfrei und temperaturstabil ist. Dies hätte den Vorteil, dass die Referenzlängen zwischen den Punkten nur turnusmäßig überprüft werden müssten und nicht vor und nach jeder Messung. Darüber hinaus wäre eine Entkopplung von der Außenwand sinnvoll, um Bewegungen der Wand durch äußere Einflüsse zu verhindern. Bei einer neu errichteten Testwand sollte diese zunächst die Möglichkeit haben sich zu setzen und zu entspannen, sodass sie für die Messungen später möglichst bewegungsfrei ist.

### **6.3 Gegebenheiten der Testwand**

Die eben beschriebenen Bedingungen lassen sich im Zuge der Masterarbeit nur bedingt umsetzen, da die Testwand in einer Messhalle eingerichtet wird. Diese ist Bestandteil eines größeren Bauobjektes (Abbildung 29) und hat einen Grundriss wie in Abbildung 30 dargestellt.



Abbildung 29: Gesamtgebäude mit Messhalle

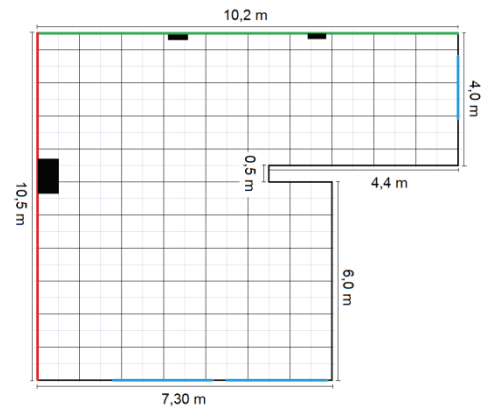


Abbildung 30: Schematischer Grundriss  
Messhalle

Die rot und grün dargestellten Wände sind keine gerade durchgehenden ebenen Flächen, sondern sind durch Stützen (schwarz gekennzeichnet) unterbrochen. Das rote Mauerwerk hat an einer Stelle einen Vorsprung von ca. 0,45 m und das Grüne an zwei Stellen einen Vorsprung von ca. 0,13 m. Die Absätze befinden sich an beiden Wänden mitten im Messvolumen und müssen daher in der Realisierung berücksichtigt werden. Die Voraussetzungen des Bodens sind im Vergleich zur Wand wesentlich besser, da die Messhalle ebenerdig liegt und der Betonboden eine feste Unterlage für den Lasertracker bildet. Lediglich kleinere Unebenheiten müssen beim Aufbau des Trackers berücksichtigt werden, sodass ein sicherer Stand gewährleistet ist. Um sicher zu stellen, dass der Messhallenboden nicht schwingt und somit keinen negativen Einfluss auf die Messung nimmt, wird eine Testmessung durchgeführt. Diese wird im Kapitel 6.3.2 erläutert und ausgewertet.

Eine Klimatisierung der Messhalle ist nicht möglich, da weder eine Klimaanlage noch eine Heizung vorhanden sind. Das bedeutet, dass die Umgebungsbedingungen nicht über sehr lange Zeiträume konstant gehalten werden können. Positiv ist jedoch, dass die Halle nach Norden ausgerichtet ist und so keine direkte Sonneneinstrahlung auftritt. Eine starke Erwärmung im Bereich der Testwand ist somit nicht zu erwarten, sodass die Temperatur für den Zeitraum der Überprüfung relativ stabil sein sollte. Zur Überprüfung dessen wird eine Temperaturmessung durchgeführt, die im Kapitel 6.3.1 erläutert und ausgewertet wird.

Ebenfalls ungünstig für die Messung sind die in der Messhalle vorhandenen zwei Tore und die Fensterfront (im Grundriss blau dargestellt), da diese zum Teil nicht fest verschließbar

sind. Aus diesem Grund kann es bei der Überprüfung zu Zugluft kommen, die wiederum Einfluss auf die atmosphärischen Parameter nehmen kann. Damit die Störungen gering sind, sollten während der Messung alle Tore und Fenster geschlossen gehalten werden. Neben Zugluft kann so auch eine plötzliche Temperaturänderung vermieden werden, da keine warme bzw. kalte Luft von außen herein strömen kann.

Die folgenden Abbildungen visualisieren noch einmal die Gesamtsituation in der Messhalle.



**Abbildung 31: Messhalleneingang**



**Abbildung 32: Rot markierte Wand**



**Abbildung 33: Grün markierte Wand**



**Abbildung 34: Grün markierte Wand und  
zweites Tor**

### **6.3.1 Testmessung Temperatur**

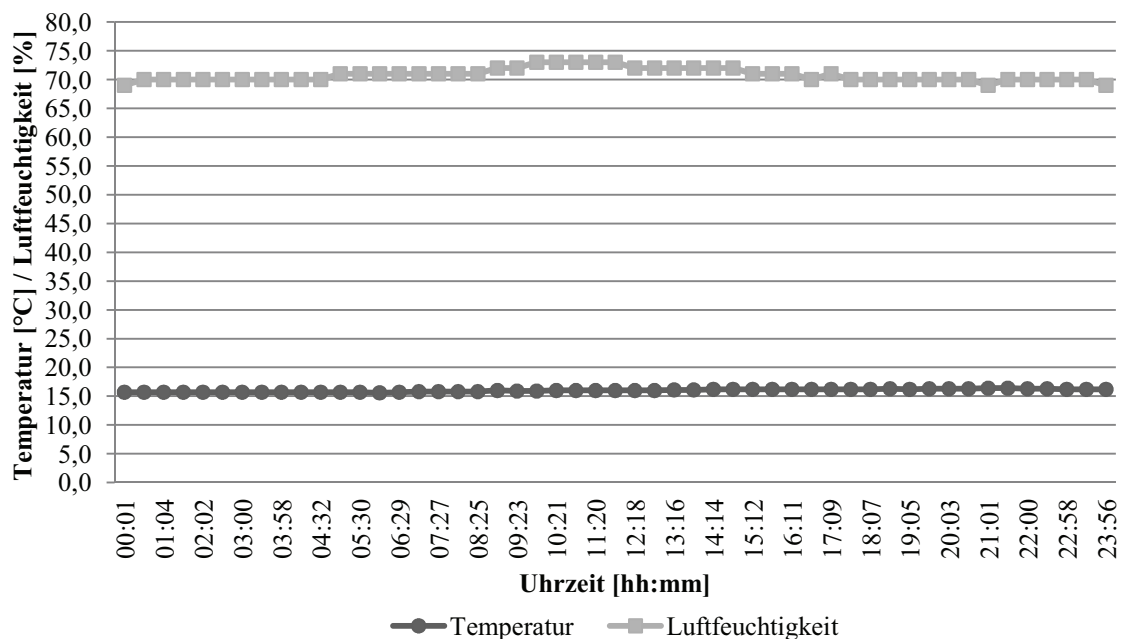
Zur Bestimmung der atmosphärischen Bedingungen in der Messhalle, vor allem aber an der Testwand, wird, wie im letzten Teilkapitel erwähnt, eine 72 Stunden Testmessung durchgeführt. Diese wird mittels eines TFD 128 Temperatur Feuchte Datenlogger von CONRAD durchgeführt, der die Innentemperatur mit einer Auflösung von  $0,1^{\circ}\text{C}$  und die Innenluftfeuchte mit 1% aufzeichnet. Die Ansteuerung des Sensors erfolgt über eine dazugehörige Software, mit der der Speicherort der Daten, sowie das Messintervall von einer oder fünf Minuten festgelegt werden kann. Zusätzlich dazu können die aufgezeichneten Daten mit der Software grafisch oder tabellarisch dargestellt werden. Für die Durchführung der Testmessung wird der Datenlogger mittels USB-Kabel an einem



Laptop angeschlossen, um so das Messintervall auf fünf Minuten zu stellen und die Messung zu starten. Anschließend wird der Sensor vom USB-Kabel getrennt und mittig an der Wand angebracht. Die Aufzeichnung der Daten erfolgt dann über ca. 72 Stunden. Nach Beendigung der Messung können die gespeicherten Werte mit Hilfe der Software ausgeladen und in Excel ausgewertet werden.

Die Auswertung der Daten erfolgt zum einen über den gesamten Messzeitraum und zum anderen werden einzelne Tage betrachtet. Das Diagramm 2 zeigt die Temperatur- und die Luftfeuchtigkeitsverteilung für den 08.06.2012. Dabei wurden jedoch nur Messwerte in einem Abstand von ca. 30 Minuten verwendet, um die Darstellung übersichtlicher zu gestalten. Trotzdem wird ersichtlich, dass sowohl die Feuchtigkeit als auch die Temperatur nur geringe Veränderungen aufweisen. Durch die Abweichungen von 4 % und 0,8 °C sind starke Änderungen in der Lage der Wandpunkte nicht zu erwarten, sodass die Referenzlängen über die Zeit der Überprüfung des Lasertrackers stabil sein sollten.

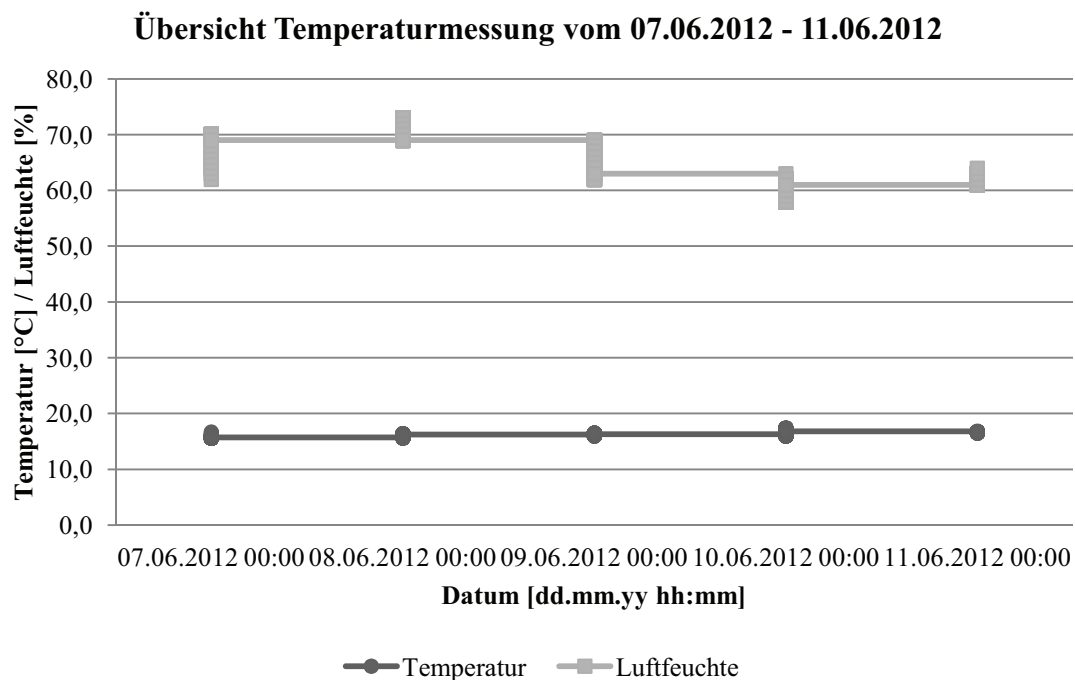
**Auswertung Temperaturmessung vom 08.06.2012**



**Diagramm 1: Auswertung Temperaturmessung vom 08.06.2012**

Auch bei der Betrachtung der Messwerte über das gesamte Messintervall (Diagramm 2) wird ersichtlich, dass die Schwankungen für einen solchen Zeitraum nur geringfügig sind. Die niedrigste gemessene Temperatur liegt bei 15,6 °C und die Größte bei 17,4 °C, sodass

insgesamt der maximale Temperaturunterschied bei 2,2 °C liegt. Die äußeren Bedingungen während der Aufzeichnung der Daten waren wechselhaft, sodass die Außentemperaturen schwankten. Die Nachttemperaturen lagen bei ca. 10 °C und die Tagestemperaturen bei ca. 18 °C bis 20 °C. Trotz der größeren Temperaturunterschiede im Außenbereich hat sich die Temperatur in der Messhalle relativ konstant gehalten, sodass daraus ebenfalls auf konstante Bedingungen für die Prüfung des Lasertrackers geschlossen werden kann.



**Diagramm 2: Auswertung Temperaturmessung vom 07.06.2012 - 11.06.2012**

### 6.3.2 Testmessung Boden

Zur Feststellung der Schwingungsfreiheit des Bodens wird ein Lasertracker nacheinander auf drei der sieben Standpunkte der Testwandmessung aufgebaut und jeweils eine kontinuierliche Messung durchgeführt. Um Bewegungen des Bodens durch Belastung im direkten Standpunktumfeld feststellen zu können, wird das Messintervall auf 300 ms herunter gesetzt. Im Anschluss erfolgt die Messung unter Belastung des Bodens. Das bedeutet, dass sich eine Person um den Lasertracker herum bewegt. Die aufgezeichneten Daten werden anschließend in einer txt-Datei exportiert und in Excel weiterverarbeitet. Zur Auswertung der Messung werden die maximalen Abweichungen der Messwerte bestimmt. Dafür wird der erste gemessene Punkt als Sollpunkt festgelegt und alle anderen mit diesem

verglichen. Die Ergebnisse dieser Bestimmung sind in Tabelle 7 für die Standpunkte LT 1, LT 3 und LT 5 zusammengefasst.

LT	max. Abweichung X [mm]	max. Abweichung Y [mm]	max. Abweichung Z [mm]
LT 1	0,07	-0,05	0,05
LT 3	0,01	0,05	-0,06
LT 5	0,02	-0,03	0,04

**Tabelle 7: Auswertung Bodenmessung**

Aus den auftretenden Veränderungen der Koordinaten kann abgeleitet werden, dass der Boden in der Messhalle kleinere Schwingungen aufweist. Diese liegen jedoch zum größten Teil weit über der einzuhaltenden Genauigkeit bei der Referenzlängenmessung. Dies wiederum bedeutet, vor allem für die Referenzlängenmessungen, dass während der Messung darauf geachtet werden sollte, dass nicht zu viel Bewegung im direkten Lasertrackerumfeld entsteht.

## **6.4 Realisierung der Testwand**

Nach Abschluss der Untersuchung und der Beurteilung der Gegebenheiten kann die Realisierung der Testwand unter Berücksichtigung der Erkenntnisse erfolgen.

### **6.4.1 Konstruktion der Wandhalterung**

Zur Montage der Wandpunkte ist eine relativ große Wandfläche notwendig, sodass von vorneherein nur die rot oder grün markierte Wand zur Umsetzung infrage kommt. Da die grüne Mauer eine komplett innen liegende Wand ist und somit nicht ganz so stark den äußeren Bedingungen unterliegt, bildet sie die Grundlage der Referenzwand. Idealerweise wäre die Wand so beschaffen, dass eine Sichtverbindung zwischen den Punkten mit dem Spiegeltool hergestellt werden kann. Diese ist jedoch durch die Stützen an der Wand nicht gegeben, sodass die einzelnen Messpunkte nach vorne versetzt werden müssen. Das Absetzen erfolgt über Wandhaltungen, die die Reflektorhalter tragen. Der schematische Aufbau der Halterungen ist in der (Abbildung 35). grafisch dargestellt. Grundgerüst der Konstruktion ist eine 3-mm-Stahlplatte, auf der der Reflektorhalter mittels einer Schraube montiert wird. Durch vier Stockschrauben mit einem Durchmesser von 8 mm und einer Länge von 200 mm kann die Grundplatte im entsprechend benötigten Abstand zur Wand befestigt werden. Zusätzlich können so auch Unebenheiten und Schrägen der Wand

ausgeglichen werden. Die Fixierung der Platte an den Stockschrauben erfolgt über Muttern, die sich einmal unterhalb und einmal oberhalb der Stahlplatte befinden.

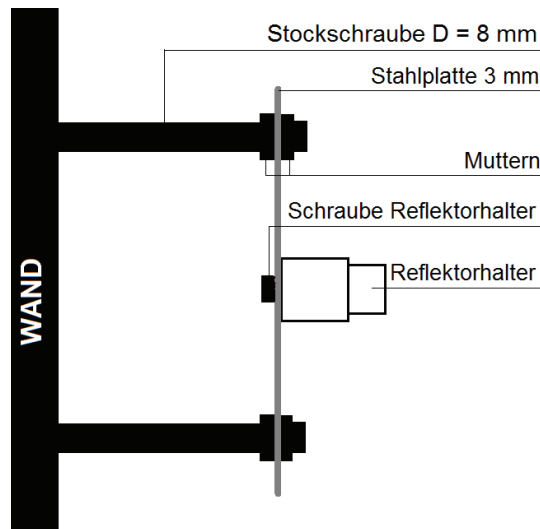


Abbildung 35: Seitenansicht der Wandhalterung

#### 6.4.2 Festlegung des Wandkoordinatensystems

Die Montage der Wandhalterung muss so erfolgen, dass im Anschluss mit dem Spiegeltool eine Sichtverbindung zwischen den einzelnen Punkten hergestellt werden kann. Dafür müssen zwei Bedingungen erfüllt sein. Zum einen müssen die Punkte auf einer Linie liegen, um eine Messlinie zu repräsentieren und zum anderen müssen sie in der gleichen Höhe angebracht werden. Unter Höhe ist in diesem Fall der mittlere Abstand zur Wand gemeint. Dieser kann von Punkt zu Punkt variieren, da die Referenzwand Unebenheiten und eine Schrägstellung aufweist. Zur Sicherstellung der ersten Bedingung werden alle Punkte zunächst mit einem Lasertracker abgesteckt. Zur Erleichterung der Absteckung wird das Maschinenkoordinatensystem so verschoben, dass es seinen Ursprung im Punkt A1 hat, die X-Achse in Richtung von B1 zeigt und die negative Z-Achse in Richtung A3 verläuft (Abbildung 36).

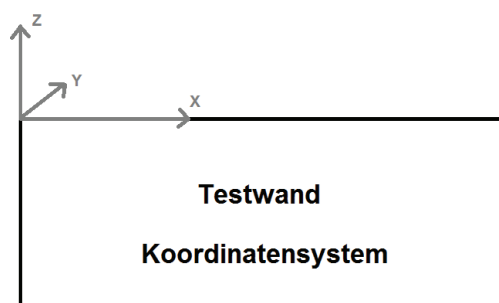


Abbildung 36: Koordinatensystem der Testwand

Dafür wird zuerst der Punkt A1 in der oberen linken Ecke der Wand festgelegt und anschließend mit dem Tracker gemessen. Dazu wird die Stahlplatte auf die Wand gedrückt und eine 0,5“ Messkugel in die mittlere Bohrung der Platte gehalten. Nach der Speicherung der Koordinate, wird der Reflektor herausgenommen und an der Stelle das Bohrloch mittels Bleistift nachgezeichnet. Im Anschluss wird ein Hilfspunkt PKT2 gemessen, der die gleiche Höhe wie der Punkt A1 hat. Dafür wird die Stahlplatte mit dem Reflektor so ausgerichtet, dass die Z-Koordinate den gleichen Wert hat, wie die des Punktes A1, aber auf der anderen Seite der Referenzwand liegt. Im nächsten Schritt wird mit dem Lasertracker eine Gravity Fläche gemessen. Diese richtet sich nach der Schwere aus und liegt somit horizontal. Dafür ist es jedoch notwendig, dass der Neigungssensor des Gerätes eingeschaltet ist. Mittels der gemessenen Hilfselemente, kann die Ausrichtung des Koordinatensystems erfolgen. Dazu wird zunächst eine Gerade GERD1 aus den Punkten A1 und PKT2 konstruiert und gespeichert. Anschließend erfolgt die geometrische Ausrichtung. Dafür wird festgelegt, dass die Z-Achse der Gravity Fläche, die X-Achse der Geraden GERD1 und der Koordinatenursprung dem Punkt A1 entspricht. Dieses Koordinatensystem wird anschließend aktiviert, so dass alle folgenden Punkte in diesem System gemessen werden. Nach der erfolgreichen Ausrichtung, können alle weiteren Punkte der Messlinie mittels den in Tabelle 8 aufgeführten Koordinaten abgesteckt werden.

Punkt	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
A1/C1	0,00	0,00	0,00
A2/D1	0,00	0,00	-1450,00
A3/B3	0,00	0,00	-2900,00
B1	9000,00	0,00	0,00
C3	9000,00	0,00	-2900,00
D2	2250,00	0,00	-1450,00
D4	7000,00	0,00	-1450,00
E1	2250,00	0,00	-2900,00
E2	3750,00	0,00	-2900,00
E3	5250,00	0,00	-2900,00
E4	6750,00	0,00	-2900,00
M	4500,00	0,00	-1450,00

**Tabelle 8: Koordinatenliste der Wandpunkte**

#### 6.4.3 Absteckung der Wandpunkte

Für die Absteckung müssen zunächst die oben angegebenen Koordinaten in die Messsoftware eingegeben und gespeichert werden. Dies erfolgt in Metrolog durch das Definieren von Geometriepunkten, denen dann Name, Familie und Koordinaten zugeordnet

werden können. Anschließend werden die erzeugten Punkte in die Messroutine *Aufbau/Kontrolle* eingeladen. Mittels dieser Routine können die Messpunkte zunächst abgesteckt und anschließend zur Kontrolle gleich noch einmal angemessen werden. Somit ist eine Dokumentation der Absteckung gewährleistet. Bei der Absteckung wird die Stahlplatte mit der 0,5“ Messkugel solange verschoben (Abbildung 37, Abbildung 38), bis die Abweichungen in der X-, und Z-Richtung kleiner gleich 0,25 mm sind. Die Y-Abweichung muss in diesem Fall nicht berücksichtigt werden, da bei der Absteckung zunächst nur die Lage auf der Wand, aber nicht der Abstand relevant ist. Während der Absteckung werden die aktuellen Abweichungen in allen drei Koordinatenrichtungen durch die Messsoftware kontinuierlich angegeben (Abbildung 39), sodass die Ausrichtung schnell erfolgen kann. Liegen die Abweichungen der beiden Komponenten innerhalb des Grenzwertes, erfolgt die Messung des Punktes. Anschließend wird der Punkt markiert, indem die Messkugel aus der Bohrung der Stahlplatte entnommen und das Bohrloch nachgezeichnet wird. Diese Vorgehensweise wird wiederholt, sodass alle Positionen der Reflektorhalter auf der Testwand markiert sind.



Abbildung 37: Absteckung der Wandpunkte



Abbildung 38: Detailansicht Absteckung



Abbildung 39: Anzeige der Absteckabweichung

Die abgesteckten und anschließend gemessenen Werte sind in der Tabelle 9 dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass die Punkte in der X- und Z-Achse durchschnittlich mit einer Genauigkeit von 0,10 mm abgesteckt sind, was wesentlich unterhalb der Genauigkeit für die Bohrungen (ca. 5 mm) liegt.

Nest	Sollwerte X [mm]	Sollwerte Y [mm]	Sollwerte Z [mm]	Istwerte X [mm]	Istwerte Y [mm]	Istwerte Z [mm]	Abw. X [mm]	Abw. Y [mm]	Abw. Z [mm]
A1	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-
A2	0,00	0,00	-1450,00	-0,13	1,71	-1449,83	0,13	-1,71	-0,17
A3	0,00	0,00	-2900,00	-0,08	5,64	-2900,12	0,08	-5,64	0,12
B1	9000,00	0,00	0,00	8999,93	-12,60	0,01	0,07	12,60	-0,01
C3	9000,00	0,00	-2900,00	8999,87	-15,67	-2900,03	0,13	15,67	0,03
D2	2250,00	0,00	-1450,00	2250,12	1,21	-1450,07	-0,12	-1,21	0,07
D4	7000,00	0,00	-1450,00	7000,13	-9,19	-1449,85	-0,13	9,19	-0,15
E1	2250,00	0,00	-2900,00	2249,94	7,09	-2900,03	0,06	-7,09	0,03
E2	3750,00	0,00	-2900,00	3750,03	1,24	-2899,92	-0,03	-1,24	-0,08
E3	5250,00	0,00	-2900,00	5250,01	1,50	-2900,23	-0,01	-1,50	0,23
E4	6750,00	0,00	-2900,00	6750,13	-8,66	-2899,84	-0,13	8,66	-0,16
M	4500,00	0,00	-1450,00	4499,77	3,22	-1449,96	0,23	-3,22	-0,04
<b>min. Abweichung</b>							-0,01	-1,21	-0,01
<b>max. Abweichung</b>							0,23	15,67	0,23
<b>absolute mittlere Abweichung</b>							0,10	6,16	0,10

Tabelle 9: Ergebnisse der Absteckung

#### 6.4.4 Montage und Ausrichtung der Wandhalterungen

Für die weitere Montage der Wandhalterungen müssen im nächsten Schritt die Bohrlöcher für die Verankerung in der Wand angezeichnet werden. Dafür wird die mittlere Bohrung der Stahlplatte so genau wie möglich auf die zuvor bei der Absteckung entstanden Markierungen aufgelegt und die vier weiteren Bohrlöcher angezeichnet. Die Abweichungen, die durch das erneute Anlegen der Platte entstehen, können vernachlässigt werden, da das Bohren der Löcher in die Wand nur mit einer begrenzten Genauigkeit erfolgen kann. Nach dem Anzeichnen erfolgt die Bohrung und die Dübel werden in die Wand eingeschlagen. Als nächstes werden die Stockschrauben eingeschraubt. Problem dabei ist, dass durch die Länge der Schrauben und die Tatsache, dass ein Bohrloch nicht exakt an der angezeichneten Stelle und nicht senkrecht zur Wand gesetzt werden kann, dazu führt, dass die Platten nicht mehr auf die Stockschrauben zu schieben sind. Daher müssen die Schrauben so lange in die richtige Position gedrückt werden, bis die Stahlplatte relativ spannungsfrei befestigt werden kann. Durch das Biegen der Stockschrauben verändert sich jedoch insgesamt die Lage der Platten und damit auch die zuvor abgesteckte mittlere Bohrung. Dies kann jedoch zu einem späteren Zeitpunkt durch das Ausrichten der Stahlplatten mit den Muttern kompensiert werden.

Ebenfalls problematisch ist die Instabilität der Stockschrauben in der Wand und in den Dübeln, da die Ziegelsteine der Mauer sehr porös und die Dübel etwas elastisch sind. Dies führt dazu, dass sich die Lage der Stahlplatte beim Einlegen der Messkugel in den magnetischen Reflektorhalter immer wieder verändern würde, sodass die später

zumessenden Strecken nicht reproduzierbar wären. Als Gegenmaßnahme werden daher größere Unterlegscheiben, sowie Aluminiumrohre über die Stockschrauben geschoben und mit Muttern fest angezogen. Dies bewirkt, dass die gesamte Konstruktion der Wandhalterung wesentlich stabiler wird (Abbildung 40, Abbildung 41). Anschließend können dann auch schon die Platten mit dem darauf angeschraubten Reflektorhaltern auf die Stockschrauben geschoben und vorläufig befestigt werden.



**Abbildung 40: Wandhalterung am Messpunkt M**



**Abbildung 41: Wandhalterung von der Seite**

Zur Kontrolle der Stabilität der Konstruktion erfolgt eine Testmessung, bei der ein Reflektor immer wieder in das Nest gelegt und im Anschluss angemessen wird. Der erste gemessene Punkt PKT1 dient dabei als Referenz, mit dem dann alle weiteren Koordinaten verglichen werden. Aus der Tabelle 10 geht hervor, dass die Abweichungen in X und Y bei ein bis zwei Zehntel Millimeter liegen und somit klein sind. Die Schwankungen in der Z-Koordinate hingegen sind größer und liegen bei ca. 0,3 mm. Die detektierten Abweichungen in den drei Richtungen sind insgesamt jedoch als akzeptabel einzustufen. Trotzdem sollte beim Einlegen darauf geachtet werden, dass nicht zu starke Schwingungen auftreten. Eine abschließende Einschätzung der Stabilität der Konstruktion ist erst bei den Messungen zur Verifizierung der Testwand möglich. Dort wird sich bei der Referenzlängenmessung herausstellen, wie reproduzierbar die Solllängen über den Messzeitraum hinweg sind.



