# Lasertrackermessungen des KIT Karlsruhe und der UniBw München zur Bestimmung der Sollstrecken der Kalibrierbasis der UniBw München

Laser Tracker Measurements of the KIT Karlsruhe and the UniBw Munich for Determining the Nominal Distances of the Base Line of the UniBw Munich

Christoph Herrmann, Wolfgang Liebl, Ingo Neumann

Dieser Beitrag stellt erstmalig Lasertrackermessungen auf einer Kalibrierbasis vor, um die Sollstrecken für EDM-Kalibrierungen ableiten zu können. Die Vorteile des Lasertrackers liegen im Vergleich zu einem Mekometer 5000 in der höheren Messgenauigkeit der Distanzen mittels Interferometer bzw. Absolutdistanzmesser. Beim Messunsicherheitsbudget der gemessenen Distanzen ist die Messunsicherheit des Lasertrackers im Verhältnis zum Einfluss der Meteorologie gering. Daher wird für die Erfassung der Meteorologie bei beiden Messkampagnen ein Sensornetz eingesetzt, das den Brechungsindex entlang des Ausbreitungsweges der elektromagnetischen Welle möglichst repräsentativ erfasst. Die Abweichungen der Teilstrecken zwischen den beiden Messkampagnen sind mit 2 Ausnahmen im Bereich von 0,02 mm bis 0,05 mm. Es konnte gezeigt werden, dass sich Lasertracker in Kombination mit einem Sensornetz zur Meteorologieerfassung zur Sollstreckenbestimmung gut eignen.

Schlüsselwörter: Lasertracker, Sensornetz, Meteorologie, Kalibrierung, Distanzmessung

This contribution presents for the first time laser tracker measurements on a calibration baseline in order to determine the nominal distances for EDM-calibrations. The main benefit of a laser tracker in comparison to a Mekometer 5000 is the high accuracy of the distance measurements with the aid of an interferometer or an absolute distance meter. The uncertainty of the laser tracker is significantly smaller than the influence of the meteorology on the total uncertainty budget of the distances. For this reason, the acquisition of the meteorology parameters was carried out by a sensor network to measure the refractive coefficient for the electromagnetic wave propagation as representative as possible. The deviations between the individual lengths of the two measurement campaigns were within the range of 0.02 mm to 0.05 mm (except for 2 values). It was shown, that the laser tracker measurements in combination with a sensor network for the acquisition of the meteorology parameters are well suited to determine the reference lengths of a calibration baseline.

Keywords: Laser tracker, sensor network, meteorology, calibration, distance measurement

#### **1 EINLEITUNG**

Für die beiden Messkampagnen des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – Geodätisches Institut und der Universität der Bundeswehr München (UniBw M) – Institut für Geodäsie stand jeweils ein Lasertracker des Typs *Leica* AT 901 LR zur Verfügung (*Abb. 1*). Des Weiteren wurde durch das KIT versuchsweise ein *Leica* AT 401 eingesetzt.

Bei dem Lasertracker handelt es sich um ein polares Messsystem, wobei die Strecke mittels Interferometer (IFM) oder Absolutdistanzmesser (ADM) hochgenau bestimmt wird. Laut Hersteller /Leica 2012/ wird mit einem 1,5"-Rot-Ring-Präzisionsreflektor bei einer Sekunde Messzeit eine typische 3D-Genauigkeit der Position von u<sub>XYZ</sub> = ± (7,5 µm + 3 µm / m) in einem Messvolumen von 80 m erreicht. Alle Spezifikationen sind laut Hersteller als Maximum Permissible Error (MPE) angegeben. Typische Genauigkeiten entsprechen in etwa der Hälfte des MPE /Leica 2012/. Das eingebaute IFM erreicht u<sub>IFM</sub> = ± 0,25 µm / m und der ADM u<sub>ADM</sub> = ± 5 µm. Mit diesen Leistungsdaten ist der Lasertracker hervorragend für die Bestimmung der Sollstrecken der Kalibrierbasis geeignet.

Ein Vorteil des Lasertrackers ist die direkte Zentrierung des Präzisionsreflektors in Bezug auf den Referenzpunkt der konischen Bohrung in den Pfeilerplatten (*Abb. 6*). Jedoch machen das große Gewicht, der hohe Stromverbrauch und die zu