Pkt.	Sollwerte X [mm]	Sollwerte Y [mm]	Sollwerte Z [mm]	Istwerte X [mm]	Istwerte Y [mm]	Istwerte Z [mm]	Abw. X [mm]	Abw. Y [mm]	Abw. Z [mm]
1	2656,041	3927,523	137,538	-	-	-	-	-	-
2	2656,041	3927,523	137,538	2656,038	3927,524	137,539	-0,003	0,001	0,001
3	2656,041	3927,523	137,538	2656,037	3927,525	137,543	-0,004	0,002	0,005
4	2656,041	3927,523	137,538	2656,04	3927,523	137,545	-0,001	0,000	0,007
5	2656,041	3927,523	137,538	2656,042	3927,522	137,549	0,001	-0,001	0,011
6	2656,041	3927,523	137,538	2656,046	3927,523	137,58	0,005	0,000	0,042
7	2656,041	3927,523	137,538	2656,048	3927,522	137,584	0,007	-0,001	0,046
8	2656,041	3927,523	137,538	2656,057	3927,518	137,587	0,016	-0,005	0,049
9	2656,041	3927,523	137,538	2656,035	3927,525	137,586	-0,006	0,002	0,048
10	2656,041	3927,523	137,538	2656,044	3927,517	137,587	0,003	-0,006	0,049
11	2656,041	3927,523	137,538	2656,038	3927,526	137,58	-0,003	0,003	0,042
12	2656,041	3927,523	137,538	2656,032	3927,525	137,587	-0,009	0,002	0,049
13	2656,041	3927,523	137,538	2656,048	3927,519	137,582	0,007	-0,004	0,044
<b>min. Abweichung</b>							0,001	0,000	0,001
<b>max. Abweichung</b>							0,016	-0,006	0,049
<b>absolute mittlere Abweichung</b>							0,005	0,002	0,033

Tabelle 10: Testmessung der Stabilität der Wandhalterung

Nachdem die Stabilität der Wandkonstruktion überprüft ist, kann mit der Ausrichtung der Stahlplatten und der Reflektorhalter begonnen werden. Dies erfolgt so, dass die in Kapitel 6.4.2 genannten Bedingungen erfüllt sind. Für die Ausrichtung wird zunächst ein Lasertracker, in diesem Fall der Leica AT401, aufgebaut und initialisiert. Anschließend muss der Tracker dann in das Wandkoordinatensystem eingemessen werden, welches diesmal jedoch etwas anders liegt als bei der Absteckung. Als Koordinatenursprung wird der Punkt M festgelegt und dementsprechend bereits festverschraubt. Im nächsten Schritt wird eine Ebene über alle Stahlplatten, die mittig im Einstellbereich der Stockschrauben liegen, gemessen. Dadurch wird erreicht, dass das Koordinatensystem später parallel zur Wand ausgerichtet ist und somit das Einstellen der Platten vereinfacht wird. Um das Koordinatensystem vollständig definieren zu können bedarf es einer zweiten Achsrichtung. In diesem Fall ist die Z-Achse, die aber nicht explizit gemessen werden muss, da der Leica AT401 immer horizontalisiert werden muss. Das hat zur Folge, dass die Z-Achse immer lotrecht steht und somit gleich zur Ausrichtung verwendet werden kann. Nachdem alle Hilfselemente gemessen sind, erfolgt die geometrische Ausrichtung. Dafür wird festgelegt, dass der Koordinatenursprung des Wandkoordinatensystems der Punkt M, die negative Y-Achse die Ebene und die Z-Achse die Z-Achse ist. Nach der Durchführung der

Ausrichtung ist das Koordinatensystem (Abbildung 42) definiert und kann auf den Lasertracker angewendet werden.

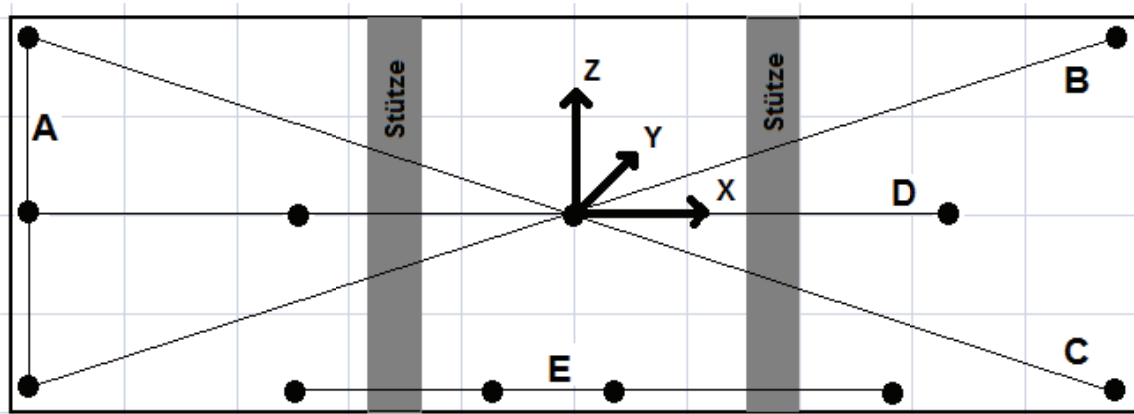


Abbildung 42: Koordinatensystem zur Ausrichtung der Stahlplatten

Durch die Verschiebung des Koordinatenursprungs in den Mittelpunkt verändern sich die Koordinaten der Wandpunkte. Die neuen Werte sind in der Tabelle 11 dargestellt.

Pkt.	Sollkoordinate		
	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
A1	-4500,00	0,00	1450,00
A2	-4500,00	0,00	0,00
A3	-4500,00	0,00	-1450,00
B1	4500,00	0,00	1450,00
C3	4500,00	0,00	-1450,00
D2	-2250,00	0,00	0,00
D4	2500,00	0,00	0,00
E1	-2250,00	0,00	-1450,00
E2	-750,00	0,00	-1450,00
E3	750,00	0,00	-1450,00
E4	2250,00	0,00	-1450,00
M	0,00	0,00	0,00

Tabelle 11: Koordinaten zur Ausrichtung der Stahlplatten

Im nächsten Schritt werden zusätzliche Nester (klebbare und magnetische Wandpunkte) in der Messhalle verteilt und an die Wand geklebt, sodass diese später für das erneute Einmessen in das Wandkoordinatensystem verwendet werden können. Dadurch ist das Koordinatensystem auch ohne die Wandpunkte der Referenzwand definiert, sodass die Einmessung in das System unabhängig von den Wandpunkten erfolgen kann. Dies ist notwendig, da die Punkte sich im Zuge der Ausrichtung der Stahlplatten verändern und das ursprüngliche Koordinatensystem ohne die zusätzlichen Punkte nicht mehr wiederhergestellt werden könnte. Ein Vergleich der Koordinaten von unterschiedlichen

Messaufstellungen wäre so dann nicht möglich. Damit die geklebten Nester zum Einmessen verwendet werden können, müssen sie alle einmal als Orientierungspunkte gemessen und gespeichert werden.

Nach der Fixierung des Koordinatensystems durch die Orientierungspunkte kann die Ausrichtung der Stahlplatten beginnen. Dafür wird die Messkugel in den Reflektorhalter des auszurichtenden Punktes gelegt und angezielt. Die Messsoftware zeigt dann online die aktuelle Koordinate an. Für die Ausrichtung wird dann zunächst in etwa die Y-Koordinate eingestellt, dafür werden die Muttern parallel nach vorne oder nach hinten gedreht und somit die Platte verschoben. Hilfreich ist es ebenfalls, wenn die Stahlplatte zunächst senkrecht gestellt wird, sodass dann die Ausrichtung in der X- und Z-Achse einfacher wird. Dafür werden dann einzelnen Muttern vor und zurück gedreht, sodass eine Neigung oder Kippung der Platte in die gewünschte Position zustande kommt. Dadurch verändert sich die Y-Koordinate ebenfalls wieder, sodass iterativ immer wieder eine Annäherung an die Sollkoordinaten erfolgt muss. Der Grenzwert der Abweichung zum Sollwert wird bei dieser Ausrichtung auf ca. 0,5 mm festgelegt. Sind alle Wandpunkte ausgerichtet, erfolgt eine Messung zur Dokumentation. Gleichzeitig dienen diese Koordinaten auch als Nullmessung, sodass diese zur Überprüfung der Stabilität der Testwand herangezogen werden können. Die Abweichungen zu den Sollkoordinaten sind in der Tabelle 12 dargestellt.

Pkt.	Sollkoordinate			Abweichungen 06.06.2012		
	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
A2	-4500,00	0,00	0,00	-0,29	-0,43	-0,02
A3	-4500,00	0,00	-1450,00	-0,17	0,47	-0,56
B1	4500,00	0,00	1450,00	0,05	-0,10	-0,30
D2	-2250,00	0,00	0,00	0,35	0,32	0,01
D4	2500,00	0,00	0,00	0,22	0,23	-0,25
E1	-2250,00	0,00	-1450,00	-0,30	0,30	-0,10
E2	-750,00	0,00	-1450,00	0,01	0,23	-0,25
E3	750,00	0,00	-1450,00	0,01	-0,09	0,03
E4	2250,00	0,00	-1450,00	-0,55	0,41	0,27
M	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,01	0,05

**Tabelle 12: Istkoordinaten der Wandpunkte nach der Ausrichtung**

Die erste Prüfung der Stabilität der Punkte erfolgt bereits einen Tag später. Dafür wird der Lasertracker erneut aufgebaut, initialisiert und anschließend in das Wandkoordinatensystem über die Orientierungspunkte eingemessen. Danach werden alle Wandpunkte einmal angemessen und gespeichert, sodass sie anschließend mit den

Koordinaten vom Vortag verglichen werden können. Das Ergebnis ist in Tabelle 13 dargestellt.

Pkt.	Abweichungen zu Sollkoordinaten			Differenz 06.06.12 u. 07.06.12		
	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
A2	-0,32	-0,41	-0,18	-0,03	0,02	-0,16
A3	-0,18	0,45	-0,74	-0,01	-0,02	-0,18
B1	0,10	-0,11	-0,44	0,05	-0,01	-0,14
D2	0,35	0,35	-0,13	0,00	0,03	-0,14
D4	0,28	0,26	-0,40	0,06	0,03	-0,15
E1	-0,24	0,29	-0,25	0,06	-0,01	-0,15
E2	0,00	0,21	-0,38	-0,01	-0,02	-0,13
E3	0,02	-0,11	-0,07	0,01	-0,02	-0,10
E4	-0,58	0,40	0,12	-0,03	-0,01	-0,15
M	0,03	0,01	-0,03	0,04	0,00	-0,08

**Tabelle 13: Übersicht Kontrollmessungen vom 07.08.2012**

Daraus wird ersichtlich, dass die Abweichungen in der X- und Y-Komponente bei einigen hundertstel Millimeter liegen, die in der Z-Koordinate jedoch im zehntel Millimeterbereich. Dies kann zum einen durch Bewegung der Wandpunkte kommen, oder zum anderen durch das Absinken des Lasertrackers bei der ersten Messung. Zur Feststellung der Ursache wird daher eine weitere Kontrollmessung durchgeführt. Diese läuft wie die erste ab, nur das zusätzlich auch die Punkte A1 und C3 angemessen werden können. Dies war bei den Messungen zuvor noch nicht möglich, da die Stahlplatten auf Grund von fehlendem Material noch nicht angebracht werden konnten. Die Tabelle 14 beinhaltet zum einen die Abweichungen zu den Sollkoordinaten und zum anderen die Abweichungen zu den Koordinaten der ersten Kontrollmessung.

Pkt.	Abweichungen zu Sollkoordinaten			Differenz 07.06.12 u. 11.06.12		
	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
A2	-0,29	-0,39	-0,14	-0,03	-0,02	-0,04
A3	-0,11	0,51	-0,74	-0,07	-0,06	0,00
B1	0,09	-0,12	-0,59	0,01	0,01	0,15
D2	0,35	0,38	-0,14	0,00	-0,03	0,01
D4	0,35	0,25	-0,41	-0,07	0,01	0,01
E1	-0,20	0,31	-0,26	-0,04	-0,02	0,01
E2	-0,02	0,24	-0,36	0,02	-0,03	-0,02
E3	0,06	-0,11	-0,08	-0,04	0,00	0,01
E4	-0,55	0,37	0,06	-0,03	0,03	0,06
M	0,05	0,05	-0,05	-0,02	-0,04	0,02
A1	0,01	0,42	4,99			
C3	-0,26	0,48	0,36			

**Tabelle 14: Übersicht Kontrollmessung vom 11.06.2012**

Die Abweichungen zwischen den beiden Kontrollmessungen sind jetzt fast alle im Bereich von einigen hundertstel Millimeter, sodass die Ursache für die großen Abweichungen bei

der ersten Messung durch das Absinken des Trackers zu erklären ist. Dennoch fällt bei den Abweichung zu den Sollkoordinaten auf, dass der Punkt A1 falsch abgesteckt bzw. ausgerichtet wurde, denn die Abweichung in der Z-Koordinate liegt bei ca. 5 mm. Somit muss der Punkt A1 erneut ausgerichtet und gemessen werden.

Nach der Ausrichtung aller Wandpunkte und der Überprüfung ihrer Stabilität ist der Messaufbau fast abgeschlossen. Im letzten Schritt werden nur noch die Lasertrackerstandpunkte auf dem Messhallenboden mit Klebeband markiert und die Wandpunkte mit Namen versehen. Der gesamte Messaufbau ist in den folgenden Bildern einmal dargestellt.



**Abbildung 43: Gesamtübersicht Messaufbau**



**Abbildung 44: Markierung der Standpunkte**



**Abbildung 45: Beschriftung der Wandpunkte**

## 7. Richtlinienkonforme Lasertrackerprüfung

Nach dem abgeschlossenen Messaufbau kann die richtlinienkonforme Prüfung des Lasertrackers durchgeführt werden. Im Zuge der Masterarbeit erfolgt die Überprüfung mittels Referenzlängen und unterteilt sich in mehrere Teilschritte, die im Folgenden erläutert werden. Zunächst wird jedoch eine Nomenklatur festgelegt, die für die gesamte Messung gültig ist.

### 7.1 Nomenklatur

Für das einfache Nachvollziehen der Prozessanweisung im QMH und für eine einheitliche und effiziente Auswertung der Daten mit den entworfenen Prüfprotokollen wird eine Nomenklatur eingeführt. Die sieht vor, dass sich die Projekt- und Exportdateinamen immer aus der Bezeichnung für die Art der Messung, der Bezeichnung des Lasertrackers, der dazugehörigen Seriennummer und dem Datum des Prüftages zusammensetzen. Daraus ergeben sich dann folgende Dateinamen:

- für die Messung der Antastabweichung Maß/Form: PS\_Instr\_SN\_Datum
- für die Messung der synthetische Prüflänge: SPL\_Instr\_SN\_Datum
- für die 1. Messung der Referenzlängen: RL1\_Instr\_SN\_Datum
- für die 2. Messung der Referenzlängen: RL2\_Instr\_SN\_Datum
- für die Messung der Längenmessabweichung: E\_Instr\_SN\_Datum

Zusätzlich zu den einheitlichen Dateinamen fordern die Auswerteformulare eine einheitliche Punktbezeichnung. Diese variiert von Messverfahren zu Messverfahren stark und kann daher nicht verallgemeinert angegeben werden.

Die Punktbezeichnung bei der Messung der Antastabweichung Maß/Form setzt sich aus dem Namen des Reflektorhalters, also A2, B1 oder B2 und dem Messelement Kugel zusammen. Somit entstehen für die drei zumessenden Kugeln folgende Namen: Kugel\_A2, Kugel\_B1 und Kugel\_B3.

Für die Messung der synthetischen Prüflänge werden die Punkte, die mit dem Referenzlasertracker gemessen werden unter den Namen R1 und R2 abgespeichert. Die Punkte des zu prüfenden Trackers werden mit P1\_1 und P2\_1 für die erste Messung und für die Messungen zwei und drei entsprechend mit Unterstrich zwei oder drei bezeichnet.

Die Bezeichnung der Punkte für die Messung der Referenzlängen kann sowohl für die erste als auch für die zweite Messung gleich gewählt werden. Dadurch, dass jeder Punkt dreimal gemessen werden muss, setzt sich die Punktbezeichnung aus dem Namen des Reflektorhalters und der Zahl eins, zwei oder drei zusammen. Die Bezeichnung für die zweite Antastung des Punktes A3 sieht dementsprechend wie folgt aus: A3\_2.

Bei der Längenmessabweichung erfolgt die Messung aller Punkt von jedem Standpunkt in drei Orientierungen, sodass all diese Angaben mit in die Namensgebung einfließen. Die Bezeichnung setzt sich wie folgt zusammen: Standpunkt\_Orientierung\_Reflektorhalter.

## 7.2 Vorbereitung

Die Vorbereitung der Messung umfasst drei Tätigkeiten. Die erste besteht darin, dass mindestens ein bis zwei Stunden vor der Prüfung des Trackers sowohl der zu prüfende Lasertracker als auch der zur Bestimmung der Referenzlängen verwendete Tracker aufgestellt werden müssen. Dadurch haben die Instrumente die Möglichkeit sich an die Umgebungsbedingungen anzupassen und das System aufzuwärmen. Noch besser und effizienter wäre es, die Tracker bereits den Abend zuvor aufzustellen, sodass am nächsten Tag sofort mit der Lasertrackerprüfung begonnen werden kann. Die Wartezeit kann somit erheblich minimiert werden. Die zweite vorbereitende Tätigkeit ist das Festlegen der Integrations-/Messzeit, die in Metrolog bei den Trackerparametern auf 2000 ms eingestellt wird. Abschließend müssen noch die Betriebsarten und -bedingungen im dafür vorgesehenen Protokoll (Anhang A) eingetragen werden.

## 7.3 Messung der Antastabweichung Maß/Form

Nach Ablauf der Aufwärmzeit kann mit der Messung der Antastabweichung begonnen werden. Diese wird durchgeführt um zum einen das Abweichungsverhalten in kleinen Teilen des Messvolumens zu bestimmen und zum anderen wird der Wert der Antastabweichung Maß als Korrekturterm für die Berechnung der Längenmessabweichung benötigt. Dies ist notwendig, da die Antastung der Punkte an der Testwand durch das Einlegen der Messkugel im Normalfall immer aus einer Richtung erfolgt. Bei anderen möglichen Messstrategien, wie z.B. bei der Messung mit Parallel- oder Stufenendmaßen, ist dies nicht der Fall. Damit die unterschiedlichen Strategien vergleichbar bleiben, muss die Antastung bei der Berechnung der Längenmessabweichung berücksichtigt werden.

(31)

Die Richtlinie besagt, dass bei der Bestimmung der Antastabweichung die zu verwendende Prüfkugel an drei Positionen im Raum gemessen werden muss. Dabei soll die kleinste Entfernung bei ca. einem bis zwei Metern liegen und die größte bei über zweidrittel der längsten Prüflänge. Die dritte Position ist frei dazwischen wählbar. (31) Für die Umsetzung dieser Forderungen wird die Bestimmung der Antastabweichung an den Messpunkten A2, B2 und B3 durchgeführt. Der Lasertracker steht dabei auf dem Standpunkt LT1. Die kürzeste Entfernung, vom Tracker zum Punkt A2, beträgt dann ca. zwei Meter und die längste, zum Punkt B1, ungefähr acht Meter, sodass die Anforderungen erfüllt sind. Eine weitere Forderung ist die Verwendung einer kalibrierten Prüfkugel, dessen Durchmesser zwischen 30 mm und 50 mm beträgt. (31) Zum Zeitpunkt der Durchführung steht jedoch keine kalibrierte Prüfkugel zur Verfügung, sodass die Messung an einer zweiten Reflektorkugel vorgenommen wird. Dadurch ist der Abtastbereich kleiner, es ist aber immer noch möglich ungefähr eine halbe Kugel abzutasten, so wie es die Richtlinie fordert.

Die Vorgehensweise für die Messung der Antastabweichung Form (PF) und Maß (PS) ist exakt die gleiche, sodass nur eine Messung durchgeführt werden muss. Die Unterscheidung zwischen diesen beiden Kenngrößen erfolgt dementsprechend erst in der Auswertung. Die laut Richtlinie vorgeschriebene Messung der Antastabweichung Ort (PL) wird im Zuge dieser Masterarbeit vernachlässigt, da in einer sich anschließenden Bachelorarbeit eine weiterführende Untersuchung der Genauigkeit bei unterschiedlichen Reflektoren und Tastern stattfindet.

Für die Durchführung wird der Tracker auf dem Standpunkt LT1 aufgebaut. Anschließend wird die Prüfkugel in den Reflektorhalter A2 gelegt, sodass dann die Messung beginnen kann. Dafür wird die Kugel mit 25 Punkten nach dem von der VDI/VDE Richtlinie vorgeschlagenem Antastmuster abgetastet (Abbildung 46). Die abgetasteten Punkte werden in Metrolog als Punkte einer Kugel gemessen und anschließend wird eine Ausgleichskugel nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate in die Punkte gerechnet.





**Abbildung 46: Messung der Antastabweichung**

Bei der Messung ist zu beachten, dass diese ohne Strahlenunterbrechung durchgeführt wird und dass die Längenmessung, soweit dies gerätetechnisch möglich ist, interferometrisch erfolgt. Das gleiche Vorgehen wird mit der Prüfkugel in den Punkten B2 und B1 wiederholt. Die Speicherung der Daten erfolgt nach der in Kapitel 7.1 angegebenen Nomenklatur.

#### **7.4 Messung der synthetische Prüflänge**

Im nächsten Schritt der Lasertrackerprüfung erfolgt die Messung der synthetischen Prüflänge. Diese muss immer dann durchgeführt werden, wenn die Verkörperung der Referenzlängen einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von kleiner gleich  $2 * 10^{-6}/K$  hat. Denn durch einen sehr kleinen Koeffizienten ist der Fehlereinfluss, der durch die Genauigkeit der Temperaturerfassung entsteht, wesentlich kleiner als der bei einem großen Ausdehnungskoeffizienten. Dadurch dass bei den verschiedenen Messstrategien Prüfkörper mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten verwendet werden können, ist ein Korrekturwert durch die Messung der synthetischen Prüflänge zu bestimmen. Durch das Anbringen des Wertes erscheinen dann alle Referenzlängen so, als wären sie durch eine Maßverkörperung mit einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten von  $11,5 *$

$10^{-6} /K$  realisiert. Dies führt dazu, dass die Ergebnisse der unterschiedlichen Messstrategien vergleichbar sind. (31)

Bei der Bestimmung der Längenmessabweichung mit Referenzlängen ist die Messung der synthetischen Prüflänge notwendig, da der Ausdehnungskoeffizient der Luft bei  $1 * 10^{-6} /K$  liegt und damit unterhalb des Grenzwertes. Die Messung erfolgt über die Bestimmung einer Prüflänge. Diese wird durch zwei Nester repräsentiert (Abbildung 47), die so angeordnet sind, dass der Lasertracker in Verlängerung dazu aufgebaut werden kann. Die anschließende Messung unterteilt sich in zwei Teilschritte. Im ersten Schritt wird der Referenzlasertracker in Verlängerung der Prüflänge aufgebaut und dann die beiden Punkte angemessen und gespeichert. Die Erfassung der Länge muss laut Richtlinie nur einmal erfolgen. Das Ergebnis der ersten Teilmessung ist eine kalibrierte Prüflänge  $L$ , aus der in der Auswertung eine synthetische Prüflänge berechnet wird. Dazu ist es jedoch notwendig, dass zusätzlich die Temperatur von einem Stück Stahl gemessen wird. Dies erfolgt mit einem unabhängigen Thermometer, das an einem Stahlträger in der Messhalle befestigt wird. Der gemessene Wert wird im Protokoll notiert.



**Abbildung 47: Messaufbau der synthetischen Prüflänge**

Zusätzlich zu der mit dem Referenzlasertracker bestimmten Prüflänge wird im zweiten Teilschritt für die Berechnung des Korrekturwertes eine Vergleichslänge mit dem zu prüfenden Lasertracker benötigt. Diese Länge wird jedoch nicht bei der Auswertung in eine synthetische Prüflänge umgerechnet, sondern bereits als solche bestimmt. Dafür ist es

notwendig, dass bei der Messung zusätzlich zu dem normalen Temperaturfühler für die Brechzahlkompensation ein zweiter Fühler für die Erfassung der Temperatur des Stahls angeschlossen wird. Des Weiteren muss in der Messsoftware der Temperatursausgleich aktiviert und der Ausdehnungskoeffizient sowie die Art der Erfassung der Temperatur eingegeben werden. Das kann zum einen durch die Eingabe des Wertes erfolgen oder zum anderen automatisch. Bei der Überprüfung des FARO X v2 kann der Temperaturwert nicht automatisch erfasst werden, da kein zusätzlicher Werkstücktemperaturfühler zur Verfügung steht. Die Messung der Temperatur erfolgt in dem Fall mit einem unabhängigen Thermometer. Bei dem Leica AT901 hingegen sind zwei Temperaturfühler vorhanden, sodass eine automatische Erfassung der Werkstücktemperatur möglich ist. Nachdem alle Einstellungen abgeschlossen sind, kann die Prüflänge dreimal bestimmt werden. Die Speicherung der Daten erfolgt dabei nach der in Kapitel 7.1 angegebenen Nomenklatur.

## **7.5 Messung der Referenzlängen**

Nach der Messung der synthetischen Prüflänge schließt sich die Bestimmung der Referenzlängen an. Das Vorgehen unterteilt sich dabei in zwei wesentliche Teilschritte, die in den folgenden Unterkapiteln erläutert werden. Zuvor werden jedoch noch einige allgemeine Aspekte der Bestimmung dargelegt.

### **7.5.1 Allgemeine Aspekte der Referenzlängenbestimmung**

Die Referenzlängen gehen in die Auswertung als Solllängen ein und müssen daher entsprechend der Richtlinie wesentlich genauer bestimmt werden als die Istlängen. Aus diesem Grund werden sie durch ein unabhängiges kalibriertes Interferometer gemessen, welches das eines zweiten Lasertrackers sein kann. Zum Erreichen der Genauigkeit der Referenzlängen von einigen Mikrometern ist es notwendig, dass die Messung der Strecken interferometrisch und ohne jeglichen Einfluss der Winkelmessung erfolgt. Dies wiederum kann erreicht werden, indem der Laserstrahl durch einen Umlenkspiegel so abgelenkt wird, dass der Strahl durch alle Messpunkte einer Messlinie verläuft. Der Spiegel ist in diesem Fall die in Kapitel 5.5 beschriebene Spiegelkonstruktion. Die durch diese Messanordnung erreichbare Genauigkeit liegt dabei zehnmal höher als bei der Messung ohne den Spiegel, sodass die Referenzstrecken im Vergleich zu den Iststrecken ausreichend genau bestimmt werden können.

Ein zusätzliches Hilfsmittel, das bei der Messung der Referenzlängen zum Einsatz kommt, ist eine halbe Stahlkugel mit einem markierten Mittelpunkt (Abbildung 48). Durch diese Halbkugel ist es bei der Ausrichtung des Spiegels möglich, zeitgleich den Mittelpunkt des ersten Messlinienpunktes einzustellen und zu sehen, wohin der Laserstrahl weiter verläuft. Diese Tatsache vereinfacht das Einrichten stark und erbringt eine Zeitersparnis.



**Abbildung 48: Halbe Stahlkugel mit markiertem Mittelpunkt**

Ebenfalls eine Zeitersparnis kann durch das Verwenden der von FARO entwickelten Messsoftware Insight erzielt werden. Denn diese bietet den Vorteil, dass die interferometrischen Strecken online angezeigt und dass neben den Koordinaten auch die einzelnen Messelemente, also die Winkel und die Strecke, abgespeichert werden können. Dadurch wiederum kann sofort nachvollzogen werden, inwiefern die gemessenen Referenzlängen zueinander passen oder ob sie wiederholt werden müssen. Nachteil der Software ist jedoch, dass sie lediglich mit FARO Lasertrackern verwendet werden kann. Für die Messung wird daher der FARO Xi verwendet.

Grundvoraussetzung für eine einwandfreie Prüfung des Lasertrackers ist, neben der hoch genauen Bestimmung der Referenzlängen, auch die Stabilität der Längen über den gesamten Zeitraum der Überprüfung. Dies ist bei den Gegebenheiten in der Messhalle jedoch nicht hundertprozentig sicherzustellen, sodass die Sollstrecken sowohl vor als auch nach der Überprüfung eines Trackers bestimmt werden müssen. Sollte die Differenz zwischen den beiden Messungen zu groß sein, müsste die Bestimmung der Referenz- und der Istlängen wiederholt werden. Um die Zeitspanne zwischen den beiden Messungen der Referenzlängen weiterhin möglichst klein zu halten und somit auch den Einfluss der Umgebungsbedingungen, wird so vorgegangen, dass die Messlinien in der Reihenfolge D,

A, B, E, C gemessen werden. Dadurch minimiert sich der Zeitaufwand beim Umstellen des Lasertrackers und somit die Gesamtzeit der Lasertrackerprüfung.

### 7.5.2 Ausrichten der Spiegelkonstruktion und des Lasertrackers

Ziel der Ausrichtung ist es den Laserstrahl des Lasertrackers so umzulenken, dass er durch alle Mittelpunkte der Messlinienpunkte verläuft (Abbildung 49), sodass eine interferometrische Streckenmessung ohne jeglichen Einfluss der Winkelfehler erfolgen kann. Zum Erreichen dieses Zieles müssen über einen iterativen Prozess immer wieder die Mittelpunkte des ersten und letzten Punktes einer Messlinie eingestellt werden. Dieser Vorgang ist für alle Messlinien gleich, sodass an dieser Stelle exemplarisch das Vorgehen an der Messlinie A beschrieben wird.



**Abbildung 49: Angestrebter Strahlenverlauf nach der Ausrichtung der Spiegelkonstruktion**

Zuerst wird der Lasertracker über der am Boden markierten Position aufgebaut und anschließend initialisiert. Parallel dazu kann die Spiegelkonstruktion auf die vorgesehene Markierung unter den Punkt A3 gestellt und bereits grob ausgerichtet werden. Nach der Initialisierung werden über die Messsoftware Insight die Motoren und das Tracking des Lasertrackers ausgeschaltet, sodass dieser so gedreht werden kann, dass der Laserstrahl mittig auf dem Spiegel auftrifft. Anschließend wird im Punkt A1 eine Messkugel mit Blickrichtung zur Spiegelkonstruktion und im Punkt A3 die halbe Stahlkugel gelegt. Die Vorbereitung für die Ausrichtung ist damit abgeschlossen und der iterative Prozess kann beginnen. Dabei werden zunächst der Spiegel und der Tracker so in Position gebracht, dass

der Strahl direkt durch den Mittelpunkt des Punktes A3 verläuft (Abbildung 50). Dabei sollte auch darauf geachtet werden, dass der Laserstrahl sich in der Mitte des Spiegels befindet, da dies die spätere Messung stark vereinfacht. Ist diese Position gefunden, muss die Spiegelkonstruktion mit Hilfe einer Heißklebepistole auf dem Boden fixiert werden. Dadurch kann die Konstruktion sich nicht mehr verschieben und auch eine Kippbewegung auf Grund der Unebenheit des Bodens kann verhindert werden. Im Anschluss daran wird mit dem Einspielen des oberen Punktes begonnen. Der am unteren Punkt schleifende Laserstrahl trifft je nach Ausrichtung auf die Messhallendecke (Abbildung 51) und wird über das Kippen und Drehen des Spiegels auf den Mittelpunkt des Punktes A1 gelenkt (Abbildung 52). Durch dieses Verstellen durchläuft der Laserstrahl jedoch nicht mehr exakt den Mittelpunkt des unteren Punktes, sodass durch das Drehen am Lasertracker diese wiederhergestellt werden muss. Auch diese Veränderung bewirkt wieder eine Änderung am oberen Punkt, sodass der Spiegel erneut gedreht und gekippt werden muss. Dieses jeweilige Einstellen wird solange wiederholt, bis beide Mittelpunkte exakt eingestellt sind.

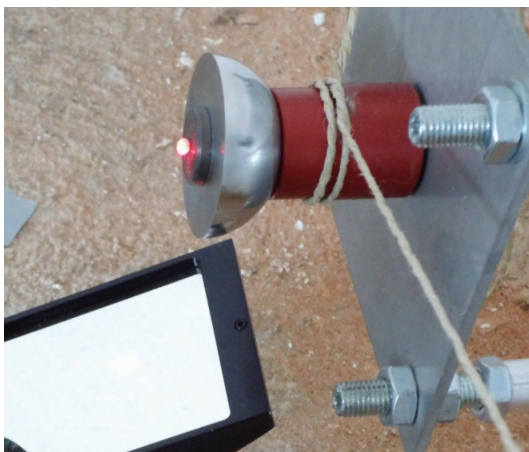


Abbildung 50: Einspielen des Punktes A3



Abbildung 51: Auftreffpunkt des Laserstrahls an der Messhallendecke

Um zu prüfen, ob der Laserstrahl exakt durch beide Mittelpunkte läuft, wird zunächst im unteren Punkt eine Messkugel gelegt und überprüft, ob die Kontrollleuchte des Lasertrackers grün leuchtet (Abbildung 53). Diese leuchtet dann, wenn der Tracker in der Lage ist, die Kugel anzumessen und somit die Kugel mittig ausgerichtet ist. Das gleiche wird dann auch für den Punkt A1 wiederholt. Abschließend können dann die Motoren und das Tracking wieder eingeschaltet werden. Die Ausrichtung ist damit abgeschlossen.

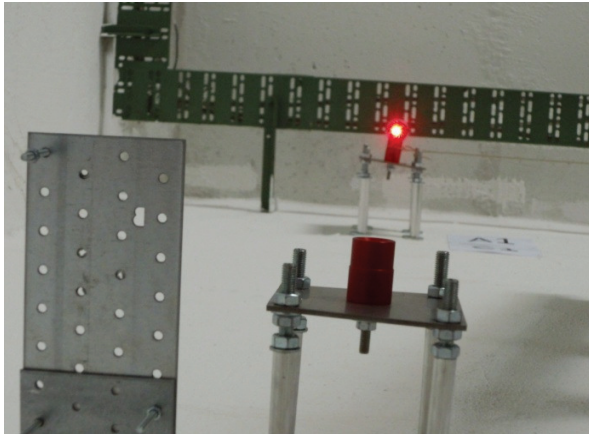


Abbildung 52: Laserstrahl auf Punkt A3 eingestellt



Abbildung 53: Grüne Kontrollleuchte des Lasertrackers

### 7.5.3 Messung der Referenzlängen

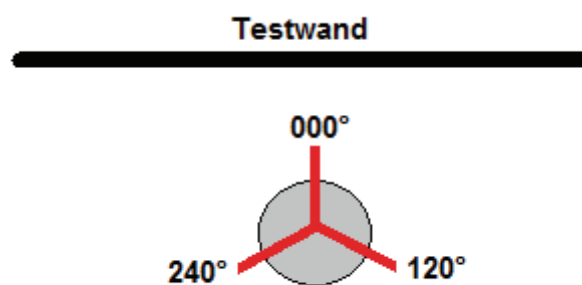
Nach der Ausrichtung der Spiegelkonstruktion und des Lasertrackers kann mit der Messung der Referenzlängen begonnen werden. Jede Länge ist dabei dreimal zu bestimmen, sodass jeder Punkt einer Messlinie immer dreimal angemessen werden muss. Dabei darf während der Messung der Laserstrahl nicht unterbrochen werden.

Praktisch wird so vorgegangen, dass zunächst die Messkugel in den ersten Messlinienpunkt gelegt und mit ADM angemessen wird. Dieser Punkt wird im nächsten Schritt dann als Nullpunkt festgelegt, sodass die folgenden Strecken mit ihrer exakten Länge online angezeigt werden. Im Anschluss wird interferometrisch der zweite Punkt der Messlinie angemessen. Dafür wird die Kugel vorsichtig aus dem Nest herausgenommen und zum nächsten Punkt geführt. Dabei muss die Messkugel so bewegt werden, dass der zurückgeworfene Strahl nicht den Spiegel verlässt. Sollte dies passieren, muss die gesamte Messung der Messlinie wiederholt werden, da dadurch eine Strahlenunterbrechung auftritt und somit die interferometrische Strecke fehlerhaft ist. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt, bis alle Punkte dreimal bestimmt sind. Parallel dazu sollten die gespeicherten Strecken immer wieder kontrolliert werden, um festzustellen, ob grobe Abweichungen zwischen den Wiederholungen aufgetreten sind. Sollte dies der Fall sein sind entsprechend mehrere Wiederholungen durchzuführen.

### 7.6 Messung der Istlängen

Zur Bestimmung der Längenmessabweichung müssen, neben den bereits gemessenen Größen, auch noch die Istlängen der Messlinien bestimmt werden. Diese werden mit dem

zu überprüfenden Lasertracker in einer Fernrohrlage gemessen und in der Auswertung mit den Referenzlängen verglichen. Für die Messung wird der Tracker zunächst auf dem Standpunkt LT1 positioniert und mit dem Vogelbad in Richtung Testwand ausgerichtet. Diese Position stellt die 000°-Orientierung dar. Im Anschluss kann die Bestimmung der Istlängen beginnen. Eine Stationsorientierung des Lasertrackers ist dazu nicht notwendig, da in der Auswertung nur die aus den Koordinaten berechneten Strecken interessieren. Für die Messung wird in der Messsoftware *Geometriepunkt messen* ausgewählt und der Reflektor in das erste Nest gelegt. Das Einlegen sollte möglichst vorsichtig erfolgen, sodass es nicht zur Schwingung der Wandhalterung kommt. Nachdem die Koordinaten des Punktes bestimmt sind, werden alle weiteren Punkte ebenfalls angemessen. Im Anschluss erfolgt die gleiche Messung aller Nester in der 120°- und 240°-Orientierung (Abbildung 54). Dafür wird der Lasertracker in der Horizontalen jeweils um 120° gedreht.



**Abbildung 54: Orientierungen des Lasertrackers**

Nachdem in allen drei Orientierungen alle Wandpunkte aufgenommen sind, wird die gleiche Vorgehensweise für jeden weiteren Lasertrackerstandpunkt wiederholt. Die Speicherung der Daten erfolgt wie in Kapitel 7.1 angegeben.



## 8. Auswertung der Messungen

Die in den nachfolgenden Kapiteln aufgeführten Auswerteverfahren werden zur Bestimmung der Antastabweichung und der Längenmessabweichung des Leica AT901 LR, und des FARO X v2 herangezogen. Die Ergebnisse der Einzelmessungen, sowie die Beurteilung der Ergebnisse sind im Kapitel 8.5 dargestellt.

Die Auswertung der Messungen erfolgt hauptsächlich mittels selbst entworfenen Excel-Prüfprotokollen (Anhang A – E), die jeweils aufeinander aufbauen und in einer Excel-Datei zusammengefasst sind. Dies ermöglicht dem Nutzer eine einfache und effiziente Auswertung der Messdaten. Die Reihenfolge und die Bezeichnungen der einzelnen Tabellen sind identisch der Durchführung. Für die Auswertung gibt es zu jedem Teilschritt der Prüfung eine Tabelle, in die die reinen Messdaten mit Punktnummer, X-, Y- und Z-Koordinaten eingeladen werden können. Auf diese Daten wiederum greift das eigentliche Auswerteprotokoll zu und berechnet dann die gewünschten Größen. Die genauen Berechnungsschritte werden in den folgenden Unterkapiteln kurz dargestellt.

### 8.1 Auswertung der Antastabweichung

Für die Auswertung der Antastabweichung werden in Metrolog zunächst aus der berechneten Ausgleichskugel 25 Geometriepunkte extrahiert und diese anschließend in eine Textdatei exportiert (PS\_Instr\_SN\_Datum.txt). Zusätzlich dazu werden die in Metrolog angezeigten Mittelpunktkoordinaten und der berechnete Durchmesser der gemessenen Kugel in das Auswerteformular übernommen. Für die Berechnung der Antastabweichung Form werden als erstes die exportierten Koordinaten der Geometriepunkt in das Excel-Auswerteformular importiert (Resultat\_Instr\_SN\_Datum.xlsx). Im nächsten Schritt werden dann aus den einzelnen Koordinaten der Punkte die Radien zum Kugelmittelpunkt berechnet, sodass am Ende zu jeder Kugel 25 Radien bestimmt sind.

$$r_n = \sqrt{(X_M - X_n)^2 + (Y_M - Y_n)^2 + (Z_M - Z_n)^2} \quad (8.1)$$

Aus diesen wird dann die radiale Spanne bestimmt, indem der kleinste Radius vom größten Radius abgezogen wird (Abbildung 55).

$$PF_{1;2;3} = R_{max} - R_{min} \quad (8.2)$$

Daraus ergibt sich dann für jede gemessene Kugelposition eine Antastabweichung Form, die dann wiederum miteinander gemittelt werden und so zu einem endgültigen Wert führen.

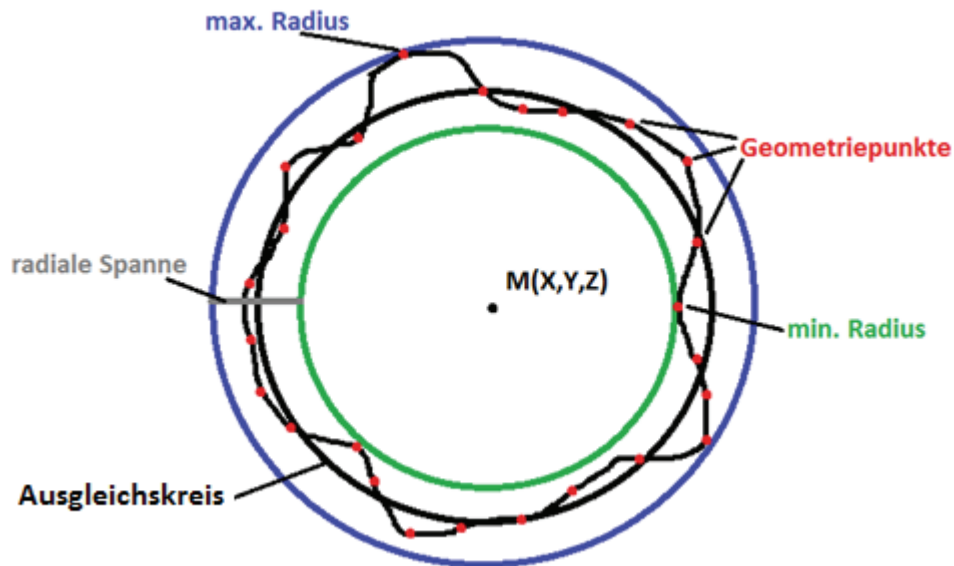


Abbildung 55: Radiale Spanne am Beispiel eines Kreises

Zur Bestimmung der Antastabweichung Maß wird der aus der Ausgleichskugel bestimmte Durchmesser mit dem kalibrierten Durchmesser der Reflektorkugel verglichen. Der kalibrierte Wert kann aus dem zum Reflektor gehörigen Kalibrierschein entnommen werden. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass dort nur der Radius und nicht der Durchmesser angegeben wird. Die für die Prüfung verwendete Messkugel hat einen Radius von  $19,05 \text{ mm} \pm 0,0025 \text{ mm}$ , woraus sich ein Durchmesser von  $38,10 \text{ mm} \pm 0,0025 \text{ mm}$  ergibt. Dieser Wert wird in der Auswertung für jede Kugelposition mit dem von Metrolog durch Ausgleichung berechneten Durchmesser verglichen. Die Abweichung ergibt die Antastabweichung Maß und dient gleichzeitig als Korrektutwert für die Längenmessabweichung, sodass der berechnete Wert automatisch in das entsprechende Auswerteformular übertragen wird.

## 8.2 Auswertung Messung der synthetische Prüflänge

An die Auswertung der Antastabweichung schließt sich die der synthetischen Prüflänge an. Dafür werden zunächst die Koordinaten der Messung aus der Messsoftware in eine Textdatei exportiert (SPL\_Instr\_SN\_Datum.txt) und diese anschließend in Excel

importiert. Im Anschluss wird die synthetische Prüflänge des Referenzinterferometers berechnet. Dafür wird im ersten Teilschritt die kalibrierte Länge  $L$  zwischen den beiden gemessenen Punkten R1 und R2 berechnet. Im zweiten Teilschritt wird diese Länge mittels der Formel 8.3 in eine synthetische Prüflänge umgerechnet. Die dafür benötigte Werkstücktemperatur  $T$  beträgt zum Zeitpunkt der Lasertrackerprüfung  $17,9^\circ\text{C}$ . Der gemessene Wert ist im Protokoll einzutragen.

$$L_S = L * (1 - 11,5 * 10^{-6} * (T - 20^\circ\text{C})) \quad (8.3)$$

Zur Bestimmung des für die Längenmessabweichung benötigten Korrekturwertes  $E_{Ki}$  muss im nächsten Schritt die synthetische Prüflänge des zu prüfenden Lasertrackers berechnet werden. Dabei wird zunächst aus den gemessenen Punkten P1 und P2 die Prüflänge  $L_a$  berechnet. Eine Korrektur dieser Länge hinsichtlich Temperatur und Ausdehnungskoeffizienten mit der Formel 8.3 ist an dieser Stelle nicht mehr notwendig, da dies bereits während der Messung von der Messsoftware durchgeführt wurde. Im nächsten Berechnungsschritt wird die synthetische Längenmessabweichung durch die Differenz zwischen der synthetischen Prüflänge  $L_S$  und der Prüflänge  $L_a$  bestimmt (Formel 8.4).

$$E_S = L_a - L_S \quad (8.4)$$

Dieser Teilschritt wird für jede Wiederholungsmessung durchgeführt, sodass aus den drei bestimmten synthetischen Längenmessabweichungen die mittlere Abweichung  $E_M$  berechnet werden kann (8.5).

$$E_M = \frac{(E_{S1} + E_{S2} + E_{S3})}{3} \quad (8.5)$$

Mittels der nun bekannten mittleren Längenmessabweichung kann der für jede Prüflänge individuelle Korrekturwert  $E_{Ki}$  mit Hilfe der Formel 8.6 bestimmt werden.

$$E_{Ki} = L_r * E_M / L_S \quad (8.6)$$

### 8.3 Auswertung der Referenzlängen

Nachdem alle benötigten Korrekturwerte berechnet sind, kann mit der Auswertung der Referenzlängen begonnen werden. Diese unterscheidet sich je nach verwendeter Messsoftware und wird im Folgenden getrennt dargestellt.

### **8.3.1 Auswertung der Messdaten von Metrolog**

Erfolgt die Messung mittels Metrolog, müssen zunächst die Rohdaten der beiden Referenzlängenmessungen (RL1/2\_Instr\_SN\_Datum) in das Auswerteprotokoll eingeladen werden. Dies erfolgt über die in Excel integrierte Importfunktion, bei der jedoch darauf geachtet werden muss, dass die 1000er-Trennzeichen Kommata und die Dezimaltrennzeichen Punkte sind. Nach dem Einladen der Rohdaten berechnet das Protokoll zunächst aus den Koordinaten die Strecken der einzelnen Prüflängen. Für jede Länge werden dabei drei Werte ausgegeben, da jeder Punkt drei Mal angetastet wurde. Das Mittel aus den drei Strecken ergibt eine Referenzlänge. Im Anschluss werden dann die Sollstrecken vor und nach der Überprüfung des Lasertrackers gemittelt, miteinander verglichen und die Abweichungen bestimmt. Liegen diese innerhalb der zulässigen Toleranz, kann davon ausgegangen werden, dass die Wandpunkte während der Bestimmung der Längenmessabweichung stabil waren und somit die Prüfung zulässig ist.

Sollten die Abweichungen zwischen den beiden Messungen jedoch größer als die Toleranz sein, muss sowohl die Referenzlängenmessung, als auch die Messung der Istlängen wiederholt werden.

### **8.3.2 Auswertung der Messdaten von FARO Insight**

Bei der Messung mit FARO Insight entfällt der Schritt der Streckenberechnung aus den Koordinaten, da die Software die gemessenen Strecken ebenfalls als Einzelwert abspeichert. Dabei werden jedoch nicht die Strecken von einem Punkt zum anderen angegeben, sondern jeweils die Entfernung zum Vogelbad. Daraus folgt, dass zur Berechnung der Prüflängen die jeweiligen Strecken von einander subtrahiert werden müssen. Dieser Berechnungsschritt ist im eigentlichen Auswerteformular nicht vorgesehen und muss daher in einem extra Dokument vorgenommen werden. Die dort bestimmten Prüflängen können dann jedoch als Wert in das eigentliche Auswerteformular kopiert werden, sodass die weiteren Berechnungsschritte dort automatisch durchgeführt werden können.

Die FARO Insight Software erlaubt neben dem Auslesen der Winkel und Strecken auch das Exportieren der Koordinaten. Eine Auswertung kann somit auch mittels des vorgefertigten Auswerteformular erfolgen.

Am Ende beider Auswertestrategien werden die berechneten Mittelwerte der Referenzlängen automatisch in das Auswerteprotokoll der Längenmessung übertragen und als Sollwerte festgelegt.

#### 8.4 Auswertung Längenmessabweichung

Bei der Auswertung der Längenmessabweichung werden zunächst wieder die reinen Messdaten (E\_Instr\_SN\_Datum.txt) in eine Exceltabelle eingeladen. Daraus werden dann für jede Prüflänge in jeder Trackerorientierung Iststrecken berechnet. Anschließend werden die Werte der drei Orientierungen zu einer Strecke gemittelt, sodass im Anschluss der Vergleich mit den Sollstrecken und somit die Berechnung der Längenmessabweichung erfolgen kann. Die Abweichung ergibt sich aus der folgenden Formel

$$E = L_a - L_r + PS + E_{Ki} \quad (8.4)$$

Dabei ist  $L_a$  die berechnete Iststrecke,  $L_r$  die bestimmte Sollstrecke,  $PS$  die ermittelte Antastabweichung Maß und  $E_{Ki}$  der durch die Messung der synthetischen Prüflänge berechnete Korrekturwert einer Prüflänge. Durch die Berechnung wird jeder Strecke eine Längenmessabweichung zugeordnet, sodass im folgenden Schritt überprüft werden muss, ob alle Abweichungen innerhalb des zulässigen Grenzwertes liegen. Dafür wird für jede Prüflänge der entsprechende Grenzwert berechnet und anschließend mit der Längenmessabweichung verglichen. Bei Einhaltung wird im Protokoll die zulässige Abweichung grün hinterlegt und mit einem „v“ gekennzeichnet. Bei einer Überschreitung erfolgt die Kennzeichnung durch ein rot hinterlegtes „x“. Die Längenmessabweichungen für die unterschiedlichen Strecken werden zusätzlich in einem Diagramm dargestellt. Durch die grafische Darstellung des Grenzwertes, kann der Nutzer schnell alle Überschreitungen auf einem Blick erkennen.

#### 8.5 Darstellung und Beurteilung der Ergebnisse

Nach der Darstellung der Vorgehensweise bei der Auswertung folgt nun die der Ergebnisse der beiden Testmessungen mit dem Leica AT901 LR und dem FARO X v2. Zur Beurteilung der Ergebnisse müssen zunächst jedoch die Grenzwerte für die Abweichungen festgelegt werden. Diese können bei der Bestandsprüfung vom Betreiber selbst festgelegt werden, sollten sich jedoch an den Spezifikation des Lasertrackers und den vorherrschenden Aufgabenstellungen der Firma und den damit verbundenen Genauigkeitsanforderungen orientieren.

Generell setzt sich der Grenzwert immer aus dem Maximum Permissible Error (MPE) und der erweiterten Messunsicherheit zusammen. Der größte zulässige Fehler wird vom Hersteller angegeben und liegt beim Leica AT901 LR für das gesamte Messvolumen bei  $MPE_{x,y,z} = 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$ . Eine weitere Aufschlüsselung hinsichtlich des MPE für die Antastabweichung oder die Längenmessabweichung gibt der Hersteller nicht an, sodass dieser als Grenzwert für beide Kenngrößen verwendet wird. Eine Unterscheidung findet auch beim FARO X v2 nicht statt, sodass dessen angegebener MPE von  $18 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m/m}$  ebenfalls für beide Kenngrößen verwendet wird. Anders als der größte zulässige Fehler muss die erweiterte Messunsicherheit rechnerisch bestimmt werden. Hinzu kommt, dass diese sich für die Antastabweichung und die Längenmessabweichung unterscheidet, da die Messstrategie bei beiden unterschiedlich ist. Die allgemeine Vorgehensweise zur Berechnung von Messunsicherheiten wird in der DIN EN ISO 14253-1 sowie in der GUM erläutert und stellt sich allgemein als sehr umfangreich dar, sodass an dieser Stelle die Messunsicherheit nicht rechnerisch bestimmt wird. Die für die Auswertung verwendete erweiterte Messunsicherheit wird in diesem Fall mit  $2 \mu\text{m} + 0,4 \mu\text{m/m}$  festgelegt und ergibt sich aus der interferometrischen Längenmessgenauigkeit des FARO Xi, mit dem die Referenzlängen gemessen werden. Auch eine weitere Unterscheidung für die Antastabweichung und die Längenmessabweichung wird nicht vorgenommen.

Zur Beurteilung der einzelnen Prüflängen bzw. Prüfelementen, wird zu der berechneten Länge die Messunsicherheit einmal aufaddiert und einmal subtrahiert und anschließend mit dem MPE verglichen. Sollten die beiden um die Messunsicherheit korrigierten Werte innerhalb des Grenzwertes liegen, ist die Spezifikation eingehalten.

Nachdem nun die Grenzwerte für die beiden Kenngrößen bekannt sind, werden in den nächsten Unterkapiteln die Ergebnisse der Teilmessungen dargestellt.

### 8.5.1 Antastabweichung Maß (PS)

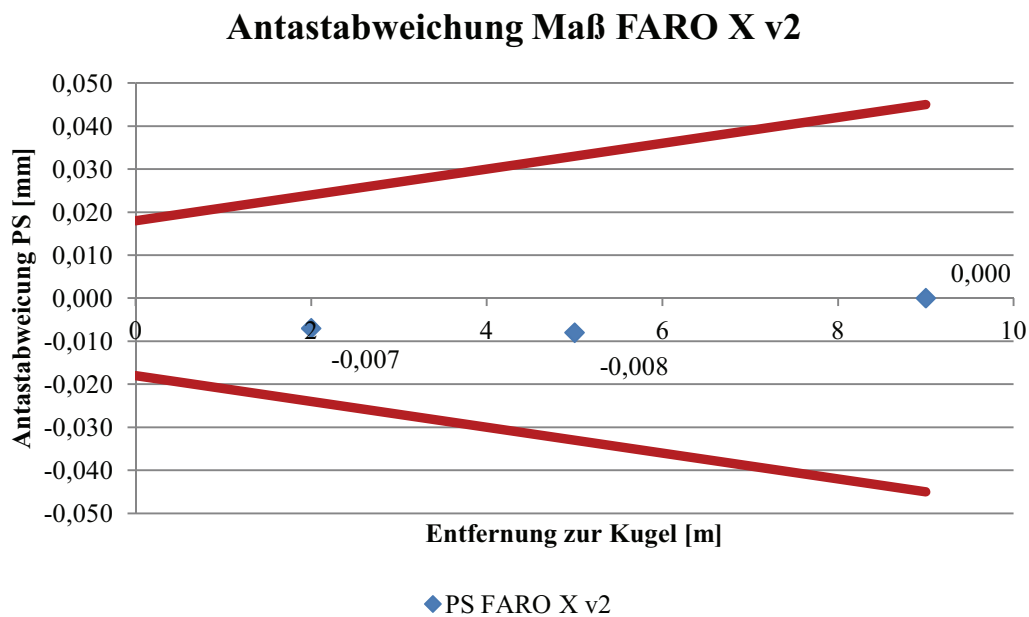
Die Ergebnisse der Antastabweichung Maß für die einzelnen Kugeln und den jeweiligen Lasertracker sind in der Tabelle 15 zusammengefasst.

Instrument	PS Kugel A2 [mm]	PS Kugel B1 [mm]	PS Kugel B2 [mm]
Leica AT901 LR	-0,018	-0,077	-0,012
FARO X v2	-0,007	0,000	-0,008

Tabelle 15: Ergebnisübersicht Antastabweichung Maß

Die Richtlinie gibt vor, dass der Grenzwert dann eingehalten ist, wenn alle Werte diesen unterschreiten. Sollte es zu einer Überschreitung an genau einer Position kommen, muss für diese die Messung dreimal wiederholt werden. Liegen dann alle Werte der Wiederholungsmessungen unterhalb des Grenzwertes, ist die gesamte Messung als erfolgreich anzusehen. (31) Bei einer erneuten Überschreitung ist der Lasertracker bei der Annahme- bzw. Bestätigungsprüfung durchgefallen und sollte ggf. nochmals geprüft oder zur Kalibrierung beim Hersteller eingeschickt werden.

Mit dieser Vorgabe können nun die erzielten Ergebnisse beurteilt werden. Der FARO Lasertracker liegt mit allen drei Prüfelementen, die noch nicht die Messunsicherheit berücksichtigen, weit unterhalb des zulässigen Grenzwertes, was in der Abbildung 56 sichtbar wird.



**Abbildung 56: Antastabweichung Maß FARO X v2**

Auch nach dem Anbringen der Messunsicherheit von  $2 \mu\text{m} + 0,4 \mu\text{m}/\text{m}$  wird die Spezifikation eingehalten. Die um die Unsicherheit erweiterten Werte sind aus der Tabelle 16 zu entnehmen. Dabei wird zunächst immer erst einmal die Messunsicherheit von der Antastabweichung Maß abgezogen und dann einmal aufaddiert.

Abschließend ist festzustellen, dass der FARO X v2 diese Teilmessung der Überprüfung bestanden hat. Eine Wiederholungsmessung ist an dieser Stelle demnach nicht erforderlich.

Prüfelement	um die Messunsicherheit erweiterte PS [mm]	$MPE_{PS}$ [mm]
Kugel_A2	-0,010	0,024
	-0,004	o.k.
Kugel_B2	-0,014	0,033
	-0,002	o.k.
Kugel_B1	-0,004	0,045
	0,004	o.k.

Tabelle 16: Übersicht der um die Messunsicherheit erweiterten PS des FARO X v2

Bei der Auswertung der Antastabweichung Maß des Leica AT901 LR wird bereits bei der Betrachtung der reinen Messwerte sichtbar, dass der Maximum Permissible Error an mindestens einer Position nicht eingehalten wird (Abbildung 57). Die bestimmte PS an der Kugel B1 liegt bereits 8  $\mu\text{m}$  oberhalb der Spezifikation.

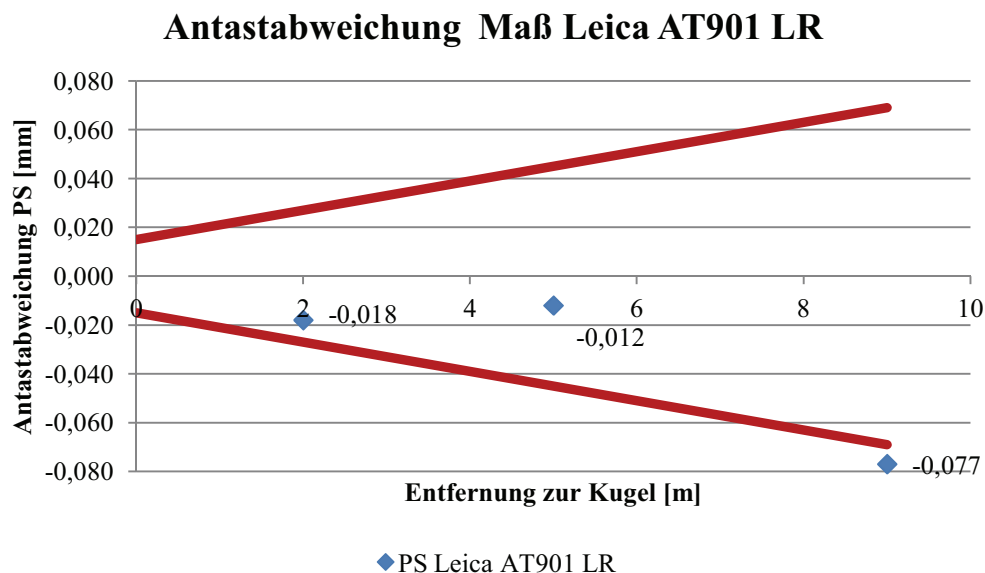


Abbildung 57: Antastabweichung Maß Leica AT901 LR

Nach der Erweiterung der Antastabweichung Maß um die Messunsicherheit, wird sichtbar, dass die Werte der Kugeln A2 und B2 immer noch innerhalb des  $MPE_{PS}$  liegen (Tabelle 17). Die Kugel B1 weicht nun aber erheblich von der Spezifikation ab, sodass an dieser Stelle für die Annahme- bzw. der Bestätigungsprüfung eine erneute Messung dieser Kugel erfolgen muss. Erst nach Abschluss und Auswertung der Wiederholungsmessung kann abschließend beurteilt werden, ob der Lasertracker noch innerhalb der Spezifikation liegt oder, ob eine Kalibrierung erfolgen muss. Für die Prüfmittelüberwachung wird an dieser Stelle jedoch keine Wiederholungsmessung vorgenommen, sondern nur die beiden Antastabweichungen der Kugeln A2 und B2 verwendet.



Prüfelement	um die Messunsicherheit korrigierte PS [mm]	$MPE_{PS}$ [mm]
Kugel_A2	-0,021	0,027
	-0,015	o.k.
Kugel_B2	-0,016	0,045
	-0,008	o.k.
Kugel_B1	-0,083	0,069
	-0,071	o.k.

Tabelle 17: Übersicht der um die Messunsicherheit erweiterten PS des Leica AT901 LR

### 8.5.2 Antastabweichung Form (PF)

Die Ergebnisse der Antastabweichung Form stellen sich ähnlich wie die der Antastabweichung Maß dar. Die einzelnen Antastabweichungen Form der beiden Lasertracker für die jeweiligen Kugeln ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit sind in Tabelle 18 als Übersicht dargestellt.

Instrument	PF Kugel A2 [mm]	PF Kugel B1 [mm]	PF Kugel B2 [mm]
Leica AT901 LR	0,024	0,173	0,018
FARO X v2	0,007	0,029	0,018

Tabelle 18: Ergebnisübersicht Antastabweichung Form

Bei der Betrachtung der Werte des FARO X v2 ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit (Abbildung 58) wird sichtbar, dass die Werte insgesamt sehr niedrig sind und wiederum innerhalb des vorgegebenen  $MPE_{PF}$  von  $18 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m}/\text{m}$  liegen. Und auch nach dem Anbringen der Unsicherheit (Tabelle 19) erfolgt keine Überschreitung des Grenzwertes.

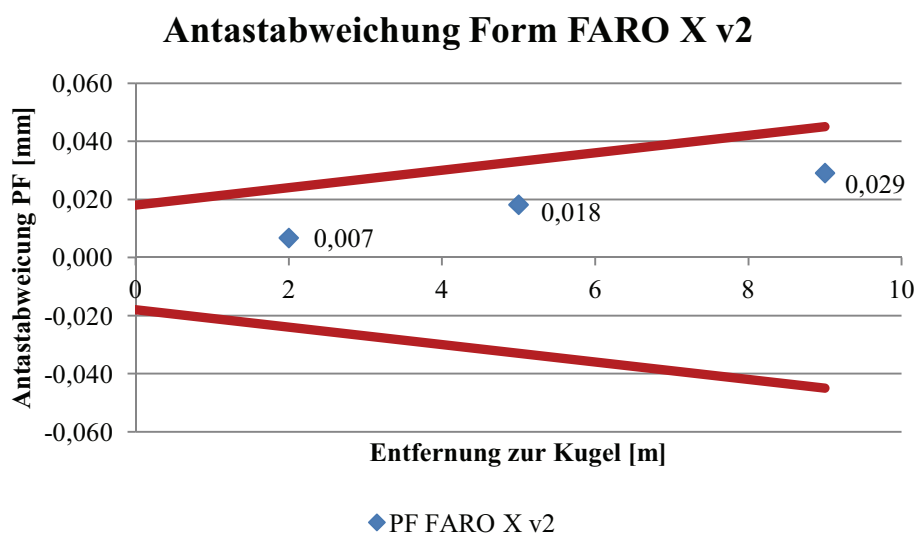


Abbildung 58: Antastabweichung Form FARO X v2

Prüfelement	um die Messunsicherheit erweiterte PF [mm]	$MPE_{PF}$ [mm]
Kugel_A2	0,004	0,024
	0,010	o.k.
Kugel_B2	0,014	0,033
	0,022	o.k.
Kugel_B1	0,023	0,045
	0,035	o.k.

Tabelle 19: Übersicht der um die Messunsicherheit erweiterte PF des FARO X v2

Insgesamt ist damit die gesamte Bestimmung der Antastabweichung des FARO X v2 erfolgreich abgeschlossen. Anders sieht dies bei dem Leica AT901 LR aus. Bereits die noch nicht um die Messunsicherheit erweiterten Messwerte liegen nur knapp innerhalb des Grenzwertes oder bereits weit außerhalb, wie die Kugel B1 mit 0,173 mm (Abbildung 59).

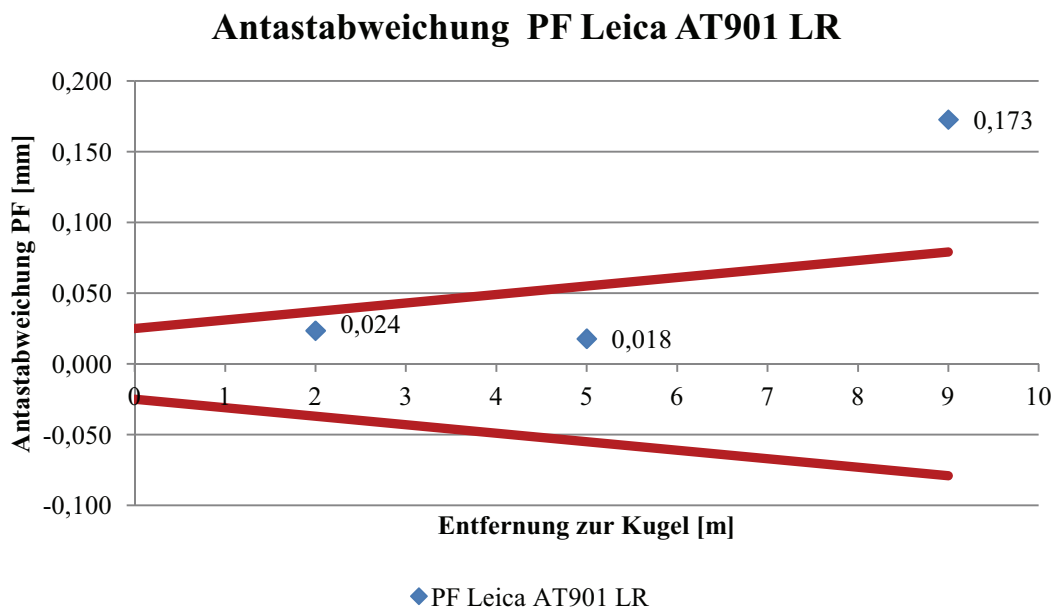


Abbildung 59: Antastabweichung Form Leica AT901 LR

Dadurch, dass die Auswertung aber auf den gleichen Datensätzen basiert, ist dies auch so zu erwarten gewesen. Dennoch sind die Abweichungen bei der Form wesentlich größer und liegen weit oberhalb des Grenzwertes. Die Werte an den Kugeln A2 und B2 liegen knapp innerhalb der Grenzwerte (Tabelle 20), sodass eine Wiederholungsmessung an der Position B1 durchgeführt werden kann. Durch die Wiederholungsmessung kann festgestellt werden, ob die große Abweichung durch einen Messfehler entstanden ist, oder ob der Lasertracker tatsächlich die Spezifikation nicht einhalten kann. Diese Kontrollmessung wurde im Zuge der Verifizierung der Testwand jedoch nicht durchgeführt. Für eine

umfassende und geschlossene Annahme- oder Bestätigungsprüfung des Lasertrackers müsste die gesamte Messung der Antastabweichung für den Leica AT901 LR wiederholt werden.

Prüfelement	um die Messunsicherheit korrigierte PS [mm]	$MPE_{PF}$ [mm]
Kugel_A2	0,021	0,027
	0,026	o.k.
Kugel_B2	0,014	0,045
	0,022	o.k.
Kugel_B1	0,167	0,069
	0,178	außerhalb

Tabelle 20: Übersicht der um die Messunsicherheit erweiterten PF des Leica AT901 LR

Nach der Testmessung der Antastabweichung ist für spätere Wiederholungsmessungen im Zuge des QM festzustellen, dass die Auswertung der Messdaten direkt vor Ort im Anschluss an die Messung durchgeführt werden muss. Dies ermöglicht eine sofortige Neumessung bei der Überschreitung eines Grenzwertes. Darüber hinaus sollte unbedingt eine kalibrierte Stahlkugel anstelle einer Messkugel als Prüfkörper verwendet werden. Dies bietet zum einen den Vorteil, dass die Abtastfläche größer ist und zum anderen, dass die Formabweichung des Prüfkörpers selbst noch kleiner ist und somit einen kleineren Teil zur gesamten Messunsicherheit beiträgt. Dieser Aspekt ist besonders dann wichtig, wenn die Messunsicherheit nur als Schätzwert bestimmt wird und nicht auf exakten Berechnungen beruht.

### 8.5.3 Synthetische Prüflänge

Die Messung der synthetischen Prüflänge ergab beim FARO X v2 für die rechnerisch bestimmte Prüflänge  $L_S$  einen Wert von 4068,796 mm. Die durch die Messsoftware kompensierten Prüflängen weisen im Mittel zu  $L_S$  eine sehr geringe Abweichung von -0,4  $\mu\text{m}$  auf. Daraus folgt, dass die an den Prüflängen der Längenmessabweichung anzubringenden Korrekturwerte  $E_{ki}$  ebenfalls sehr gering sind.

RL	Korrekturwert $E_{ki}$ [ $\mu\text{m}$ ]	RL	Korrekturwert $E_{ki}$ [ $\mu\text{m}$ ]	RL	Korrekturwert $E_{ki}$ [ $\mu\text{m}$ ]	RL	Korrekturwert $E_{ki}$ [ $\mu\text{m}$ ]
A1-A2	-0, 1	C1-C2	-0, 5	D2-D3	-0, 2	E2-E3	-0, 2
A1-A3	-0, 3	C1-C3	-1, 0	D2-D4	-0, 5	E2-E4	-0, 3
A2-A3	-0, 1	C2-C3	-0, 5	D3-D4	-0, 3	E3-E4	-0, 2
B1-B2	-0, 5	D1-D2	-0, 2	E1-E2	-0, 2		
B1-B3	-1, 0	D1-D3	-0, 5	E1-E3	-0, 3		
B2-B3	-0, 5	D1-D4	-0, 7	E1-E4	-0, 5		

Tabelle 21: Übersicht der Korrekturwerte  $E_{ki}$  mit dem FARO X v2

Die Tabelle 21 listet die Werte aller Prüflängen auf. Diese werden bei der Auswertung der Längenmessabweichung entsprechend berücksichtigt.

Bei der Messung der synthetischen Prüflänge mit dem Leica AT901 LR wurde die Werkstücktemperatur, wie bei der Durchführung und Auswertung beschrieben, von der Messsoftware automatisch bestimmt und rechnerisch berücksichtigt. Bei der Auswertung der Messdaten wird jedoch sichtbar, dass dies nicht funktioniert hat. Beim Vergleich der mittels Formel 8.3 und einer Werkstücktemperatur von 17,9 °C berechneten und der durch die Software bestimmten Prüflänge, treten Abweichungen von -92 µm auf. Dies wiederum führt zu erheblichen Korrekturwerten (Tabelle 22).

RL	Korrekturwert $E_{ki}$ [µm]	RL	Korrekturwert $E_{ki}$ [µm]	RL	Korrekturwert $E_{ki}$ [µm]	RL	Korrekturwert $E_{ki}$ [µm]
A1-A2	-33	C1-C2	-107	D2-D3	-51	E2-E3	-34
A1-A3	-65	C1-C3	-213	D2-D4	-107	E2-E4	-68
A2-A3	-33	C2-C3	-107	D3-D4	-56	E3-E4	-34
B1-B2	-107	D1-D2	-51	E1-E2	-34		
B1-B3	-213	D1-D3	-101	E1-E3	-68		
B2-B3	-107	D1-D4	-158	E1-E4	-101		

Tabelle 22: Übersicht der Korrekturwerte  $E_{ki}$  mit dem Leica AT901 LR

Aufgrund dessen, dass durch ältere Messungen bereits bekannt ist, dass die Messsoftware einige Probleme mit dem Temperatursgleich hat, wurde die Messung dahin gehend nochmals genauer betrachtet. Dabei konnte festgestellt werden, dass beim Temperatursgleich nicht der durch den angeschlossenen Temperaturfühler ermittelte Wert für die Werkstücktemperatur verwendet wurde, sondern der Standardwert von 20°C. Dies bedeutet zum einen, dass die gemessenen Werte keine Temperaturkorrektur erfahren haben, da die Differenz zwischen der Nulltemperatur und der gemessenen Temperatur Null ist. Daraus ergibt sich, dass der gesamte Verbesserungsterm entfällt. Zum anderen bedeutet das, dass die vorliegenden Messwerte nun mit der Formel 8.3 ebenfalls korrigiert werden müssen. Nach der rechnerischen Korrektur liegen die Abweichungen durchschnittlich nur noch bei 7 µm. Daraus ergeben sich dann folgende Korrekturwerte  $E_{ki}$  (Tabelle 23), die in die Berechnung der Längenmessabweichung eingebracht werden.

RL	Korrekturwert $E_{ki}$ [ $\mu\text{m}$ ]	RL	Korrekturwert $E_{ki}$ [ $\mu\text{m}$ ]	RL	Korrekturwert $E_{ki}$ [ $\mu\text{m}$ ]	RL	Korrekturwert $E_{ki}$ [ $\mu\text{m}$ ]
A1-A2	2	C1-C2	8	D2-D3	4	E2-E3	2
A1-A3	2	C1-C3	15	D2-D4	8	E2-E4	5
A2-A3	5	C2-C3	8	D3-D4	4	E3-E4	2
B1-B2	8	D1-D2	4	E1-E2	2		
B1-B3	15	D1-D3	7	E1-E3	5		
B2-B3	8	D1-D4	11	E1-E4	7		

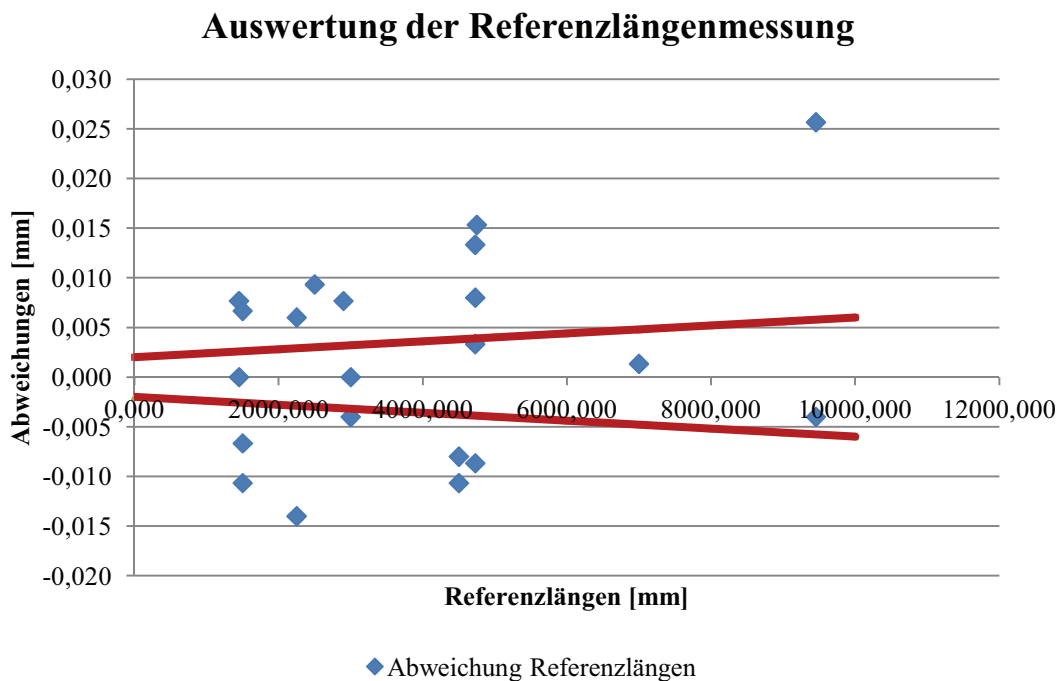
Tabelle 23: Übersicht der verbesserten Korrekturwerte  $E_{ki}$  mit dem Leica AT901 LR

Insgesamt ist festzustellen, dass bei der Bestimmung der synthetischen Prüflänge die Kompensation durch die Software stets kontrolliert werden muss. Dabei ist langfristig zu überlegen, ob die Messung der Werkstücktemperatur immer durch ein externes Thermometer bestimmt werden sollte. Das ist sinnvoll, da zum einen nicht ausreichend Werkstücktemperaturfühler für alle Lasertracker vorhanden sind und zum anderen somit der aufgetretene Fehler vermieden werden kann. Auch die Auswertung dieser Messung sollte direkt im Anschluss der Messung erfolgen, sodass ggf. eine sofortige Neumessung erfolgen kann.

#### 8.5.4 Referenzlängen

Zur Beurteilung der Referenzlängenmessung wird zunächst die interferometrische Streckenmessgenauigkeit des Lasertrackers FARO Xi betrachtet. Diese liegt bei  $2 \mu\text{m} + 0,4 \mu\text{m/m}$  und dient als Grenzwert zur Feststellung der Reproduzierbarkeit der Prüflängen. Liegt die Differenz zwischen der ersten und der Messung innerhalb dieses Wertes, sind die Prüflängen als stabil einzuschätzen.

Bei der Bestimmung der Referenzlängenmessung für die Verifizierung der Testwand wird ersichtlich, dass nur wenige Prüflängen die geforderte Grenze einhalten (Abbildung 60). Durch die zum Teil sehr erheblichen Abweichungen der Referenzlängen müsste im Zuge der Prüfmittelüberwachung die Messung der Referenzlängen sowie die der Istlängen wiederholt werden. Grund dafür ist, dass eine stabile und reproduzierbare Messung der Längen über den Prüfzeitraum hinweg noch nicht gegeben ist. In diesem konkreten Prüffall ist eine erneute Messung nicht erfolgt, sodass mit den vorliegenden Messergebnissen die weiterführende Auswertung der Längenmessabweichung durchgeführt wird.



**Abbildung 60: Abweichungen der Referenzlängen**

Die aufgetretenen Grenzwertüberschreitungen können verschiedenen Ursprungs sein. Erste Ursache kann die lange Zeitperiode zwischen den beiden Referenzlängenmessungen sein. Grund dafür ist zum einen, dass die Messung der Längen durch das Ausrichten der Spiegelkonstruktion sehr lange dauerte und zum anderen, dass dazwischen mit zwei Lasertrackern die Istlängen bestimmt worden sind. Das führte dazu, dass die Messpunkte an der Wand über zwei volle Tage stabil sein mussten.

Ein weiterer Grund für die Abweichungen kann die Ungeübtheit bei der Messdurchführung sein. Gerade bei den Messlinien C und B bedarf es einiger Übung, um reproduzierbare Strecken selbst bei nur drei hintereinander liegenden Messungen zu messen. Das liegt daran, dass die Messkugel, bedingt durch den schrägen Verlauf der Messlinien B und C und den zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln (zwei Leitern), bei der Bestimmung zweimal von einer Person zur anderen Person übergeben werden muss. Zur Eliminierung dieser Fehlerquelle und zur Optimierung der Messzeit ist zu überlegen, ob ggf. geeignetere Hilfsmittel zu verwenden sind.

Eine mögliche dritte Fehlerquelle ist das Einlegen der Messkugel in die Reflektorhalter bei der Istlängenmessung. Dadurch kann es zu Schwingungen der Wandkonstruktionen

kommen, die sich negativ auf die Position der Halterungen auswirken können. Daher sollte darauf geachtet werden, dass die Messkugel immer möglichst sanft eingelegt wird, sodass keine starken Schwingungen entstehen können.

Ein letzter möglicher Grund für die Abweichungen kann der leicht schwingende Boden sein. In der Testmessung Boden wurde bereits sichtbar, dass kleinere Schwankungen auftreten, die vor allem bei den Genauigkeitsanforderungen der Referenzlängenmessung zu Fehlern führen können. Aus diesem Grund sollten sich während der Messung nur so wenige Personen wie möglich im direkten Umfeld des Lasertrackers aufhalten.

### **8.5.5 Längenmessabweichung**

Die Längenmessabweichung gilt laut Vorschrift als eingehalten, wenn alle bestimmten Werte innerhalb des berechneten Grenzwertes ohne die erweiterte Messunsicherheit liegen. Bei maximal fünf abweichenden Messergebnissen ist eine Wiederholungsmessung derer erlaubt. In diesem Fall werden die betroffenen Längen dreimal neu gemessen, wovon maximal ein Wert oberhalb des Grenzwertes mit Messunsicherheit liegen darf. Für die Lage, in der die erneute Überschreitung auftritt, muss dann anschließend die betroffene Prüflänge nochmals zehnmal gemessen werden. Erst wenn all diese Messwerte innerhalb des Grenzwertes mit Messunsicherheit liegen, ist die Längenmessabweichung eingehalten.  
(31)

Die nachfolgende Tabelle 24 zeigt die Ergebnisse der Längenmessabweichung des Leica AT901 LR für alle Prüflängen. Die für die Annahmeprüfung bzw. für die Bestätigungsprüfung nach der VDI/VDE 2617 Blatt 10 notwendigen Prüflängen sind grau hervorgehoben und sollen als erstes betrachtet werden.

Nach der Betrachtung aller Standpunkte wird sichtbar, dass lediglich die Prüflänge E3-E4 bei LT2 und die Länge C1-C2 bei LT3 den vorgegeben Grenzwert von  $15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$  überschreiten (Anhang F). Dies hat zur Folge, dass im Zuge der Annahme- bzw. Bestätigungsprüfung diese beiden Prüflängen, wie in der Richtlinie beschrieben, erneut gemessen werden müssen. Sollten auch diese Wiederholungsmessungen den Grenzwert nicht einhalten, wäre die Annahmeprüfung bzw. die Überwachung nicht bestanden. In diesem Fall könnten die Referenzlängenmessungen und die Istlängenmessung wiederholt werden, um so eine Fehlmessung auszuschließen. Sollte es dann zu einer erneuten

Überschreitung der Grenzwerte kommen, sollte der Lasertracker unbedingt zur Kalibrierung eingeschickt werden.

	LT1			LT2			LT3			LT4			LT5			LT6			LT7		
	E	$MPE_P$		E	$MPE_P$		E	$MPE_P$		E	$MPE_P$		E	$MPE_P$		E	$MPE_P$		E	$MPE_P$	
	[ $\mu\text{m}$ ]	$\pm$ [ $\mu\text{m}$ ]	v	[ $\mu\text{m}$ ]	$\pm$ [ $\mu\text{m}$ ]	v	[ $\mu\text{m}$ ]	$\pm$ [ $\mu\text{m}$ ]	v	[ $\mu\text{m}$ ]	$\pm$ [ $\mu\text{m}$ ]	v	[ $\mu\text{m}$ ]	$\pm$ [ $\mu\text{m}$ ]	v	[ $\mu\text{m}$ ]	$\pm$ [ $\mu\text{m}$ ]	v	[ $\mu\text{m}$ ]	$\pm$ [ $\mu\text{m}$ ]	v
<b>A1-A2</b>	-8	24	v	-6	24	v	1	24	v	-9	24	v	-10	24	v	3	24	v	-12	24	v
<b>A1-A3</b>	8	32	v	20	32	v	30	32	v	18	32	v	28	32	v	29	32	v	2	32	v
<b>A2-A3</b>	2	24	v	11	24	v	15	24	v	12	24	v	24	24	x	12	24	v	-1	24	v
<b>B1-B2</b>	-5	43	v	25	43	v	-3	43	v	12	43	v	25	43	v	2	43	v	39	43	v
<b>B1-B3</b>	29	72	v	31	72	v	40	72	v	42	72	v	53	72	v	35	72	v	63	72	v
<b>B2-B3</b>	19	43	v	-9	43	v	28	43	v	15	43	v	12	43	v	18	43	v	9	43	v
<b>C1-C2</b>	38	43	v	27	43	v	45	43	x	25	43	v	1	43	v	11	43	v	14	43	v
<b>C1-C3</b>	43	72	v	49	72	v	68	72	v	58	72	v	32	72	v	58	72	v	53	72	v
<b>C2-C3</b>	-10	43	v	7	43	v	8	43	v	18	43	v	16	43	v	32	43	v	24	43	v
<b>D1-D2</b>	4	28	v	9	28	v	-7	28	v	-6	28	v	2	28	v	16	28	v	6	28	v
<b>D1-D3</b>	17	42	v	29	42	v	15	42	v	21	42	v	16	42	v	24	42	v	24	42	v
<b>D1-D4</b>	28	57	v	52	57	v	35	57	v	37	57	v	50	57	v	55	57	x	39	57	v
<b>D2-D3</b>	-1	29	v	5	29	v	8	29	v	12	29	v	-1	29	v	-6	29	v	3	29	v
<b>D2-D4</b>	10	44	v	27	44	v	28	44	v	29	44	v	33	44	v	24	44	v	19	44	v
<b>D3-D4</b>	-4	30	v	7	30	v	5	30	v	1	30	v	19	30	v	16	30	v	1	30	v
<b>E1-E2</b>	-1	24	v	-20	24	v	-14	24	v	-9	24	v	-1	24	v	-18	24	v	-23	24	x
<b>E1-E3</b>	8	33	v	-24	33	v	-23	33	v	-9	33	v	-28	33	v	-10	33	v	-10	33	v
<b>E1-E4</b>	1	42	v	-36	42	v	-10	42	v	-8	42	v	-4	42	v	-15	42	v	-20	42	v
<b>E2-E3</b>	-6	24	v	-19	24	v	-24	24	x	-15	24	v	-42	24	x	-8	24	v	-2	24	v
<b>E2-E4</b>	-13	33	v	-31	33	v	-11	33	v	-14	33	v	-18	33	v	-12	33	v	-12	33	v
<b>E3-E4</b>	-21	24	v	-27	24	x	-2	24	v	-14	24	v	9	24	v	-20	24	v	-25	24	x

E Längenmessabweichung                      x  $MPE_P$  überschritten  
 $MPE_P$  Maximum Permissible Error            v  $MPE_P$  eingehalten

**Tabelle 24: Ergebnisübersicht Längenmessabweichung Leica AT901 LR**

Für die Verifizierung der Wand ist eine Wiederholungsmessung nicht durchgeführt worden. Dafür werden im Folgenden aber alle Prüflängen aller Standpunkte betrachtet, um so die Stabilität der Testwand zu beurteilen. Insgesamt sind von den 147 gemessenen Längen acht außerhalb des Grenzwertes, wobei sieben eine Grenzwertüberschreitung von ca. zwei bis drei Mikrometer aufweisen und eine von ca. 18  $\mu\text{m}$ . Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Testwand für die Prüfmittelüberwachung, bei der die Genauigkeitsanforderungen nicht so hoch sind wie bei der Annahmeprüfung bzw. der



Bestätigungsprüfung, ausreichend stabil ist. Diese Schlussfolgerung wird durch die Testmessung mit dem FARO X v2 zusätzlich gestärkt, da die Auswertung der Längenmessabweichung für diesen Lasertracker ein ähnliches Ergebnis aufweist (Tabelle 25).

	LT1			LT2			LT3			LT4			LT5			LT6			LT7				
	E	MPEP		E	MPEP		E	MPEP		E	MPEP		E	MPEP		E	MPEP		E	MPEP			
		±			±			±			±			±			±			±			±
	[µm]	[µm]		[µm]	[µm]		[µm]	[µm]		[µm]	[µm]		[µm]	[µm]		[µm]	[µm]		[µm]	[µm]		[µm]	[µm]
A1-A2	-69	22	x	11	22	v	13	22	v	17	22	v	-4	22	v	27	22	x	12	22	v		
A1-A3	-146	27	x	17	27	v	24	27	v	37	27	x	24	27	v	27	27	x	27	27	v		
A2-A3	-82	22	x	1	22	v	7	22	v	16	22	v	24	22	x	-4	22	v	10	22	v		
B1-B2	-23	32	v	-24	32	v	-31	32	x	-10	32	v	4	32	v	-15	32	v	-12	32	v		
B1-B3	-139	46	x	-10	46	v	-26	46	v	33	46	v	28	46	v	8	46	v	6	46	v		
B2-B3	-121	32	x	9	32	v	0	32	v	38	32	x	18	32	v	18	32	v	12	32	v		
C1-C2	-138	32	x	0	32	v	-28	32	v	4	32	v	-17	32	v	5	32	v	19	32	v		
C1-C3	-139	46	x	21	46	v	-3	46	v	27	46	v	19	46	v	28	46	v	36	46	v		
C2-C3	-7	32	v	16	32	v	20	32	v	18	32	v	31	32	x	18	32	v	12	32	v		
D1-D2	-102	25	x	4	25	v	-9	25	v	3	25	v	-5	25	v	18	25	v	1	25	v		
D1-D3	-115	31	x	1	31	v	-3	31	v	17	31	v	2	31	v	5	31	v	4	31	v		
D1-D4	-117	39	x	-18	39	v	-3	39	v	28	39	v	16	39	v	21	39	v	-14	39	v		
D2-D3	-19	25	v	-9	25	v	1	25	v	10	25	v	2	25	v	-19	25	v	-2	25	v		
D2-D4	-21	32	v	-27	32	v	1	32	v	21	32	v	16	32	v	-3	32	v	-20	32	v		
D3-D4	-7	25	v	-24	25	v	-5	25	v	6	25	v	9	25	v	11	25	v	-23	25	v		
E1-E2	-19	22	v	6	22	v	13	22	v	4	22	v	-3	22	v	-18	22	v	11	22	v		
E1-E3	-29	27	x	11	27	v	6	27	v	18	27	v	9	27	v	-2	27	v	1	27	v		
E1-E4	-31	32	x	-4	32	v	10	32	v	22	32	v	14	32	v	13	32	v	11	32	v		
E2-E3	-15	22	v	0	22	v	-12	22	v	10	22	v	7	22	v	11	22	v	-14	22	v		
E2-E4	-17	27	v	-15	27	v	-8	27	v	13	27	v	12	27	v	26	27	v	-5	27	v		
E3-E4	-7	23	v	-19	23	v	-1	23	v	-1	23	v	0	23	v	11	23	v	4	23	v		

E Längenmessabweichung                      x  $MPE_p$  überschritten

$MPE_p$  Maximum Permissible Error                      v  $MPE_p$  eingehalten

**Tabelle 25: Ergebnisübersicht Längenmessabweichung FARO X v2**

Die Tabelle 25 zeigt deutlich, dass sehr große Grenzwertüberschreitungen auf dem Standpunkt LT1 aufgetreten sind. Diese liegen größtenteils weit oberhalb der Spezifikation, sodass davon ausgegangen werden muss, dass auf dem Standpunkt ein Fehler während der Messung aufgetreten ist. Die anderen Standpunkte hingegen weisen insgesamt nur sieben weitere Messwerte auf, die außerhalb des Grenzwertes liegen. Die Abweichungen liegen dabei durchschnittlich bei ca. vier Mikrometer, sodass die Testmessungen beider

Lasertracker, wie oben schon genannt, ähnliche Ergebnisse aufweisen. Eine Eignung der Testwand für die Prüfmittelüberwachung ist damit festgestellt.

Die Auswertung der Testmessung des FARO X v2 hinsichtlich der Annahme bzw. der Bestätigungsmessung nach der Richtlinie weist folgendes Ergebnis auf (Anhang F). Insgesamt liegen von den zur Auswertung herangezogenen Prüflängen sechs außerhalb des Grenzwertes, sodass laut Vorschrift an dieser Stelle keine Wiederholungsmessung zulässig ist. Wird jedoch berücksichtigt, dass der Standpunkt eins einen offensichtlichen Messfehler aufweist und daher nicht in die Beurteilung einbezogen wird, liegen nur noch drei Prüflängen außerhalb der Spezifikation. In diesem Fall kann eine Wiederholungsmessung durchgeführt werden und die Beurteilung des Lasertrackers ggf. noch positiv beendet werden. Bei einer erneuten Abweichung vom Grenzwert ist mit dem Lasertracker, wie bereits beim Leica AT901 LR beschrieben, zu verfahren.

Die aufgetretenen Abweichungen bei beiden Testmessungen liegen zwar größtenteils innerhalb der Grenzwerte, jedoch schwanken diese zum Teil doch stark. Um ein reproduzierbares Ergebnis zu erhalten, sollten folgende Aspekte bei zukünftigen Messungen berücksichtigt werden.

Für eine insgesamt kürzere Messzeit müssen nicht immer alle Messlinien von jedem Standpunkt aus aufgenommen werden. Es ist ausreichend nur die Linien zu messen, die in der Auswertung auch tatsächlich berücksichtigt werden. Bei den Testmessungen wurden alle Messlinien auf allen Standpunkten erfasst, damit ein umfangreicher Testdatensatz zu Beurteilung der Stabilität der Testwand vorliegt.

Worauf auch geachtet werden sollte, ist das sanfte Einlegen der Messkugeln in die Nester sowie eine kurze Pause vor der jeweiligen Messung, um starke Schwingungen der Wandhalterung zu vermeiden. Diese können sich negativ auf das Messergebnis auswirken.

Zusätzlich sollten die Punkte einer Messlinie auf einem Standpunkt in einer Orientierung immer direkt nacheinander bestimmt werden, sodass die Bedingungen für die Messzeit der Messlinie möglichst gleich sind. Darüber hinaus sollte die Reihenfolge der Messlinie so gewählt sein, dass die Laufwege möglichst kurz und damit auch die Messzeiten kurz sind. Dadurch kann die Messzeit insgesamt verkürzt werden und somit das Zeitintervall zwischen den Referenzlängenmessungen.

## 9. Prozessanweisung

Aufbauend auf den gesammelten Erfahrungen bei den Testmessungen ist abschließend eine Prozessanweisung (PA) entstanden. Diese unterteilt sich in vier Bereiche. Zunächst werden kurz und knapp das Ziel und der Zweck dieser bestimmten Prozessanweisung dargelegt und die verantwortlichen Funktionsbereiche aufgeführt. Im zweiten Teil der Anweisung werden die Arbeitsabläufe beschrieben und es wird angegeben, wer für die Durchführung der Einzelschritte verantwortlich ist. Im Anschluss erfolgt die Darstellung der beschriebenen Arbeitsschritte mit Hilfe eines Flussdiagramms. Und im letzten Bereich werden geltende Unterlagen aufgelistet, die für die Durchführung herangezogen werden können.

Die Prozessanweisung für die Bestimmung der Längenmessunsicherheit eines Lasertrackers wird nach den eben beschriebenen Aspekten erstellt und spiegelt im Wesentlichen die im Kapitel 7 beschriebenen Arbeitsschritte in Kurzform wieder. Für ein effizienteres Vorgehen bei der Durchführung der einzelnen Teilschritte sind in den „Mit geltenden Unterlagen der PA“ unterstützende Anweisungen zu finden. Dabei ist vor allem das Dokument *Aufstellung\_RL.pdf* zu erwähnen. Dies kann erheblich zu Verkürzung der Messzeit der Referenzlängen beitragen, da es durch Wort und Schrift die Positionen des Lasertrackers und der Spiegelkonstruktion beschreibt (Abbildung 61).

### Messlinie A:

#### Lasertrackerstandpunkt:

- Lasertracker ca. über LT1 aufbauen
- Rechtwinklig zum Punkt A3 aufbauen


#### Spiegelstandpunkt:

- Spiegel in der Verlängerung der Messlinie A unter dem Punkt A3 aufstellen
- Markierungen auf dem Boden für Grobausrichtung der Grundplatte nutzen



**Abbildung 61: Auszug aus *Aufstellung\_RL.pdf***

Die ausgearbeitete Prozessanweisung wird durch den QM-Beauftragten ins QMH eingearbeitet und stellt sich dann wie folgt dar.

	Prozessanweisung <b>Längenmessunsicherheit</b>	PA xx-xx Seite 1 von 2
---	---	---------------------------

**1 Ziel und Zweck**

Die PA Längenmessunsicherheit sichert die effiziente Durchführung der Bestimmung der Antastabweichung und der Längenmessabweichung im Zuge der Prüfmittelüberwachung

**1.1 Verantwortliche Funktionsbereiche**

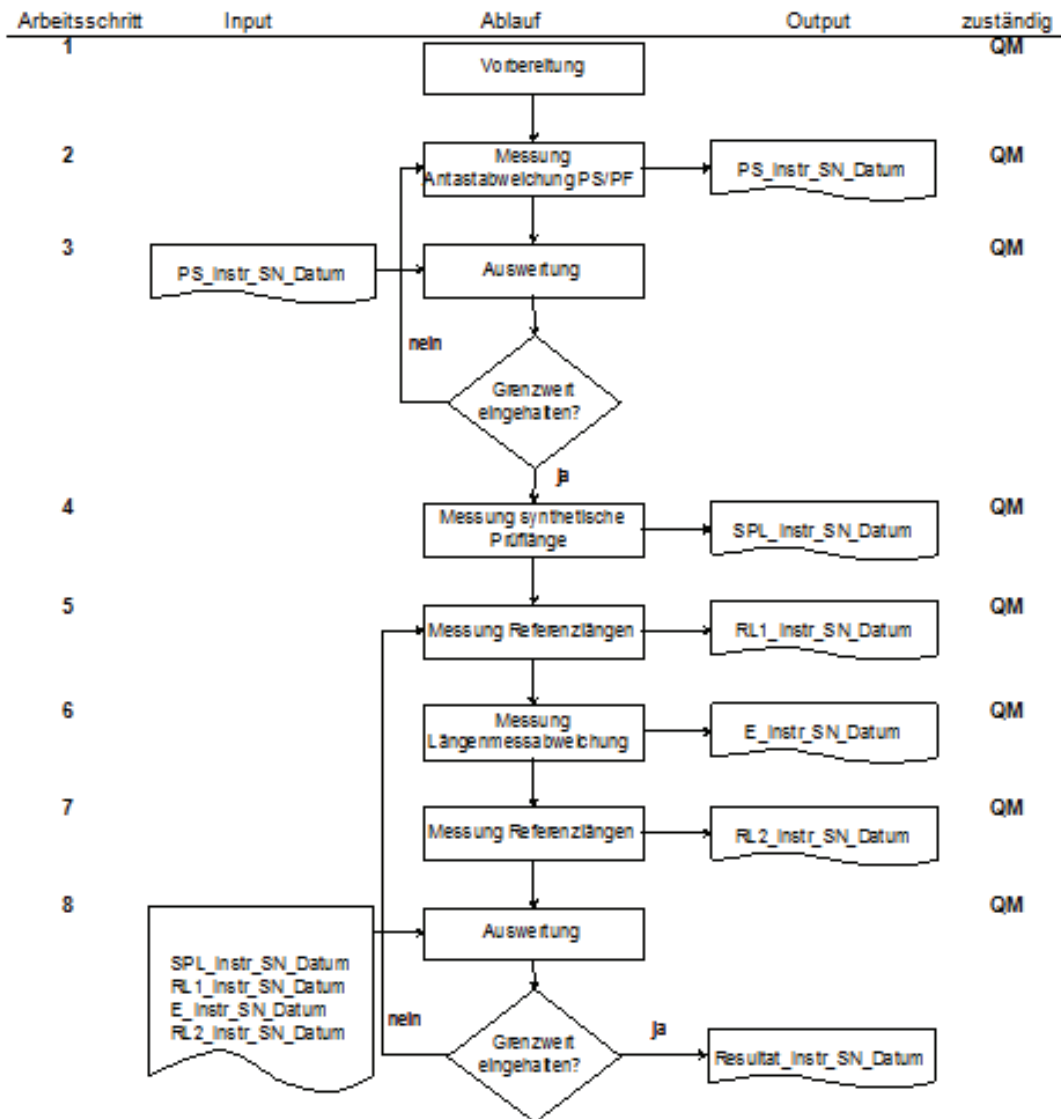
Das Qualitätsmanagement von AiMESS

**2 Beschreibung der Arbeitsabläufe**

Tätigkeit / Aktion	Verantwortung
1) 2-3 Stunden vor Messbeginn den Referenzlas ertracker und den zu prüfenden Lasertracker aufbauen und warmlaufen lassen. Integrations-/Messzeit auf 2000 ms stellen. Das Protokoll für die Betriebsarten und -bedingungen ausfüllen.	<b>QM</b>
2) Zu prüfenden Lasertracker auf Standpunkt LT1 aufstellen und Prüfkugel in Reflektorhalter A2 legen. Prüfkugel mit 25 Punkten gemäß Antastmuster (VDI/VDE 2617 Bl. 10) abtasten. Das gleiche Vorgehen mit der Prüfkugel in den Reflektorhaltern B1 und B2 wiederholen. Die gesamte Messung der Antastabweichung wird mit folgender Nomenklatur als Projekt gespeichert: PS_Instr_SN_Datum.	<b>QM</b>
3) Messdaten der Antastabweichung exportieren (PS_Instr_SN_Datum.txt) und in das Auswertefomular Resultat_Instr_SN_Datum in den Bereich Rohdaten Antastabweichung importieren. Kontrolle der Einhaltung der Grenzwerte.	<b>QM</b>
4) Festlegung der Prüflänge durch zwei Nester in einem Abstand von mindestens 4 m. Referenzlas ertracker in Verlängerung der Prüflänge aufbauen und die Koordinaten der beiden Punkte einmal bestimmen. Parallel dazu die Temperatur eines Stückstahls messen. Im Anschluss zu prüfenden Lasertracker an der gleichen Stelle aufbauen und die Koordinaten der Punkte dreimal bestimmen. Dabei den Temperatenausgleich in der Messsoftware einschalten und die entsprechenden Temperaturfühler anschließen. Die Speicherung der Daten erfolgt unter folgendem Namen: SPL_Instr_SN_Datum.	<b>QM</b>
5) Den Referenzlas ertracker auf der jeweils vorgesehenen markierten Position aufstellen und das Spiegeltool entsprechend zur Messlinie ausrichten (Aufstellung RL). Im Anschluss die Messlinienpunkte dreimal interferometrisch messen. Für ein effizientes Vorgehen die Messlinien in der Reihenfolge A, B, D, E, C messen. Die Speicherung des Projektes erfolgt unter dem Namen RL1_Instr_SN_Datum.	<b>QM</b>
6) Den zu prüfenden Lasertracker nacheinander über die sieben am Boden markierten Standpunkte aufbauen (LT1-LT7) und jeweils alle Messlinienpunkte in den Orientierungen 000°, 120° und 240° messen. Die Speicherung des Projektes erfolgt unter dem Namen E_Instr_SN_Datum.	<b>QM</b>
7) Wiederholung der Vorgehensweise aus Schritt 5. Die Speicherung des Projektes erfolgt unter dem Namen RL2_Instr_SN_Datum.	<b>QM</b>
8) Export aller Messdaten aus den jeweiligen Projekten in einzelne txt-Dateien (SPL_Instr_SN_Datum.txt, RL1_Instr_SN_Datum.txt, E_Instr_SN_Datum.txt und RL2_Instr_SN_Datum.txt). Import dieser Dateien in das Auswertefomular Resultat_Instr_SN_Datum.xlsx an die jeweils dafür vorgesehenen Tabellen. Kontrolle der Einhaltung der Grenzwerte.	<b>QM</b>

PA_Längenmessunsicherheit	Stand 001 vom 23.07.2012
---------------------------	--------------------------

### 3 Ablaufdiagramm



### 4 Mit geltende Unterlagen

- Formular Betriebsarten und Betriebsbedingungen: Betriebsart\_Betriebsbedingung.xlsx
- Formular für gesamte Auswertung: Resultat\_Instr\_SN\_Datum.xlsx
- Nomenklatur: Nomenklatur\_Längenmessunsicherheit.pdf
- Messaufbau: VDI/VDE 2617 Blatt 10, Seite 23
- Antastmuster: VDI/VDE 2617 Blatt 10, Seite 5
- Aufstellung für Referenzlängen: Aufstellung\_RL.pdf

## 10. Schlussfolgerung und Ausblick

Die zur Verifizierung durchgeführten Testmessungen an der installierten Testwand und die im Anschluss durchgeführten Auswertungen können noch nicht zeigen, dass die Referenzwand den Anforderungen der VDI/VDE 2617 Blatt 10 genügt. Für eine interne Prüfmittelüberwachung im Zuge des Qualitätsmanagements hingegen ist die Testwand jedoch geeignet, da grobe Genauigkeitsabweichungen des Lasertrackers durch die Messung an der Referenzwand aufgedeckt werden können. Die durchgeführte Verifizierung der Testwand hat vereinzelt noch Verbesserungspotential für einzelne Teilmessungen hervorgebracht. Die möglichen Maßnahmen sind in der Auswertung bereits angesprochen worden, sollen an dieser Stelle jedoch abschließend nochmal dargestellt werden.

Für eine zügige Messung der Referenzlängen wäre eine Spiegelkonstruktion von Vorteil, die durch Drehschrauben geneigt und gekippt werden kann. Dies würde die Einstellzeit erheblich verringern, da so eine Drehung und Kippung wesentlich präziser vorgenommen werden könnte, als mit der verwendeten Konstruktion. Desweiteren ist zu überlegen, ob die Messung der Messlinien C und B durch weitere geeignete Hilfsmittel vereinfacht werden kann, sodass die Messung auch von einer Person durchgeführt werden kann. Eine Möglichkeit wäre zum Beispiel eine begehbare Rampe, die eine solche Neigung aufweist, dass eine Person ohne Probleme den schrägen Verlauf der Messlinie verfolgen kann ohne, dass eine Übergabe der Messkugel erfolgen muss.

Zur Steigerung der Reproduzierbarkeit der Messwerte sollte während allen Teilmessungen darauf geachtet werden, dass das Einlegen der Messkugel so erfolgt, dass keine starken Vibrationen an den Wandhalterungen auftreten. Zusätzlich dazu sollte zwischen dem Einlegen und der Auslösung der Messung einige Sekunden gewartet werden, sodass eventuell aufgetretene Schwingungen nicht mehr mit in die Messung eingehen.

Ebenfalls zu beachten ist, dass immer alle Messpunkte einer Messlinie direkt hintereinander gemessen werden. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Bedingungen für die jeweilige Messlinie wenigstens annähernd gleich sind und nicht zu sehr schwanken.

Insgesamt ist bei allen Messungen anzustreben, dass diese möglichst zügig durchgeführt werden, damit sich eventuell auftretenden Umgebungsänderungen nicht so stark auf die Messungen auswirken können.

Zur endgültigen Feststellung der Eignung der Testwand für die Annahme- und Bestätigungsprüfung von Lasertrackern sollten noch weitere Testmessungen mit den angeführten Verbesserungsvorschlägen durchgeführt werden.

Das durch die VDI/VDE 2617 Blatt 10 vorgestellte Prüfverfahren ermöglicht die Beurteilung von Lasertrackern hinsichtlich der Antastabweichung und der Längenmessabweichung. Wird der Lasertracker jedoch nicht nur als 3D-Lösung verwendet, sondern auch als Multisensor, kann zusätzlich auch eine Prüfung der Multisensorik erfolgen. Das dafür festgelegte Prüfverfahren sollte ebenfalls ins Qualitätsmanagement aufgenommen werden, sofern die Lasertracker als Multisensoren eingesetzt werden.

## **Begriffserläuterungen**

### **Annahmeprüfung:**

Für jeden Lasertracker werden vom Hersteller spezifizierte Grenzwerte für die Kenngrößen Antastabweichung und Längenmessabweichung geliefert, welche vom Anwender durch eine Annahmeprüfung festgestellt werden können. (31)

### **Antastabweichung**

Die Antastabweichung beschreibt das „Abweichungsverhalten eines Lasertrackers in einem sehr kleinen Teil des Messvolums“ (2617 Bl. 10, S. 4) und wird unterschieden in die Antastabweichung Form (PF), Maß (PS) und Ort (PL). Zur Bestimmung der Antastabweichung wird an einem Kugelnorm gemessen. (31)

### **Antastabweichung Form (PF):**

Unter der Antastabweichung Form wird „die Spanne der radialen Abstände der Messpunkte von einer berechneten Ausgleichskugel“ (31) verstanden.

### **Antastabweichung Maß (PS):**

Die Antastabweichung Maß „ergibt sich aus der Differenz des berechneten Durchmessers der Ausgleichskugel und des kalibrierten Durchmessers der Prüfkugel“ (31).

### **Antastabweichung Ort (PL):**

Die Antastabweichung Ort „ist gleich dem maximalen Abstand zweier, durch Ausgleichung ermittelter Mittelpunktskordinaten einer ortsfesten Prüfkugel, deren Position mit unterschiedlichen Messkugelreflektoren/Tastern gemessen wurde.“ (31).

### **Audit:**

Ein Audit ist eine systematische und unabhängige Untersuchung durch die festgestellt werden soll, ob die geplanten Vorgaben effizient verwirklicht und zielführend für die Qualitätsziele umgesetzt sind. Die Prüfung kann dabei intern durch eine betriebsinterne Person oder extern von einem Betriebsfremden erfolgen, wodurch es zur Unterteilung in interne und externe Audits kommt. Eine weitere Einteilung entsteht durch das zu prüfende Element des Qualitätsmanagementsystems. (11)

### **Betriebsarten:**



Hinter dem Begriff Betriebsarten verstecken sich die Einstell- und Konfigurationsmöglichkeiten. Dazu zählt z.B. die Art der Längenmessung und die Art und Form des Retroreflektors. (31)

**Betriebsbedingungen:**

Hinter dem Begriff Betriebsbedingungen verstecken sich die äußeren Einflussfaktoren, die auf eine Lasertrackermessung einwirken. Dazu zählt z.B. Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte. (31)

**Brechzahlkompensation:**

Bei interferometrischen Messungen in der Luft wird die Luftbrechzahl entlang des Strahlengangs benötigt und um die wiederum bestimmen zu können, müssen Lufttemperatur, Luftdruck und die relativen Luftfeuchte bestimmt werden. Mittels dieser Größen und der empirischen Formel nach Edlén kann die Brechzahl bestimmt werden. Lasertracker führen diese Kompensation geräteintern durch und erhalten die dafür benötigten Daten durch eine angeschlossene Metrostation oder durch Messungen durch den Anwender.

**CTE – Coefficient of Thermal Expansion:**

CTE ist die Abkürzung für den thermischen Ausdehnungskoeffizienten, welcher bei Lasertrackermessungen unter bestimmten Bedingungen berücksichtigt werden muss. Die Berücksichtigung erfolgt im Zuge dieser Masterarbeit durch die Messung einer „synthetischen“ Prüflänge.

**Längenmessabweichung (E):**

Diese Abweichung beschreibt „das dreidimensionale Abweichungsverhalten des Lasertrackers im spezifizieren Messvolumen“ (28) und bestimmt die Abweichung mit der die Länge einer Maßverkörperung bestimmt werden kann. (31)

**Lasertracker - Längenmessung:**

Eine Längenmessung mit dem Lasertracker kann zum einen durch ein Interferometer (IFM) erfolgen oder zum andern mit einem Absolutdistanzmesser (ADM). Beide Verfahren haben ihre Vor- und Nachteile und können je nach Messaufgabe eingesetzt

werden. Zur Steigerung der Effizienz hat Leica Geosystems ein „Absolutinterferometer“ (AIFM) entwickelt, welches die Stärken beider Verfahren kombiniert. (42)

**Überwachung:**

Zur Sicherung einer gleichbleibenden Qualität kann der Anwender seine Lasertracker innerhalb selbstfestgelegter Zeitspannen zwischenprüfen und somit die Kenngrößen überprüfen. Dieser Vorgang wird als Überwachung bezeichnet. (31)

**Zeeman-Aufspaltung:**

Durch Anlegen eines externen Magnetfeldes kann eine atomare Spektrallinie in mehrere Linien aufgespalten werden. Das Phänomen wird als Zeeman-Effekt bezeichnet. (43)

---

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Aufgabenbereiche des Qualitätsmanagements (8).....	16
Abbildung 2: Prozessmodel nach DIN EN ISO 9001:2008 (2).....	18
Abbildung 3: QM-Pyramide / Dokumentationspyramide (11) .....	19
Abbildung 4: Erweiterte QM-Pyramide (11).....	20
Abbildung 5: Konstruktive Interferenz bei gleicher Amplitude (13) .....	23
Abbildung 6: Destruktive Interferenz bei gleicher Amplitude (13).....	23
Abbildung 7: Zeitliche und räumliche Kohärenz (14).....	23
Abbildung 8: Aufbau Michelson-Interferometer (17).....	25
Abbildung 9: Zwei-Frequenz-Interferometer (17).....	27
Abbildung 10: Aufbau Winkelencoder (19).....	29
Abbildung 11: Verhältnis Winkel- und Streckenmessgenauigkeit (20) .....	30
Abbildung 12: Aufbau Lasertracker (21).....	31
Abbildung 13: Messelemente (27).....	31
Abbildung 14: Leica AT901 mit T-Cam und T-Probe (24) .....	32
Abbildung 15: Leica AT901 mit T-Cam und T-Scan (25).....	32
Abbildung 16: Leica T-Mac (26) .....	32
Abbildung 17: Aufbau Softwareoberfläche Metrolog .....	37
Abbildung 18: Leica Absolute Tracker AT901 LR.....	39
Abbildung 19: Leica Absolute Tracker AT401 .....	40
Abbildung 20: FARO Laser Tracker Xi .....	40
Abbildung 21: FARO Laser Tracker X v2 .....	40

---

Abbildung 22: FARO Reflektoren (37).....	41
Abbildung 23: Leica Reflektoren (38) .....	41
Abbildung 24: Leica AT MeteoStation (38).....	42
Abbildung 25: Spiegelkonstruktion in der Frontanschicht.....	43
Abbildung 26: Spiegelkonstruktion mit Verstellerschrauben für die Längs- und Querachse.....	43
Abbildung 27: Testwand mit Wandpunkten und Messlinien .....	44
Abbildung 28: Übersicht Lasertrackerstandpunkte .....	45
Abbildung 29: Gesamtgebäude mit Messhalle .....	47
Abbildung 30: Schematischer Grundriss Messhalle .....	47
Abbildung 31: Messhalleneingang.....	48
Abbildung 32: Rot markierte Wand.....	48
Abbildung 33: Grün markierte Wand .....	48
Abbildung 34: Grün markierte Wand und zweites Tor .....	48
Abbildung 35: Seitenansicht der Wandhalterung.....	52
Abbildung 36: Koordinatensystem der Testwand .....	52
Abbildung 37: Absteckung der Wandpunkte.....	54
Abbildung 38: Detailansicht Absteckung .....	54
Abbildung 39: Anzeige der Absteckabweichung.....	54
Abbildung 40: Wandhalterung am Messpunkt M.....	56
Abbildung 41: Wandhalterung von der Seite .....	56
Abbildung 42: Koordinatensystem zur Ausrichtung der Stahlplatten .....	58

---

Abbildung 43: Gesamtübersicht Messaufbau .....	61
Abbildung 44: Markierung der Standpunkte .....	61
Abbildung 45: Beschriftung der Wandpunkte .....	61
Abbildung 46: Messung der Antastabweichung.....	65
Abbildung 47: Messaufbau der synthetischen Prüflänge.....	66
Abbildung 48: Halbe Stahlkugel mit markiertem Mittelpunkt .....	68
Abbildung 49: Angestrebter Strahlenverlauf nach der Ausrichtung der Spiegelkonstruktion .....	69
Abbildung 50: Einspielen des Punktes A3.....	70
Abbildung 51: Auftreffpunkt des Laserstrahls an der Messhallendecke .....	70
Abbildung 52: Laserstrahl auf Punkt A3 eingestellt .....	71
Abbildung 53: Grüne Kontrollleuchte des Lasertrackers .....	71
Abbildung 54: Orientierungen des Lasertrackers .....	72
Abbildung 55: Radiale Spanne am Beispiel eines Kreises .....	74
Abbildung 56: Antastabweichung Maß FARO X v2 .....	79
Abbildung 57: Antastabweichung Maß Leica AT901 LR .....	80
Abbildung 58: Antastabweichung Form FARO X v2.....	81
Abbildung 59: Antastabweichung Form Leica AT901 LR .....	82
Abbildung 60: Abweichungen der Referenzlängen.....	86
Abbildung 61: Auszug aus Aufstellung_RL.pdf.....	91

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Namenszusammensetzung DIN EN ISO 9000 .....	11
Tabelle 2: Externe Gründe und Ziele für die Entwicklung und Einführung eines wirksamen QMS (2).....	13
Tabelle 3: Interne Gründe und Ziele für die Entwicklung und Einführung eines wirksamen QMS (2).....	14
Tabelle 4: Einteilung Interferometer (15).....	24
Tabelle 5: Übersicht Leica AT901 Modelle (33).....	38
Tabelle 6: Einfluss der atmosphärischen Parameter auf die Brechzahl n (40) .....	42
Tabelle 7: Auswertung Bodenmessung.....	51
Tabelle 8: Koordinatenliste der Wandpunkte.....	53
Tabelle 9: Ergebnisse der Absteckung.....	55
Tabelle 10: Testmessung der Stabilität der Wandhalterung.....	57
Tabelle 11: Koordinaten zur Ausrichtung der Stahlplatten .....	58
Tabelle 12: Istkoordinaten der Wandpunkte nach der Ausrichtung .....	59
Tabelle 13: Übersicht Kontrollmessungen vom 07.08.2012 .....	60
Tabelle 14: Übersicht Kontrollmessung vom 11.06.2012 .....	60
Tabelle 15: Ergebnisübersicht Antastabweichung Maß.....	78
Tabelle 16: Übersicht der um die Messunsicherheit erweiterten PS des FARO X v2 .....	80
Tabelle 17: Übersicht der um die Messunsicherheit erweiterten PS des Leica AT901 LR .....	81
Tabelle 18: Ergebnisübersicht Antastabweichung Form .....	81

---

Tabelle 19: Übersicht der um die Messunsicherheit erweiterte PF des FARO X v2 .....	82
Tabelle 20: Übersicht der um die Messunsicherheit erweiterten PF des Leica AT901 LR .....	83
Tabelle 21: Übersicht der Korrekturwerte <i>Eki</i> mit dem FARO X v2 .....	83
Tabelle 22: Übersicht der Korrekturwerte <i>Eki</i> mit dem Leica AT901 LR.....	84
Tabelle 23: Übersicht der verbesserten Korrekturwerte <i>Eki</i> mit dem Leica AT901 LR.....	85
Tabelle 25: Ergebnisübersicht Längenmessabweichung Leica AT901 LR.....	88
Tabelle 26: Ergebnisübersicht Längenmessabweichung FARO X v2 .....	89

## Literaturverzeichnis

1. **AiMESS Services GmbH.** [www.aimess.de](http://www.aimess.de). [Online] [Zitat vom: 15. März 2012.]  
<http://www.aimess.de/de/services/unternehmen.php>.
2. **Starke, Lothar und Brückner, Claudia.** *Qualitätsmanagement Digitale Fachbibliothek*. [Hrsg.] Gerd F. Kamiske. s.l. : Symposion Publishing GmbH, 21. Februar 2008. Grundzüge des Qualitätsmanagements.
3. **quality-Datenbank Klaus Gebhardt e.K.** [www.quality.de](http://www.quality.de). [Online] [Zitat vom: 15. März 2012.] <http://www.quality.de/lexikon/signlex.htm>.
4. **Starke, Lothar und Brückner, Claudia.** *Qualitätsmanagement Digitale Fachbibliothek*. [Hrsg.] Gerd F. Kamiske. s.l. : Symposion Publishing GmbH, 21. 2 2008. Grundzüge des Qualitätsmanagements. S. 2.
5. —. *Qualitätsmanagement Digitale Fachbibliothek*. [Hrsg.] Gerd F. Kamiske. s.l. : Symposion Publishing GmbH, 21. 2 2008. Grundzüge des Qualitätsmanagements. S. 4.
6. —. *Qualitätsmanagement Digitale Fachbibliothek*. [Hrsg.] Gerd F. Kamiske. s.l. : Symposion Publishing GmbH, 21. 2 2008. Grundzüge des Qualitätsmanagements. S. 5.
7. **Brückner, Claudia.** *Qualitätsmanagement Digitale Fachbibliothek*. [Hrsg.] Gerd F. Kamiske. s.l. : Symposion Publishing GmbH, 21. Februar 2008. Lexikon Qualitätsmanagement. Qualität (Bedeutung).
8. **Starke, Lothar und Brückner, Claudia.** *Qualitätsmanagement Digitale Fachbibliothek*. [Hrsg.] Gerd F. Kamiske. s.l. : Symposion Publishing GmbH, 21. Februar 2008. Aufgabenbereiche des Qualitätsmanagements. Folie 1-21.
9. **Janko, Christian.** [www.anleiten.de](http://www.anleiten.de). [Online] 3 2005. [Zitat vom: 14. März 2012.]  
<http://www.anleiten.de/qmsysteme/qmsysteme.html>.
10. **Stenkamp, Ursel.** Einführung ISO 9000 ff. [Online] 08. Januar 2009. [Zitat vom: 2012. 4 18.] [http://www.aewb-nds.de/cms/images/stories/Qualitaetsmanagement/einfuehrung\\_iso\\_9001.pdf](http://www.aewb-nds.de/cms/images/stories/Qualitaetsmanagement/einfuehrung_iso_9001.pdf).



- 
11. **Zingel, Harry.** Qualitätsmanagement und die ISO 9000er Normenfamilie. [Online] 2000 - 2009. [Zitat vom: 16. März 2012.]  
<http://hprichter.de/download/Qualitaetsmanagement.pdf>. S. 24ff.
  12. **Kolbe, Rudolf.** Dem Mikrometer hinterher – der Einsatz von Lasertrackern in der Industrievermessung. [Online] 27. 11 2008. [Zitat vom: 27. März 2012.]  
<http://www.mplusm.at/ifg/OBG09/Kolbe.pdf>. S. 1.
  13. **a.o.Prof.Dr. Lichtscheidl, Irene K.** www.univie.ac.at. [Online] [Zitat vom: 27. März 2012.]  
[http://www.univie.ac.at/mikroskopie/1\\_grundlagen/optik/wellenoptik/5b\\_destruktiv.htm](http://www.univie.ac.at/mikroskopie/1_grundlagen/optik/wellenoptik/5b_destruktiv.htm).
  14. **Gross, R.** [Online] [Zitat vom: 28. März 2012.]  
[http://www.wmi.badw.de/teaching/Lecturenotes/Physik3/Gross\\_Physik\\_III\\_Kap\\_6.pdf](http://www.wmi.badw.de/teaching/Lecturenotes/Physik3/Gross_Physik_III_Kap_6.pdf). S. 304.
  15. **Ruf, Bettina und Borst, Holger.** Das Michelson-Interferometer - Grundlagen und Anwendung. [Online] 10. Mai 1999. [Zitat vom: 28. März 2012.]  
<http://www.hausarbeiten.de/faecher/vorschau/96355.html#inside>.
  16. **Gohlke, Martin.** Ein hochsymmetrisches Heterodyninterferometer zur Demonstration einer optischen Auslesung der Inertialsensoren des weltraumbasierten Gravitationswellendetektors LISA. [Online] Juli 2007. [Zitat vom: 28. März 2012.]  
[http://www.physik.hu-berlin.de/qom/publications/pdfs/DA\\_Martin\\_Gohlke.pdf](http://www.physik.hu-berlin.de/qom/publications/pdfs/DA_Martin_Gohlke.pdf). S. 28.
  17. **Dr. Aulfes, H. und Prof. Dr. Ziegler, H.** Skriptum zur Vorlesung:PHYSIKALISCHE MESSTECHNIK B. [Online] 1998. [Zitat vom: 28. März 2012.] [http://groups.uni-paderborn.de/physik/studieninfos/praktika/versuche\\_anleitungen/messmethoden/mtb\\_kape.pdf](http://groups.uni-paderborn.de/physik/studieninfos/praktika/versuche_anleitungen/messmethoden/mtb_kape.pdf). S. 18 ff.
  18. **Lösler, Michael.** Laserscanning Michael Lösler. [Online] [Zitat vom: 2. 5 2012.]  
<http://home.arcor.de/laserscanner/index.html>.
  19. **Leica Geosystems AG.** Leica TS30 White Paper. [Online] 2009. [Zitat vom: 19. 4 2012.] [http://www.leica-geosystems.de/downloads123/zz/tps/general/white-tech-paper/WhitePaper\\_TS30\\_de.pdf](http://www.leica-geosystems.de/downloads123/zz/tps/general/white-tech-paper/WhitePaper_TS30_de.pdf). S. 6.

20. **Birkle, Stefan.** Einsatzmöglichkeiten von Lasertrackern zur Prüfung der räumlichen Lage von Gießsegmenten einer Brammengießanlage. [Online] [Zitat vom: 20. 4 2012.] [http://www.hochschule-bochum.de/fileadmin/media/fb\\_v/labore/photogrammetrie/Absolventen/Diplomarbeit\\_Birkle.pdf](http://www.hochschule-bochum.de/fileadmin/media/fb_v/labore/photogrammetrie/Absolventen/Diplomarbeit_Birkle.pdf). S. 16.
21. **Niebauer, Frank.** Untersuchungen zur Nutzung eines Spiegeltools zur indirekten Anzielung von verdeckten Punkten mittels lasertracker. Neubrandenburg : s.n., August 2009. S. 22ff.
22. **Bridges, Bob und Hagan, Kevin.** Laser Tracker Maps Three-Dimensional Features. [Online] 22. Mai 2002. [Zitat vom: 29. März 2012.] <http://www.aip.org/tip/INPHFA/vol-7/iss-4/p28.pdf>. S. 28ff.
23. **Hexagon Metrology.** The Leica Absolute Interferometer. [Online] 2. Dezember 2008. [Zitat vom: 30. März 2012.] [http://www.leica-geosystems.com/downloads123/m1/metrology/general/white-tech-paper/Leica%20Absolute%20Interferometer\\_white%20paper\\_en.pdf](http://www.leica-geosystems.com/downloads123/m1/metrology/general/white-tech-paper/Leica%20Absolute%20Interferometer_white%20paper_en.pdf).
24. —. [Online] 2012. [Zitat vom: 15. 8 2012.] [http://www.google.de/imgres?um=1&hl=de&client=firefox-a&sa=N&rls=org.mozilla:de:official&biw=1760&bih=872&tbn=isch&tbnid=RA104ceMLB3afM:&imgrefurl=http://www.hexagonmetrology.de/Leica-T-Probe\\_281.htm&docid=TpaCdNhQFpoDKM&imgurl=http://www.hexagonmetrology](http://www.google.de/imgres?um=1&hl=de&client=firefox-a&sa=N&rls=org.mozilla:de:official&biw=1760&bih=872&tbn=isch&tbnid=RA104ceMLB3afM:&imgrefurl=http://www.hexagonmetrology.de/Leica-T-Probe_281.htm&docid=TpaCdNhQFpoDKM&imgurl=http://www.hexagonmetrology).
25. —. [Online] 2012. [Zitat vom: 15. 8 2012.] [http://www.google.de/imgres?um=1&hl=de&client=firefox-a&sa=N&rls=org.mozilla:de:official&biw=1760&bih=872&tbn=isch&tbnid=XEwLsV25hL2P-M:&imgrefurl=http://www.hexagonmetrology.de/Leica-T-Scan\\_280.htm&docid=uL4DpymuJuG1VM&imgurl=http://www.hexagonmetrology..](http://www.google.de/imgres?um=1&hl=de&client=firefox-a&sa=N&rls=org.mozilla:de:official&biw=1760&bih=872&tbn=isch&tbnid=XEwLsV25hL2P-M:&imgrefurl=http://www.hexagonmetrology.de/Leica-T-Scan_280.htm&docid=uL4DpymuJuG1VM&imgurl=http://www.hexagonmetrology..)
26. —. [Online] 2012. [Zitat vom: 15. 8 2012.] [http://www.google.de/imgres?um=1&hl=de&client=firefox-a&sa=N&rls=org.mozilla:de:official&biw=1760&bih=872&tbn=isch&tbnid=XEwLsV25hL2P-M:&imgrefurl=http://www.hexagonmetrology.de/Leica-T-Scan\\_280.htm&docid=uL4DpymuJuG1VM&imgurl=http://www.hexagonmetrology..](http://www.google.de/imgres?um=1&hl=de&client=firefox-a&sa=N&rls=org.mozilla:de:official&biw=1760&bih=872&tbn=isch&tbnid=XEwLsV25hL2P-M:&imgrefurl=http://www.hexagonmetrology.de/Leica-T-Scan_280.htm&docid=uL4DpymuJuG1VM&imgurl=http://www.hexagonmetrology..)

27. **Prof. Dr.-Ing. Runne, Heinz.** Lasertracker - Folien zum Vertiefungsmodul Ingenieurvermessung. 1. 4 2012.
28. **Optical Metrology Centre.** OMC Technical Brief - Laser Tracker. [Online] 13. 12 2001. [Zitat vom: 13. 4 2012.] [http://www.optical-metrology-centre.com/Downloads/Tech\\_Briefs/TechBrief\\_LaserTracker.pdf](http://www.optical-metrology-centre.com/Downloads/Tech_Briefs/TechBrief_LaserTracker.pdf). S. 2.
29. **VDI - Verein Deutscher Ingenieure.** VDI Richtlinien FAQ. [Online] [Zitat vom: 27. 4 2012.] <http://www.vdi.de/7746.0.html>.
30. —. Worauf wir achten. [Online] [Zitat vom: 27. 4 2012.] <http://www.vdi.de/46243.0.html>.
31. **VDI/VDE, Fachbereich Fertigungsmesstechnik.** VDI/VDE 2617 Blatt 10. [Hrsg.] VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik. s.l. : Beuth Verlag, Januar 2011.
32. **Leica Geosystems AG.** Metrolog XG for Leica. [Online] [Zitat vom: 27. 4 2012.] [http://www.leica-geosystems.com/de/Industrielle-Software-Metrolog-XG-for-Leica\\_4721.htm](http://www.leica-geosystems.com/de/Industrielle-Software-Metrolog-XG-for-Leica_4721.htm).
33. **Leica Geosystems Ag.** Leica Absolute Tracker AT901. [Online] [Zitat vom: 25. 4 2012.] [http://www.leica-geosystems.com/de/Leica-Absolute-Tracker-AT901\\_69047.htm](http://www.leica-geosystems.com/de/Leica-Absolute-Tracker-AT901_69047.htm).
34. **Leica Geosystems AG.** Leica Absolute Tracker AT401. [Online] [Zitat vom: 25. 4 2012.] [http://www.leica-geosystems.com/de/Leica-Absolute-Tracker-AT401\\_81625.htm](http://www.leica-geosystems.com/de/Leica-Absolute-Tracker-AT401_81625.htm).
35. **FARO EUROPE GmbH & Co. KG.** FARO Laser Tracker Xi. [Online] 31. 5 2007. [Zitat vom: 25. 4 2012.] [http://www.faro.com/FaroIP/Files/File/Techsheets%20Download/DE\\_%20LASER\\_TRAC KER\\_Xi.pdf.PDF](http://www.faro.com/FaroIP/Files/File/Techsheets%20Download/DE_%20LASER_TRAC KER_Xi.pdf.PDF).
36. **FARO Europe GmbH & Co. KG.** FARO Lasertracker X. [Online] 2007. [Zitat vom: 20. 7 2012.] [http://www.faro.com/FaroIP/Files/File/Techsheets%20Download/DE\\_Laser\\_Tracker\\_X.pdf](http://www.faro.com/FaroIP/Files/File/Techsheets%20Download/DE_Laser_Tracker_X.pdf).


- 
37. —. Laser Tracker Reflektoren. [Online] [Zitat vom: 27. 4 2012.]  
<http://www.faro.com/lasertracker/de/reflektoren/>.
38. **Leica Geosystems AG.** Leica Geosystems Metrology Products Catalog Version 1.1. [Online] [Zitat vom: 27. 4 2012.] [http://www.leica-geosystems.com/downloads123/m1/metrology/general/brochures/Leica%20Geosystems%20Metrology%20Products\\_catalog\\_2011\\_en.pdf](http://www.leica-geosystems.com/downloads123/m1/metrology/general/brochures/Leica%20Geosystems%20Metrology%20Products_catalog_2011_en.pdf). S. 27, 40.
39. —. AT MeteoStation. [Online] [Zitat vom: 26. 4 2012.] [http://www.leica-geosystems.de/de/AT-MeteoStation\\_19053.htm](http://www.leica-geosystems.de/de/AT-MeteoStation_19053.htm).
40. **Meiners-Hagen, Karl, Pollinger, Florian und Abou-Zeid, Ahmed.** Brechzahlkompensation mittels Mehrwellenlängen-Interferometrie. [Online] 2010. [Zitat vom: 26. 4 2012.]  
[http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/mitteilungen/2010/PTB-Mitteilungen\\_2010\\_Heft\\_2.pdf](http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/mitteilungen/2010/PTB-Mitteilungen_2010_Heft_2.pdf). S. 110.
41. **Leica Geosystems GmbH Vertrieb.** Spiegelwerkzeug. [Online] [Zitat vom: 20. 4 2012.] [http://www.leica-geosystems.de/de/Spiegelwerkzeug\\_67377.htm](http://www.leica-geosystems.de/de/Spiegelwerkzeug_67377.htm).
42. **Leica Geosystems.** Leica Absolute Tracker Produktbroschüre. [Online] 10. 7 2008. [Zitat vom: 30. 3 2012.] <http://www.logismarket.de/ip/aicon-3d-systems-gmbh-mobile-3d-koordinatenmessmaschine-320979.pdf>.
43. **Fromm, Alexander und Hörner, Martin.** Zeeman-Effekt. [Online] [Zitat vom: 30. 3 2012.] <http://www.physik.uni-freiburg.de/~fromm/uni/Zeman.pdf>.
44. **9000:2005, DIN EN ISO.** DIN EN ISO 9000:2005.
45. **Starke, Lothar und Brückner, Claudia.** *Qualitätsmanagement Digitale Fachbibliothek.* [Hrsg.] Gerd F. Kamiske. s.l. : Symposion Publishing GmbH, 21. Februar 2008. Grundzüge des Qualitätsmanagements. S. 27.
46. —. *Qualitätsmanagement Digitale Fachbibliothek.* [Hrsg.] Gerd F. Kamiske. s.l. : Symposion Publishing GmbH, 21. Februar 2008. Grundzüge des Qualitätsmanagements. S. 28.

- 
47. —. *Qualitätsmanagement Digitale Fachbibliothek*. [Hrsg.] Gerd F. Kamiske. s.l. : Symposion Publishing GmbH, 21. Februar 2008. Grundzüge des Qualitätsmanagements. S. 32.
48. **Unbekannt**. *Qualitätsmanagement Digitale Fachbibliothek*. [Hrsg.] Gerd F. Kamiske. s.l. : Symposion Publishing GmbH, 26. 10 2009. Grundzüge des QM: Begriffsdefinitionen. S. 4.
49. **Starke, Lothar und Brückner, Claudia**. *Qualitätsmanagement Digitale Fachbibliothek*. [Hrsg.] Gerd F. Kamiske. s.l. : Symposion Publishing GmbH, 21. 2 2008. Grundzüge des Qualitätsmanagements. S. 28.
50. —. *Qualitätsmanagement Digitale Fachbibliothek*. [Hrsg.] Gerd F. Kamiske. s.l. : Symposion Publishing GmbH, 21. 2 2008. Grundzüge des Qualitätsmanagements. S. 32.
51. —. *Qualitätsmanagement Digitale Fachbibliothek*. [Hrsg.] Gerd F. Kamiske. Grundzüge des Qualitätsmanagements : Symposion Publishing GmbH, 21. 2 2008. S. 1ff.
52. —. *Qualitätsmanagement Digitale Fachbibliothek*. [Hrsg.] Gerd F. Kamiske. s.l. : Symposion Publishing GmbH, 21. 2 2008. Grundzüge des Qualitätsmanagements. S. 18ff.
53. —. *Qualitätsmanagement Digitale Fachbibliothek*. [Hrsg.] Gerd F. Kamiske. s.l. : Symposion Publishing GmbH, 21. 2 2008. Grundzüge des Qualitätsmanagements. S. 26.
54. —. *Qualitätsmanagement Digitale Fachbibliothek*. [Hrsg.] Gerd F. Kamiske. s.l. : Symposion Publishing GmbH, 21. Februar 2008. Grundzüge des Qualitätsmanagements.


## Anhang

### A – Protokolle Betriebsart und Betriebsbedingungen

Leica AT901 LR

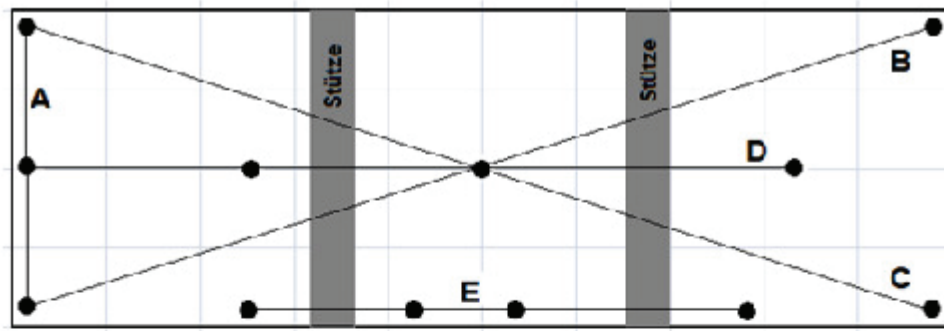
		<b>Angaben zu Betriebsart und Betriebsbedingungen für die Annahmeprüfung</b>	
Prüfer: Lisa Knaack	Datum: 27.07.2012		
<b>Aufstellung</b>			
Größe des Messvolumens	10 m x 6 m x 3 m		
Lasertrackerstandpunkt in Bezug zum Messvolumen	siehe Skizze Messaufbau		
Stellung des Trackers	stehend	liegend	geneigt
	x		
<b>Reflektor</b>			
Typbezeichnung des Messreflektors (Seriennr.)	Leica RRR (5882)		
Arbeitsbereich des Reflektor	Nickwinkel:	45 °	
	Gierwinkel:	45 °	
	Rollwinkel:	45 °	
<b>Lasertracker</b>			
Typbezeichnung des Lasertrackers (Seriennr.)	Leica AT 901 (3279)		
interferometrische Längenmessung	ja	nein	
	x		
Absolute Distanzmessung mit ADM	ja	nein	
	x		
Messzeit für einen einzelnen Messpunkt	- Sekunden/Punkt		
einzuhaltende Wartezeit bis Messungsbeginn (Aufwärmzeit)	Kaltstart:	8 Minuten	
	Warmstart:	5 Minuten	
<b>Temperatur</b>			
zulässiger Temperaturbereich	von	0 °C bis	40 °C
max. zeitliche Temperaturänderung	4 °C/Std.		
max. räumliche Temperaturänderung	4 °C/m		
<b>Luftdruck</b>			
zulässiger Luftdruckbereich	von	- hPa bis	- hPa
max. zeitliche Luftdruckänderung	von	- hPa/Std.	
<b>Luftfeuchtigkeit</b>			
zulässige relative Luftfeuchtigkeit	von	10 % bis	90 %

## FARO X v2

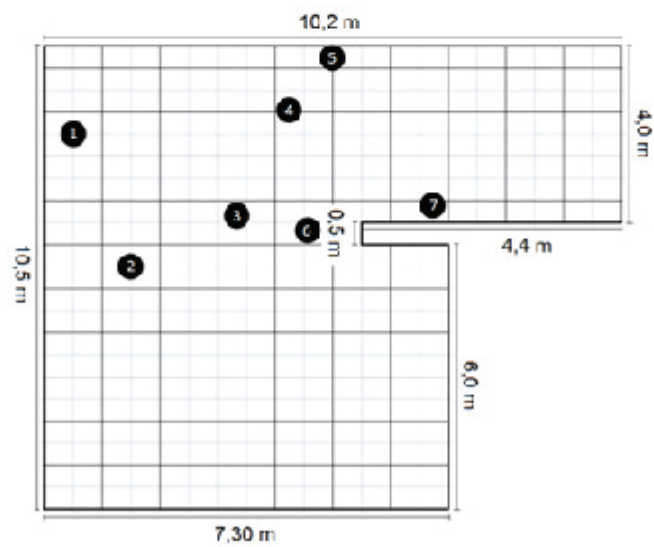
		<b>Angaben zu Betriebsart und Betriebsbedingungen für die Annahmeprüfung</b>	
Prüfer: <u>Lisa Knaack</u>		Datum: <u>27.07.2012</u>	
<b>Aufstellung</b>			
Größe des Messvolumens		10 m x 6 m x 3 m	
Lasertrackerstandpunkt in Bezug zum Messvolumen		siehe Skizze Messaufbau	
Stellung des Trackers		stehend	liegend
		x	
<b>Reflektor</b>			
Typbezeichnung des Messreflektors (Seriennr.)		Leica RRR (9277)	
Arbeitsbereich des Reflektor		Nickwinkel:	45 °
		Gierwinkel:	45 °
		Rollwinkel:	45 °
<b>Lasertracker</b>			
Typbezeichnung des Lasertrackers (Seriennr.)		FARO X v2 (x01000802651S)	
interferometrische Längenmessung		ja	nein
			x
Absolute Distanzmessung mit ADM		ja	nein
		x	
Messzeit für einen einzelnen Messpunkt		- Sekunden/Punkt	
einzuhaltende Wartezeit bis		Kaltstart:	- Minuten
Messungsbeginn (Aufwärmzeit)		Warmstart:	- Minuten
<b>Temperatur</b>			
zulässiger Temperaturbereich		von	-15 °C bis 50 °C
max. zeitliche Temperaturänderung		- °C/Std.	
max. räumliche Temperaturänderung		- °C/m	
<b>Luftdruck</b>			
zulässiger Luftdruckbereich		von	- hPa bis - hPa
max. zeitliche Luftdruckänderung		von	- hPa/Std.
<b>Luftfeuchtigkeit</b>			
zulässige relative Luftfeuchtigkeit		von	0 % bis 95 %

## Skizze Messaufbau

### Skizze Messaufbau



Anordnung der Wandpunkte




Anordnung der Lasertrackerstandpunkt



## B – Protokolle Antastabweichung Maß/Form

Leica AT901 LR

		Bestimmung Antastabweichung			
Prüfer:	<u>Lisa Knaack</u>	Datum:	<u>27.07.2012</u>		
Instrument:	<u>Leica Laser Tracker AT901LR</u>	Reflektor:	<u>1,5" RRR</u>		
Instrumentennr.:	<u>3279</u>	Reflektornr.:	<u>9277</u>		
Antastabweichung Maß (PS)					
	kalibrierter Durchmesser [mm]	bestimmter Durchmesser [mm]	PS [mm]		
Kugel_A2	38,100	38,082	-0,018		
Kugel_B1	38,100	38,023	-0,077		
Kugel_B2	38,100	38,088	-0,012		
<b>Antastabweichung Maß (PS)</b>		<b>-0,015 mm</b>			
Antastabweichung Form (PF)					
	Mittelpunktkoordinaten	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	
	<b>Kugel A2</b>	2,400	901,845	163,505	
	<b>Kugel B1</b>	8546,892	-1930,854	1600,284	
	<b>Kugel B2</b>	4273,635	-513,513	156,604	
Kugel A2					
Punktnummer	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Radius [mm]	
KUGEL_A2_PKT1	-0,572	901,517	201,474	19,043	
KUGEL_A2_PKT10	-15,904	906,262	196,610	19,043	
KUGEL_A2_PKT11	3,096	894,653	200,898	19,042	
KUGEL_A2_PKT12	24,367	907,004	194,195	19,046	
KUGEL_A2_PKT13	29,156	881,886	181,885	19,053	
KUGEL_A2_PKT14	39,521	907,687	169,776	19,049	
KUGEL_A2_PKT15	32,342	885,626	146,426	19,048	
KUGEL_A2_PKT16	31,973	914,027	142,802	19,050	
KUGEL_A2_PKT17	14,160	896,440	127,674	19,048	
KUGEL_A2_PKT18	13,883	918,356	131,158	19,045	
KUGEL_A2_PKT19	-5,204	900,621	126,206	19,043	
KUGEL_A2_PKT2	24,659	889,309	191,772	19,050	
KUGEL_A2_PKT20	-11,370	922,952	134,929	19,051	
KUGEL_A2_PKT21	-27,960	906,272	140,920	19,049	
KUGEL_A2_PKT22	-25,195	926,739	155,116	19,050	
KUGEL_A2_PKT23	-35,102	902,795	156,858	19,049	
KUGEL_A2_PKT24	-21,540	918,967	187,679	19,044	
KUGEL_A2_PKT25	-5,441	890,665	199,070	19,048	
KUGEL_A2_PKT3	34,046	885,048	176,443	19,046	
KUGEL_A2_PKT4	36,911	891,003	151,645	19,034	
KUGEL_A2_PKT5	16,744	898,805	128,370	19,036	Min. [mm]
KUGEL_A2_PKT6	0,826	902,231	125,457	19,041	19,034
KUGEL_A2_PKT7	-21,344	903,544	133,737	19,058	Max. [mm]
KUGEL_A2_PKT8	-31,346	911,474	148,715	19,041	
KUGEL_A2_PKT9	-31,401	912,282	177,568	19,034	Diff. [mm]
					0,024

Kugel B1						
Punktnummer	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Radius [mm]		
KUGEL_B1_PKT1	8547,813	-1909,724	1631,620	18,903		
KUGEL_B1_PKT10	8551,932	-1910,909	1568,181	19,064		
KUGEL_B1_PKT11	8544,438	-1910,699	1568,071	19,039		
KUGEL_B1_PKT12	8539,268	-1921,753	1564,141	19,022		
KUGEL_B1_PKT13	8532,156	-1938,852	1566,142	19,018		
KUGEL_B1_PKT14	8519,911	-1955,190	1589,049	19,016		
KUGEL_B1_PKT15	8515,001	-1950,077	1608,052	19,019		
KUGEL_B1_PKT16	8517,561	-1940,523	1622,545	19,035		
KUGEL_B1_PKT17	8522,582	-1914,239	1624,479	19,055		
KUGEL_B1_PKT18	8518,610	-1905,880	1605,615	19,053		
KUGEL_B1_PKT19	8514,891	-1911,688	1592,650	19,037		
KUGEL_B1_PKT2	8542,542	-1930,153	1638,147	19,059		
KUGEL_B1_PKT20	8511,352	-1923,393	1611,752	19,041		
KUGEL_B1_PKT21	8510,668	-1920,167	1595,541	19,032		
KUGEL_B1_PKT22	8512,433	-1941,412	1612,495	19,026		
KUGEL_B1_PKT23	8511,577	-1926,597	1586,776	19,025		
KUGEL_B1_PKT24	8559,764	-1932,690	1636,151	19,076		
KUGEL_B1_PKT25	8545,112	-1962,538	1621,337	19,041		
KUGEL_B1_PKT3	8536,400	-1952,176	1630,042	19,041		
KUGEL_B1_PKT4	8534,524	-1963,910	1614,557	19,035		
KUGEL_B1_PKT5	8536,089	-1966,409	1592,173	19,017	Min. [mm]	Max. [mm]
KUGEL_B1_PKT6	8542,072	-1957,768	1573,828	19,023	18,903	19,076
KUGEL_B1_PKT7	8546,513	-1941,652	1563,816	19,017		
KUGEL_B1_PKT8	8549,318	-1929,611	1562,306	19,038		
KUGEL_B1_PKT9	8548,242	-1919,828	1563,865	19,038	Diff. [mm]	0,173
Kugel B2						
Punktnummer	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Radius [mm]		
KUGEL_B2_PKT1	4277,905	-496,522	190,444	19,053		
KUGEL_B2_PKT10	4251,022	-519,957	126,626	19,050		
KUGEL_B2_PKT11	4255,939	-545,147	144,861	19,051		
KUGEL_B2_PKT12	4254,480	-539,286	177,106	19,049		
KUGEL_B2_PKT13	4253,549	-515,306	188,913	19,043		
KUGEL_B2_PKT14	4258,308	-489,571	181,956	19,045		
KUGEL_B2_PKT15	4249,162	-484,589	160,500	19,044		
KUGEL_B2_PKT16	4246,856	-491,017	141,485	19,051		
KUGEL_B2_PKT17	4256,366	-497,152	126,839	19,052		
KUGEL_B2_PKT18	4250,639	-516,627	126,399	19,045		
KUGEL_B2_PKT19	4240,610	-529,751	146,740	19,050		
KUGEL_B2_PKT2	4269,043	-520,670	193,737	19,047		
KUGEL_B2_PKT20	4244,983	-527,745	177,291	19,049		
KUGEL_B2_PKT21	4249,900	-490,146	175,081	19,044		
KUGEL_B2_PKT22	4241,425	-493,218	155,385	19,045		
KUGEL_B2_PKT23	4236,231	-508,394	161,683	19,046		
KUGEL_B2_PKT24	4242,313	-520,681	177,065	19,047		
KUGEL_B2_PKT25	4236,879	-523,212	154,175	19,046		
KUGEL_B2_PKT3	4262,521	-541,642	179,780	19,052		
KUGEL_B2_PKT4	4261,545	-549,578	155,021	19,035		
KUGEL_B2_PKT5	4263,758	-537,401	128,632	19,044	Min. [mm]	Max. [mm]
KUGEL_B2_PKT6	4272,870	-515,604	118,571	19,049	19,035	19,053
KUGEL_B2_PKT7	4284,566	-497,517	123,805	19,047		
KUGEL_B2_PKT8	4267,788	-492,281	125,535	19,041		
KUGEL_B2_PKT9	4252,902	-503,090	126,393	19,047	Diff. [mm]	0,018
<b>Antastabweichung From (PF)</b>			<b>0,071 mm</b>			


## FARO X v2

<b>AIMESS</b> SERVICES		<b>Bestimmung Antastabweichung</b>				
Prüfer:	<u>Lisa Knaack</u>	Datum:	<u>27.07.2012</u>			
Instrument:	<u>FARO X v2</u>	Reflektor:	<u>1,5" RRR</u>			
Instrumentennr.:	<u>X01000802651S</u>	Reflektornr.:	<u>5598</u>			
<b>Antastabweichung Maß (PS)</b>						
	kalibrierter Durchmesser [mm]	bestimmter Durchmesser [mm]	PS [mm]			
Kugel A2	38,100	38,093	-0,007			
Kugel B1	38,100	38,100	0,000			
Kugel B2	38,100	38,092	-0,008			
<b>Antastabweichung Maß (PS)</b>		<b>-0,005 mm</b>				
<b>Antastabweichung Form (PF)</b>						
	Mittelpunktkoordinaten	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]		
	<b>Kugel A2</b>	595,759	-909,813	359,850		
	<b>Kugel B1</b>	-7499,284	-4846,236	1799,318		
	<b>Kugel B2</b>	-3447,588	-2884,125	354,305		
<b>Kugel A2</b>						
Punktnummer	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Radius [mm]		
KUGEL_A2_PKT1	591,736	-908,380	397,709	19,050		
KUGEL_A2_PKT10	610,088	-918,866	393,965	19,047		
KUGEL_A2_PKT11	591,301	-933,004	389,754	19,052		
KUGEL_A2_PKT12	574,582	-940,123	369,023	19,048		
KUGEL_A2_PKT13	579,427	-939,616	342,639	19,047		
KUGEL_A2_PKT14	599,290	-931,500	328,733	19,046		
KUGEL_A2_PKT15	625,325	-920,018	338,103	19,047		
KUGEL_A2_PKT16	627,574	-890,669	351,321	19,049		
KUGEL_A2_PKT17	622,926	-887,313	374,246	19,050		
KUGEL_A2_PKT18	602,478	-894,297	393,984	19,046		
KUGEL_A2_PKT19	574,545	-907,177	391,386	19,049		
KUGEL_A2_PKT2	569,759	-918,877	386,183	19,050		
KUGEL_A2_PKT20	558,115	-913,819	364,091	19,047		
KUGEL_A2_PKT21	565,694	-911,711	336,531	19,048		
KUGEL_A2_PKT22	595,335	-902,504	322,463	19,049		
KUGEL_A2_PKT23	617,404	-902,851	329,277	19,050		
KUGEL_A2_PKT24	571,565	-936,461	372,337	19,049		
KUGEL_A2_PKT25	604,400	-892,331	392,574	19,047		
KUGEL_A2_PKT3	560,950	-924,738	364,010	19,051		
KUGEL_A2_PKT4	567,669	-926,277	340,074	19,047		
KUGEL_A2_PKT5	586,214	-918,136	323,926	19,045	Min. [mm]	
KUGEL_A2_PKT6	611,813	-908,449	325,322	19,051	19,045	
KUGEL_A2_PKT7	629,233	-900,462	344,243	19,049		
KUGEL_A2_PKT8	629,017	-896,555	372,869	19,048		
KUGEL_A2_PKT9	615,219	-900,338	391,194	19,045	Diff. [mm]	
					0,007	

Kugel B1						
Punktnummer	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Radius [mm]		
KUGEL_B1_PKT1	-7493,764	-4854,812	1836,032	19,052		
KUGEL_B1_PKT10	-7495,522	-4856,934	1762,940	19,052		
KUGEL_B1_PKT11	-7499,369	-4849,170	1761,336	19,048		
KUGEL_B1_PKT12	-7504,978	-4832,124	1764,406	19,042		
KUGEL_B1_PKT13	-7504,879	-4811,733	1784,140	19,053		
KUGEL_B1_PKT14	-7497,063	-4811,333	1814,475	19,058		
KUGEL_B1_PKT15	-7490,175	-4826,104	1830,348	19,047		
KUGEL_B1_PKT16	-7477,642	-4847,028	1830,620	19,032		
KUGEL_B1_PKT17	-7467,690	-4845,621	1820,602	19,050		
KUGEL_B1_PKT18	-7462,750	-4840,710	1808,622	19,051		
KUGEL_B1_PKT19	-7466,323	-4829,515	1808,571	19,050		
KUGEL_B1_PKT2	-7503,043	-4838,922	1836,542	19,061		
KUGEL_B1_PKT20	-7480,311	-4814,755	1809,322	19,047		
KUGEL_B1_PKT21	-7483,992	-4811,631	1794,749	19,054		
KUGEL_B1_PKT22	-7473,710	-4824,398	1781,411	19,050		
KUGEL_B1_PKT23	-7471,324	-4837,193	1775,062	19,052		
KUGEL_B1_PKT24	-7467,336	-4828,993	1787,755	19,051		
KUGEL_B1_PKT25	-7461,490	-4841,514	1800,552	19,054		
KUGEL_B1_PKT3	-7512,436	-4825,291	1828,302	19,051		
KUGEL_B1_PKT4	-7517,711	-4815,527	1812,296	19,046		
KUGEL_B1_PKT5	-7519,696	-4815,878	1788,664	19,051	Min. [mm]	Max. [mm]
KUGEL_B1_PKT6	-7516,023	-4833,916	1767,400	19,044	19,032	19,061
KUGEL_B1_PKT7	-7508,775	-4850,250	1762,650	19,044		
KUGEL_B1_PKT8	-7499,110	-4861,674	1764,470	19,057		
KUGEL_B1_PKT9	-7497,269	-4868,517	1768,464	19,056	Diff. [mm]	0,029
Kugel B2						
Punktnummer	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Radius [mm]		
KUGEL_B2_PKT1	-3443,331	-2896,609	390,048	19,050		
KUGEL_B2_PKT10	-3445,456	-2906,334	323,427	19,048		
KUGEL_B2_PKT11	-3429,927	-2897,225	323,183	19,053		
KUGEL_B2_PKT12	-3434,766	-2885,533	318,435	19,059		
KUGEL_B2_PKT13	-3439,520	-2873,042	318,750	19,053		
KUGEL_B2_PKT14	-3448,592	-2862,622	322,863	19,052		
KUGEL_B2_PKT15	-3456,436	-2847,206	350,995	19,054		
KUGEL_B2_PKT16	-3452,176	-2859,458	382,978	19,050		
KUGEL_B2_PKT17	-3440,521	-2877,055	391,065	19,047		
KUGEL_B2_PKT18	-3425,845	-2889,867	385,050	19,046		
KUGEL_B2_PKT19	-3412,529	-2884,573	369,194	19,046		
KUGEL_B2_PKT2	-3448,673	-2880,167	392,177	19,047		
KUGEL_B2_PKT20	-3414,794	-2873,446	370,478	19,046		
KUGEL_B2_PKT21	-3419,205	-2861,166	365,171	19,045		
KUGEL_B2_PKT22	-3428,483	-2851,273	356,935	19,047		
KUGEL_B2_PKT23	-3439,787	-2848,239	344,163	19,049		
KUGEL_B2_PKT24	-3420,854	-2858,774	344,616	19,048		
KUGEL_B2_PKT25	-3414,750	-2864,908	356,054	19,044		
KUGEL_B2_PKT3	-3453,017	-2864,862	386,729	19,052		
KUGEL_B2_PKT4	-3462,355	-2853,700	371,858	19,052		
KUGEL_B2_PKT5	-3464,007	-2849,767	353,747	19,042	Min. [mm]	Max. [mm]
KUGEL_B2_PKT6	-3462,590	-2857,926	331,082	19,044	19,041	19,059
KUGEL_B2_PKT7	-3455,372	-2870,035	319,792	19,041		
KUGEL_B2_PKT8	-3450,898	-2882,229	316,413	19,042		
KUGEL_B2_PKT9	-3447,077	-2895,409	317,935	19,042	Diff. [mm]	0,018
<b>Antastabweichung From (PF)</b>		<b>0,018 mm</b>				

## C – Protokolle synthetische Prüflänge


Leica AT901 LR

			<b>Bestimmung synthetische Prüflänge</b>		
Prüfer:	Lisa Knaack		Datum:	15.08.2012	
Instrument:	Leica Laser Tracker AT901LR		Reflektor:	1,5" RRR	
Instrumentennr.:	3279		Reflektornr.:	9277	
<b>Messung mit Referenzlasertracker</b>					
Werkstücktemperatur: 17,9 °C					
<b>Punktnummer</b>	<b>X [mm]</b>	<b>Y [mm]</b>	<b>Z [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>LS [mm]</b>
R1	443,319	1215,778	-134,774	4068,698	4068,796
R2	1108,478	5229,457	-182,201		
<b>Messung mit dem zu prüfenden Lasertracker</b>					
<b>Punktnummer</b>	<b>X [mm]</b>	<b>Y [mm]</b>	<b>Z [mm]</b>	<b>ES [mm]</b>	<b>mittlere ESM [mm]</b>
P1_1	364,499	829,114	19,262	-0,091	-0,092
P2_1	1100,703	4829,750	-66,074		
P1_2	364,499	829,115	19,262	-0,092	
P2_2	1100,711	4829,748	-66,062		
P1_3	364,499	829,114	19,262	-0,092	
P2_3	1100,717	4829,746	-66,074		
<b>Korrekturwert EKi für jede Referenzlänge</b>					
<b>Referenzlänge</b>	<b>Korrekturwert Eki [µm]</b>		L      Prüflänge LS     synthetische Prüflänge ES     synthetische Längenmessabweichung ESM    mittlere synthetische Längenmessabweichung  <u>Bemerkung:</u> Die Temperaturmessung beim zu prüfenden Lasertracker erfolgte für die Luft mit dem zum AT901 dazugehörigen Thermometer und die Temperaturmessung des Stahls mit dem Temperaturfühler eines Leica AT401.		
A1-A2	-32,7				
A1-A3	-65,3				
A2-A3	-32,7				
B1-B2	-106,5				
B1-B3	-213,1				
B2-B3	-106,5				
C1-C2	-106,5				
C1-C3	-213,1				
C2-C3	-106,5				
D1-D2	-50,7				
D1-D3	-101,4				
D1-D4	-157,7				
D2-D3	-50,7				
D2-D4	-107,0				
D3-D4	-56,3				
E1-E2	-33,8				
E1-E3	-67,6				
E1-E4	-101,4				
E2-E3	-33,8				
E2-E4	-67,6				
E3-E4	-33,8				

## FARO X v2

AIMESS SERVICES			Bestimmung synthetische Prüflänge		
Prüfer:	Lisa Knaack		Datum:	27.07.2012	
Instrument:	FARO X v2		Reflektor:	1,5" RRR	
Instrumentennr.:	X01000802651S		Reflektornr.:	5598	
Messung mit Referenzlasertracker					
Werkstücktemperatur: 17,9 °C					
Punktnummer	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	L [mm]	LS [mm]
R1	443,319	1215,778	-134,774	4068,698	4068,796
R2	1108,478	5229,457	-182,201		
Messung mit dem zu prüfenden Lasertracker					
Punktnummer	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	ES [mm]	mittlere ESM [mm]
P1_1	980,792	642,047	-8,166	-0,001	-0,0004
P2_1	3862,340	3514,513	18,650		
P1_2	980,790	642,047	-8,164	-0,001	
P2_2	3862,341	3514,509	18,657		
P1_3	980,791	642,044	-8,167	0,001	
P2_3	3862,339	3514,512	18,660		
Korrekturwert EKi für jede Referenzlänge					
Referenzlänge	Korrekturwert Eki [mm]		L Prüflänge LS synthetische Prüflänge ES synthetische Längenmessabweichung ESM mittlere synthetische Längenmessabweichung  Bemerkung: Die Temperaturmessung beim zu prüfenden Lasertracker erfolgte für die Luft mit dem zum AT901 dazugehörigen Thermometer und die Temperaturmessung des Stahls mit einem externen Temperaturfühler.		
A1-A2	-0,0001				
A1-A3	-0,0003				
A2-A3	-0,0001				
B1-B2	-0,0005				
B1-B3	-0,0010				
B2-B3	-0,0005				
C1-C2	-0,0005				
C1-C3	-0,0010				
C2-C3	-0,0005				
D1-D2	-0,0002				
D1-D3	-0,0005				
D1-D4	-0,0007				
D2-D3	-0,0002				
D2-D4	-0,0005				
D3-D4	-0,0003				
E1-E2	-0,0002				
E1-E3	-0,0003				
E1-E4	-0,0005				
E2-E3	-0,0002				
E2-E4	-0,0003				
E3-E4	-0,0002				

## D – Protokoll Referenzlängenbestimmung

			Referenzlängenbestimmung		
Prüfer:	<u>Lisa Knaack</u>	Datum:	<u>27.07.2012</u>		
Instrument:	<u>FARO Xi</u>	Reflektor:	<u>1,5" RRR</u>		
Instrumentennr.:	<u>X02000702254S</u>	Reflektornr.:	<u>9278</u>		
Messung vor Lasertracker - Überprüfung					
Referenzlänge	Strecke [mm]	Mittel [mm]			
A1-A2	1449,882	1449,882	D1-D3	4499,638	4499,639
	1449,883			4499,635	
	1449,881			4499,643	
A1-A3	2899,246	2899,247	D1-D4	6999,364	6999,365
	2899,248			6999,363	
	2899,246			6999,367	
A2-A3	1449,364	1449,365	D2-D3	2250,309	2250,308
	1449,365			2250,307	
	1449,365			2250,308	
Referenzlänge	Strecke [mm]	Mittel [mm]			
B1-B2	4728,038	4728,037	D2-D4	4750,035	4750,034
	4728,036			4750,035	
	4728,037			4750,032	
B1-B3	9455,480	9455,486	D3-D4	2499,726	2499,726
	9455,490			2499,728	
	9455,487			2499,724	
B2-B3	4727,447	4727,447	Referenzlänge	Strecke [mm]	Mittel [mm]
	4727,447		E1-E2	1499,857	1499,861
	4727,446		1499,862		
	1499,863				
Referenzlänge	Strecke [mm]	Mittel [mm]	E1-E3	2999,771	2999,769
C1-C2	4727,613	4727,612		2999,769	
	4727,613			2999,768	
	4727,610		E1-E4	4500,459	4500,459
C1-C3	9455,969	9455,967		4500,458	
	9455,964			4500,461	
	9455,967		E2-E3	1499,914	1499,909
C2-C3	4728,355	4728,354		1499,907	
	4728,353			1499,905	
	4728,355		E2-E4	3000,602	3000,599
Referenzlänge	Strecke [mm]	Mittel [mm]		3000,596	
D1-D2	2249,329	2249,331		3000,598	
	2249,328		E3-E4	1500,688	1500,690
	2249,335			1500,689	
			1500,693		

Messung nach Lasertracker - Überprüfung					
Referenzlänge	Strecke [mm]	Mittel [mm]	Referenzlänge	Strecke [mm]	Mittel [mm]
A1-A2	1449,882	1449,882	D1-D2	2249,341	2249,345
	1449,884			2249,347	
	1449,880			2249,346	
A1-A3	2899,240	2899,239	D1-D3	4499,638	4499,647
	2899,240			4499,652	
	2899,237			4499,650	
A2-A3	1449,358	1449,357	D1-D4	6999,363	6999,363
	1449,356			6999,364	
	1449,357			6999,363	
Referenzlänge	Strecke [mm]	Mittel [mm]	Referenzlänge	Strecke [mm]	Mittel [mm]
B1-B2	4728,028	4728,029	D2-D3	2250,297	2250,302
	4728,030			2250,305	
	4728,029			2250,304	
B1-B3	9455,461	9455,460	D2-D4	4750,022	4750,019
	9455,461			4750,017	
	9455,458			4750,017	
B2-B3	4727,432	4727,433	D3-D4	2499,725	2499,717
	4727,434			2499,712	
	4727,434			2499,713	
Referenzlänge	Strecke [mm]	Mittel [mm]	Referenzlänge	Strecke [mm]	Mittel [mm]
C1-C2	4727,612	4727,609	E1-E2	1499,870	1499,871
	4727,607			1499,873	
	4727,607			1499,871	
C1-C3	9455,977	9455,971	E1-E3	2999,772	2999,773
	9455,967			2999,775	
	9455,968			2999,773	
C2-C3	4728,365	4728,363	E1-E4	4500,469	4500,470
	4728,362			4500,472	
	4728,362			4500,469	
			E2-E3	1499,902	1499,902
				1499,902	
				1499,902	
			E2-E4	3000,599	3000,599
				3000,599	
				3000,598	
			E3-E4	1500,697	1500,697
				1500,697	
				1500,696	



Referenzlängen					
Referenzlänge	Strecke [mm]	Mittel [mm]	Referenzlänge	Strecke [mm]	Mittel [mm]
A1-A2	1449,882	1449,882	E1-E2	1499,861	1499,866
	1449,882			1499,871	
A1-A3	2899,247	2899,243	E1-E3	2999,769	2999,771
	2899,239			2999,773	
A2-A3	1449,365	1449,361	E1-E4	4500,459	4500,465
	1449,357			4500,470	
Referenzlänge	Strecke [mm]	Mittel [mm]	E2-E3	1499,909	1499,905
				1499,902	
B1-B2	4728,037	4728,033	E2-E4	3000,599	3000,599
	4728,029			3000,599	
B1-B3	9455,486	9455,473	E3-E4	1500,690	1500,693
	9455,460			1500,697	
B2-B3	4727,447	4727,440			
	4727,433				
Referenzlänge	Strecke [mm]	Mittel [mm]	Referenzlänge	Abw. [mm]	
C1-C2	4727,612	4727,610	A1-A2	0,000	eingehalten
	4727,609		A1-A3	0,008	überschritten
C1-C3	9455,967	9455,969	A2-A3	0,008	überschritten
	9455,971		B1-B2	0,008	überschritten
C2-C3	4728,354	4728,359	B1-B3	0,026	überschritten
	4728,363		B2-B3	0,013	überschritten
Referenzlänge	Strecke [mm]	Mittel [mm]	C1-C2	0,003	eingehalten
D1-D2	2249,331	2249,338	C1-C3	-0,004	überschritten
	2249,345		C2-C3	-0,009	überschritten
D1-D3	4499,639	4499,643	D1-D2	-0,014	überschritten
	4499,647		D1-D3	-0,008	überschritten
D1-D4	6999,365	6999,364	D1-D4	0,001	eingehalten
	6999,363		D2-D3	0,006	überschritten
D2-D3	2250,308	2250,305	D2-D4	0,015	überschritten
	2250,302		D3-D4	0,009	überschritten
D2-D4	4750,034	4750,026	E1-E2	-0,011	überschritten
	4750,019		E1-E3	-0,004	überschritten
D3-D4	2499,726	2499,721	E1-E4	-0,011	überschritten
	2499,717		E2-E3	0,007	überschritten
			E2-E4	0,000	eingehalten
			E3-E4	-0,007	überschritten
<u>Bemerkung:</u>					
			min. Abw. [mm] 0		
			max. Abw. [mm] 0,026		

## E – Protokoll Längenmessabweichung

### Leica AT901 LR

<b>AIMESS</b> SERVICES		<b>Überprüfung Längenmessabweichung</b>	
Prüfer:	<u>Lisa Knaack</u>	Datum:	<u>16.08.2012</u>
Instrument:	<u>Leica Laser Tracker AT901LR</u>	Reflektor:	<u>1,5" RRR</u>
Instrumentennr.:	<u>3279</u>	Reflektornr.:	<u>5882</u>

Antastabweichung PS [mm]: -0,015

E Längenmessabweichung  
MPE<sub>E</sub> Maximum Permissible Error E

x MPE<sub>E</sub> überschritten  
v MPE<sub>E</sub> eingehalten

Lasertrackerstandpunkt LT1											
LT Position	Nestnr.	Orientierung	Messpunktkoordinaten			Strecken [mm]	Iststrecke [mm]	Sollstrecke [mm]	E [µm]	MPE <sub>E</sub> ± [µm]	
			X [mm]	Y [mm]	Z [mm]						
LT1	A1	000°	-41,320	-1841,580	1631,850		1449,892				
		120°	-1691,110	732,660	1631,040	A1-A2	1449,882			24	
		240°	1463,550	1120,390	1631,360		1449,885	1449,886	1449,882	-8	v
	A2	000°	-38,980	-1865,690	182,160		2899,259				
		120°	-1713,770	739,260	181,350	A1-A3	2899,260				32
		240°	1480,930	1136,610	181,670		2899,265	2899,261	2899,243	8	v
	A3	000°	-36,290	-1888,210	-1267,030		1449,367				
		120°	-1735,100	744,930	-1267,860	A2-A3	1449,378				24
		240°	1496,860	1152,110	-1267,540		1449,380	1449,375	1449,361	2	v

Lasertrackerstandpunkt L2											
LT Position	Nestnr.	Orientierung	Messpunktkoordinaten			Strecken [mm]	Iststrecke [mm]	Sollstrecke [mm]	E [µm]	MPE <sub>E</sub> ± [µm]	
			X [mm]	Y [mm]	Z [mm]						
LT2	E1	000°	-2058,170	-4602,330	-1399,020		1499,889				
		120°	-3504,090	3624,630	-1401,060	E1-E2	1499,840			24	
		240°	4412,340	2440,420	-1399,930		1499,848	1499,859	1499,866	-20	v
	E2	000°	-3539,250	-4365,580	-1394,840		2999,807				
		120°	-2732,870	4910,990	-1396,830	E1-E3	2999,748				33
		240°	5453,590	1360,920	-1395,180		2999,718	2999,758	2999,771	-24	v
	E3	000°	-5020,400	-4129,070	-1391,070		4500,463				
		120°	-1961,800	6197,520	-1393,060	E1-E4	4500,436				42
		240°	6495,050	281,590	-1390,840		4500,411	4500,436	4500,465	-36	v
	E4	000°	-6502,150	-3891,650	-1387,110		1499,919				
		120°	-1189,630	7484,300	-1389,050	E2-E3	1499,908				24
		240°	7536,470	-798,920	-1386,300		1499,870	1499,899	1499,905	-14	v
	E2-E4						3000,574				
							3000,596				33
							3000,563	3000,578	3000,599	-34	x
E3-E4						1500,656					
						1500,688				24	
						1500,693	1500,679	1500,693	-27	x	

Lasertrackerstandpunkt L3											
LT Position	Nestnr.	Orientierung	Messpunktkoordinaten			Strecken [mm]	Iststrecke [mm]	Sollstrecke [mm]	E [µm]	MPE <sub>z</sub> ± [µm]	
			X [mm]	Y [mm]	Z [mm]						
LT3	C1	000°	3418,630	-3457,600	1624,410	C1-C2	4727,673	4727,663	4727,610	45	43 x
		120°	-4577,900	-1638,700	1623,010		4727,702				
		240°	377,100	4848,940	1622,110		4727,614				
	C2	000°	-1061,850	-3921,540	188,810	C1-C3	9456,075	9456,037	9455,969	68	72 v
		120°	-3106,860	2618,700	187,130		9456,068				
		240°	3660,580	1764,700	188,040		9455,967				
	C3	000°	-5543,000	-4384,680	-1247,360	C2-C3	4728,402	4728,374	4728,359	8	43 v
		120°	-1634,890	6876,300	-1249,390		4728,366				
		240°	6943,980	-1320,470	-1246,650		4728,353				
	D1	000°	3415,500	-3474,330	174,610	D1-D2	2249,322	2249,342	2249,338	-7	28 v
		120°	-4591,190	-1629,120	173,220		2249,372				
		240°	391,750	4856,850	172,320		2249,330				
	D2	000°	1177,270	-3697,320	181,780	D1-D3	4499,651	4499,666	4499,643	15	42 v
		120°	-3848,660	494,150	180,230		4499,699				
		240°	2025,410	3310,700	180,240		4499,647				
	D3	000°	-1061,850	-3921,540	188,820	D1-D4	6999,410	6999,403	6999,364	35	57 v
		120°	-3106,870	2618,690	187,130		6999,433				
		240°	3660,570	1764,700	188,040		6999,367				
	D4	000°	-3549,220	-4169,960	197,140	D2-D3	2250,329	2250,324	2250,305	8	29 v
		120°	-2282,250	4978,480	195,260		2250,327				
		240°	5476,540	46,920	197,170		2250,317				
	D2-D4					D2-D4	4750,088	4750,062	4750,026	28	44 v
							4750,061				
							4750,036				
D3-D4					D3-D4	2499,758	2499,738	2499,721	5	30 v	
						2499,735					
						2499,720					

Lasertrackerstandpunkt L4											
LT Position	Nestnr.	Orientierung	Messpunktkoordinaten			Strecken [mm]	Iststrecke [mm]	Sollstrecke [mm]	E [µm]	MPE <sub>z</sub> ± [µm]	
			X [mm]	Y [mm]	Z [mm]						
LT4	D1	000°	3536,890	-2053,260	169,130	D1-D2	2249,337	2249,343	2249,338	-6	28 v
		120°	-3776,780	-1567,920	167,970		2249,344				
		240°	-493,680	4060,140	167,120		2249,347				
	D2	000°	1290,280	-1942,750	162,240	D1-D3	4499,669	4499,671	4499,643	21	42 v
		120°	-2327,250	152,070	161,210		4499,693				
		240°	772,760	2201,200	161,150		4499,653				
	D3	000°	-957,380	-1833,350	155,200	D1-D4	6999,418	6999,405	6999,364	37	57 v
		120°	-877,930	1873,550	154,310		6999,425				
		240°	2040,680	342,110	155,020		6999,372				
	D4	000°	-3454,130	-1711,160	147,860	D2-D3	2250,332	2250,329	2250,305	12	29 v
		120°	732,510	3785,380	147,110		2250,349				
		240°	3448,640	-1723,370	148,680		2250,305				
	D2-D4					D2-D4	4750,081	4750,062	4750,026	29	44 v
							4750,081				
							4750,025				
	D3-D4					D3-D4	2499,749	2499,734	2499,721	1	30 v
							2499,733				
							2499,720				

Lasertrackerstandpunkt L5										
LT Position	Nestnr.	Orientierung	Messpunktkoordinaten			Strecken [mm]	Iststrecke [mm]	Sollstrecke [mm]	E [µm]	MPE <sub>ε</sub> ± [µm]
			X [mm]	Y [mm]	Z [mm]					
LT5	B1	000°	-4300,550	-1667,640	1611,290					
		120°	2110,920	4102,240	1610,950	B1-B2	4728,066	4728,033	25	43
		240°	2852,070	-3624,730	1612,860					v
	B2	000°	163,650	-1105,210	158,890					
		120°	-855,540	719,260	158,310	B1-B3	9455,525	9455,473	53	72
		240°	1009,930	479,670	158,640					v
	B3	000°	4627,500	-542,530	-1292,330					
		120°	-3821,570	-2663,800	-1293,120	B2-B3	4727,460	4727,440	12	43
		240°	-832,280	4583,800	-1294,400					v
	C1	000°	4627,030	-529,210	1606,920					
		120°	-3813,590	-2672,570	1606,100	C1-C2	4727,619	4727,610	1	43
		240°	-844,690	4580,780	1604,870					v
	C2	000°	163,650	-1105,210	158,890					
		120°	-855,530	719,250	158,320	C1-C3	9456,000	9455,969	32	72
		240°	1009,920	479,680	158,640					v
	C3	000°	-4300,450	-1680,490	-1289,780					
		120°	2103,550	4110,900	-1290,140	C2-C3	4728,382	4728,359	16	43
		240°	2864,160	-3622,260	-1288,220					v
	D1	000°	4627,230	-536,670	157,060					
		120°	-3818,090	-2667,560	156,240	D1-D2	2249,351	2249,338	2	28
		240°	-837,720	4582,500	154,960					v
	D2	000°	2395,840	-820,310	158,050					
		120°	-2336,720	-974,900	157,340	D1-D3	4499,667	4499,643	16	42
		240°	85,410	2531,290	156,870					v
	D3	000°	163,650	-1105,210	158,890					
		120°	-855,540	719,260	158,320	D1-D4	6999,418	6999,364	50	57
		240°	1009,930	479,680	158,640					v
	D4	000°	-2316,090	-1421,040	160,300					
		120°	790,320	2600,710	159,850	D2-D3	2250,315	2250,305	-1	29
		240°	2036,390	-1799,590	161,050					v
	D2-D4									
	D3-D4									

Lasertrackerstandpunkt L6										
LT Position	Nestnr.	Orientierung	Messpunktkoordinaten			Strecken [mm]	Iststrecke [mm]	Sollstrecke [mm]	E [µm]	MPE <sub>ε</sub> ± [µm]
			X [mm]	Y [mm]	Z [mm]					
LT6	A1	000°	5098,970	-3712,470	1623,570					
		120°	-5943,470	-2111,160	1621,790	A1-A2	1449,898	1449,882	3	24
		240°	8,070	6308,450	1620,710					v
	A2	000°	5110,020	-3709,710	173,710					
		120°	-5946,870	-2122,200	171,950	A1-A3	2899,282	2899,243	29	32
		240°	-0,710	6315,110	170,850					v
	A3	000°	5121,040	-3705,360	-1275,650					
		120°	-5948,930	-2134,160	-1277,380	A2-A3	1449,385	1449,361	12	24
		240°	-10,760	6320,830	-1278,470					v
	C1	000°	5098,980	-3712,450	1623,570					
		120°	-5943,470	-2111,150	1621,790	C1-C2	4727,628	4727,610	11	43
		240°	8,090	6308,460	1620,710					v
	C2	000°	678,050	-4486,270	137,990					
		120°	-4085,440	1974,280	135,880	C1-C3	9456,026	9455,969	58	72
		240°	3232,160	3185,560	136,470					v
	C3	000°	-3743,690	-5259,380	-1348,150					
		120°	-2226,410	6059,840	-1350,670	C2-C3	4728,398	4728,359	32	43
		240°	6456,160	61,690	-1348,380					v

Lasertrackerstandpunkt L7										
LT Position	Nestnr.	Orientierung	Messpunktkoordinaten			Strecken [mm]	Iststrecke [mm]	Sollstrecke [mm]	E [µm]	MPE <sub>E</sub> ± [µm]
			X [mm]	Y [mm]	Z [mm]					
LT7	B1	000°	-2097,140	-3836,490	1614,850	4728,083	4728,079	4728,033	39	43 v
		120°	-1846,020	3964,870	1613,090	4728,104				
		240°	4351,140	438,350	1614,570	4728,051				
	B2	000°	2365,510	-3270,990	158,920	9455,508	9455,536	9455,473	63	72 v
		120°	-4036,470	35,780	157,360	9455,599				
		240°	1363,180	3800,280	157,180	9455,500				
	B3	000°	6827,850	-2705,300	-1295,750	4727,425	4727,457	4727,440	9	43 v
		120°	-6226,490	-3893,280	-1297,120	4727,495				
		240°	-1624,820	7161,870	-1298,960	4727,449				

min. Abweichung [µm] 0,971  
max. Abweichung [µm] 68,194

Bemerkung: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## FARO X v2

AIMESS SERVICES		Überprüfung Längenmessabweichung	
Prüfer:	<u>Lisa Knaack</u>	Datum:	<u>16.08.2012</u>
Instrument:	<u>FARO X v2</u>	Reflektor:	<u>1,5" RRR</u>
Instrumentennr.:	<u>X01000802651S</u>	Reflektornr.:	<u>9277</u>

Antastabweichung PS [mm]: -0,005

E Längenmessabweichung  
MPE<sub>E</sub> Maximum Permissible Error E

x MPE<sub>E</sub> überschritten  
v MPE<sub>E</sub> eingehalten

Lasertrackerstandpunkt LT1										
LT Position	Nestnr.	Orientierung	Messpunktkoordinaten			Strecken [mm]	Iststrecke [mm]	Sollstrecke [mm]	E [µm]	MPE <sub>E</sub> ± [µm]
			X [mm]	Y [mm]	Z [mm]					
LT1	A1	000°	-1782,350	169,090	1815,050	1449,824	1449,818	1449,882	-69	±
		120°	636,170	-1673,190	1815,250	1449,817				22
		240°	1069,880	1435,520	1815,030	1449,814				x
	A2	000°	-1802,740	170,600	365,370	2899,107	2899,102	2899,243	-146	±
		120°	643,790	-1692,340	365,580	2899,092				27
		240°	1081,910	1452,020	365,360	2899,107				x
	A3	000°	-1821,610	171,680	-1083,790	1449,283	1449,284	1449,361	-82	±
		120°	651,120	-1709,950	-1083,570	1449,276				22
		240°	1092,810	1467,450	-1083,810	1449,293				x

Lasertrackerstandpunkt L2											
LT Position	Nestnr.	Orientierung	Messpunktkoordinaten			Strecken [mm]	Iststrecke [mm]	Sollstrecke [mm]	E [µm]	MPE <sub>E</sub> ± [µm]	
			X [mm]	Y [mm]	Z [mm]						
LT2	E1	000°	-1099,070	4861,470	-1179,450					±	
		120°	-3847,000	-3169,310	-1178,710	E1-E2	1499,861			22	
		240°	4516,950	-2107,120	-1178,830		1499,908	1499,877	1499,866	6	v
	E2	000°	235,450	5545,970	-1169,500					±	
		120°	-5058,820	-2285,500	-1168,870	E1-E3	2999,789				27
		240°	4241,190	-3581,380	-1168,900		2999,795	2999,787	2999,771	11	v
	E3	000°	1569,930	6230,700	-1159,930					±	
		120°	-6270,770	-1401,900	-1159,450	E1-E4	4500,470				32
		240°	3965,650	-5055,740	-1159,390		4500,465	4500,466	4500,465	-4	v
	E4	000°	2905,450	6915,050	-1150,160					±	
		120°	-7482,870	-517,180	-1149,780	E2-E3	1499,928				22
		240°	3689,140	-6530,700	-1149,660		1499,887	1499,910	1499,905	0	v
	E2-E4						1499,917				±
							3000,609				27
							3000,556	3000,589	3000,599	-15	v
E3-E4						3000,603				±	
						1500,681				23	
						1500,670	1500,679	1500,693	-19	v	

Lasertrackerstandpunkt L3											
LT Position	Nestnr.	Orientierung	Messpunktkoordinaten			Strecken [mm]	Iststrecke [mm]	Sollstrecke [mm]	E [µm]	MPE <sub>E</sub> ± [µm]	
			X [mm]	Y [mm]	Z [mm]						
LT3	C1	000°	-3639,150	3008,780	1812,760					±	
		120°	16,680	-4721,600	1813,310	C1-C2	4727,594				32
		240°	4355,200	1824,210	1813,000		4727,594	4727,588	4727,610	-28	v
	C2	000°	762,810	3939,470	361,310					±	
		120°	-3515,380	-1934,630	361,590	C1-C3	9455,990				46
		240°	3133,700	-2506,220	362,040		9455,962	9455,971	9455,969	-3	v
	C3	000°	5165,600	4869,500	-1090,660					±	
		120°	-7047,470	853,340	-1090,660	C2-C3	4728,396				32
		240°	1911,240	-6837,090	-1089,440		4728,368	4728,384	4728,359	20	v
	D1	000°	-3642,110	3021,080	362,920					±	
		120°	9,090	-4731,920	363,470	D1-D2	2249,348				25
		240°	4367,630	1820,910	363,160		2249,320	2249,334	2249,338	-9	v
	D2	000°	-1440,000	3479,640	362,180					±	
		120°	-1752,410	-3333,150	362,590	D1-D3	4499,658				31
		240°	3750,260	-342,040	362,660		4499,650	4499,645	4499,643	-3	v
	D3	000°	762,830	3939,460	361,310					±	
		120°	-3515,390	-1934,620	361,590	D1-D4	6999,376				39
		240°	3133,700	-2506,220	362,050		6999,352	6999,366	6999,364	-3	v
	D4	000°	3209,930	4449,650	360,870					±	
		120°	-5473,370	-380,650	360,980	D2-D3	2250,310				25
		240°	2448,180	-4910,130	361,870		2250,330	2250,311	2250,305	1	v
	D2-D4						2250,294				±
							4750,028				32
							4750,032	4750,033	4750,026	1	v
D3-D4						4750,038				±	
						2499,718				25	
						2499,702	2499,721	2499,721	-5	v	

Lasertrackerstandpunkt L4											
LT Position	Nestnr.	Orientierung	Messpunktkoordinaten			Strecken [mm]	Iststrecke [mm]	Sollstrecke [mm]	E [μm]	MPE <sub>ε</sub> ± [μm]	
			X [mm]	Y [mm]	Z [mm]						
LT4	D1	000°	-3955,790	-1069,880	346,230	D1-D2	2249,343	2249,346	2249,338	3	±
		120°	2204,670	-3454,380	346,850		2249,338				25
		240°	1508,430	3810,270	346,370		2249,355				v
	D2	000°	-2282,140	432,930	344,260	D1-D3	4499,669	4499,665	4499,643	17	±
		120°	269,900	-2307,130	344,670		4499,663				31
		240°	1711,820	1570,130	344,470		4499,664				v
	D3	000°	-608,500	1937,220	342,200	D1-D4	6999,402	6999,398	6999,364	28	±
		120°	-1666,290	-1160,340	342,390		6999,404				39
		240°	1916,390	-670,860	342,470		6999,388				v
	D4	000°	1251,050	3607,770	340,420	D2-D3	2250,325	2250,320	2250,305	10	±
		120°	-3816,750	114,110	340,340		2250,325				25
		240°	2143,010	-3160,290	340,750		2250,309				v
	D2-D4						4750,058	4750,053	4750,026	21	±
							4750,066				32
							4750,033				v
	D3-D4						2499,733	2499,733	2499,721	6	±
							2499,741				25
							2499,724				v

Lasertrackerstandpunkt L5											
LT Position	Nestnr.	Orientierung	Messpunktkoordinaten			Strecken [mm]	Iststrecke [mm]	Sollstrecke [mm]	E [μm]	MPE <sub>ε</sub> ± [μm]	
			X [mm]	Y [mm]	Z [mm]						
LT5	B1	000°	2884,640	3575,590	1806,080	B1-B2	4728,042	4728,043	4728,033	4	±
		120°	-4593,780	-57,410	1806,170		4728,042				32
		240°	1586,890	-4311,260	1806,300		4728,044				v
	B2	000°	-721,620	889,610	344,990	B1-B3	9455,499	9455,506	9455,473	28	±
		120°	-225,260	-1123,140	345,130		9455,509				46
		240°	1133,920	162,440	345,060		9455,511				v
	B3	000°	-4327,550	-1796,500	-1114,780	B2-B3	4727,457	4727,464	4727,440	18	±
		120°	4143,150	-2188,520	-1114,630		4727,467				32
		240°	680,660	4635,930	-1114,870		4727,468				v
	C1	000°	-4326,940	-1808,510	1784,440	C1-C2	4727,579	4727,598	4727,610	-17	±
		120°	4152,060	-2180,100	1784,630		4727,609				32
		240°	669,880	4641,660	1784,370		4727,607				v
	C2	000°	-721,640	889,590	344,970	C1-C3	9455,978	9455,994	9455,969	19	±
		120°	-225,260	-1123,140	345,120		9455,998				46
		240°	1133,920	162,450	345,060		9456,006				v
	C3	000°	2884,710	3587,450	-1095,010	C2-C3	4728,398	4728,395	4728,359	31	±
		120°	-4603,020	-65,220	-1094,910		4728,389				32
		240°	1597,170	-4317,510	-1094,770		4728,399				x
	D1	000°	-4327,620	-1801,760	334,580	D1-D2	2249,338	2249,338	2249,338	-5	±
		120°	4147,280	-2185,050	334,740		2249,346				25
		240°	676,090	4638,730	334,490		2249,331				v
	D2	000°	-2524,670	-456,820	339,840	D1-D3	4499,654	4499,650	4499,643	2	±
		120°	1961,610	-1653,660	340,000		4499,642				31
		240°	904,380	2401,020	339,840		4499,654				v
	D3	000°	-721,610	889,610	344,990	D1-D4	6999,381	6999,386	6999,364	16	±
		120°	-225,250	-1123,140	345,120		6999,393				39
		240°	1133,910	162,440	345,060		6999,384				v
	D4	000°	1281,660	2384,770	351,210	D2-D3	2250,317	2250,312	2250,305	2	±
		120°	-2654,380	-533,190	351,330		2250,297				25
		240°	1388,240	-2324,310	351,400		2250,323				v
D2-D4						4750,043	4750,048	4750,026	16	±	
						4750,047				32	
						4750,052				v	
D3-D4						2499,727	2499,736	2499,721	9	±	
						2499,750				25	
						2499,730				v	

Lasertrackerstandpunkt L6										
LT Position	Nestnr.	Orientierung	Messpunktkoordinaten			Strecken [mm]	Iststrecke [mm]	Sollstrecke [mm]	E [µm]	MPE <sub>E</sub> ± [µm]
			X [mm]	Y [mm]	Z [mm]					
LT6	A1	000°	-5965,960	2183,770	1790,950	1449,911	1449,914	1449,882	27	±
		120°	997,530	-6274,030	1791,710	1449,922				22
		240°	4824,750	4133,160	1790,710	1449,910				x
	A2	000°	-5971,560	2176,110	341,070	2899,279	2899,275	2899,243	27	±
		120°	1007,050	-6275,350	341,820	2899,270				27
		240°	4820,870	4141,650	340,830	2899,277				x
	A3	000°	-5976,730	2166,880	-1108,260	1449,369	1449,362	1449,361	-4	±
		120°	1017,620	-6275,540	-1107,490	1449,349				22
		240°	4815,380	4150,520	-1108,500	1449,368				v
	C1	000°	-5965,950	2183,810	1790,960	4727,640	4727,621	4727,610	5	±
		120°	997,530	-6274,030	1791,700	4727,595				32
		240°	4824,760	4133,150	1790,720	4727,628				v
	C2	000°	-1914,680	4122,390	314,580	9456,014	9456,003	9455,969	28	±
		120°	-2668,330	-3679,610	315,010	9455,984				46
		240°	4531,840	-348,650	314,870	9456,010				v
	C3	000°	2137,490	6060,500	-1162,300	4728,375	4728,382	4728,359	18	±
		120°	-6334,280	-1084,180	-1162,220	4728,388				32
		240°	4238,090	-4831,020	-1161,500	4728,382				v

Lasertrackerstandpunkt L7										
LT Position	Nestnr.	Orientierung	Messpunktkoordinaten			Strecken [mm]	Iststrecke [mm]	Sollstrecke [mm]	E [µm]	MPE <sub>E</sub> ± [µm]
			X [mm]	Y [mm]	Z [mm]					
LT7	B1	000°	-3823,160	2243,930	1807,060	4728,010	4728,027	4728,033	-12	±
		120°	-242,660	-4426,070	1807,650	4728,036				32
		240°	3544,040	2662,890	1807,240	4728,034				v
	B2	000°	-3482,000	-2236,990	337,690	9455,475	9455,484	9455,473	6	±
		120°	3583,840	-2069,770	337,930	9455,483				46
		240°	-722,020	4075,300	337,500	9455,496				v
	B3	000°	-3140,580	-6717,740	-1130,380	4727,464	4727,458	4727,440	12	±
		120°	7410,020	286,670	-1130,500	4727,446				32
		240°	-4988,020	5487,350	-1130,920	4727,462				v

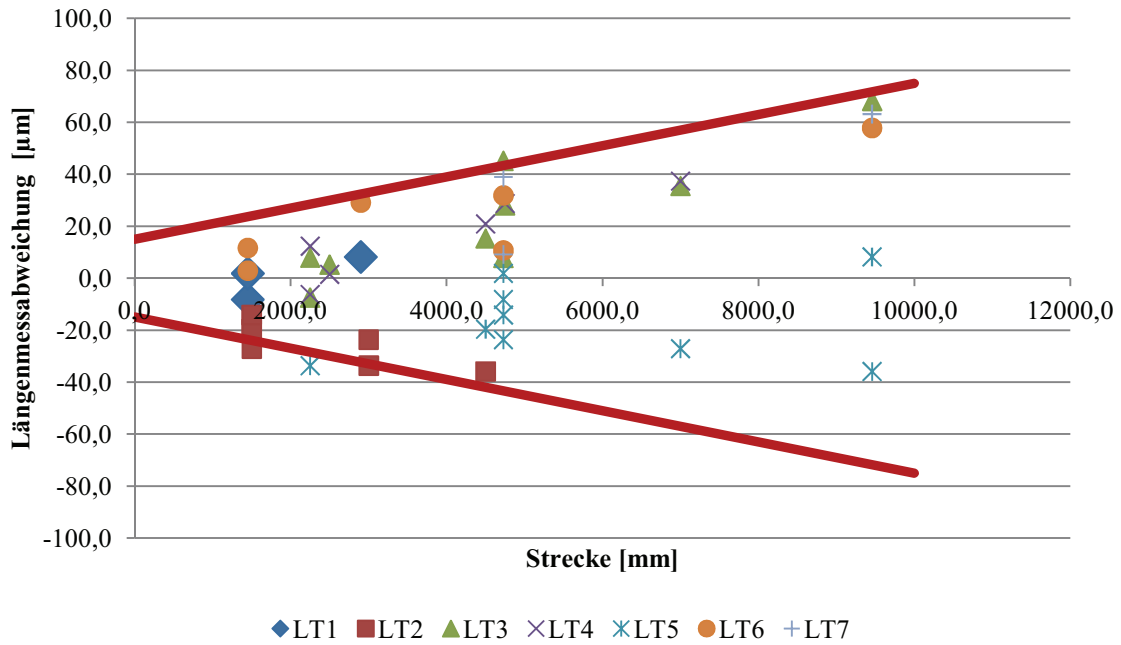
min. Abweichung [µm] 0  
 max. Abweichung [µm] -146

Bemerkung: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_



F – Ergebnisdiagramme der Längenmessabweichung

**Längenmessabweichung Leica AT901 (3279)**



**Längenmessabweichung FARO X v2 (X01000802651S)**

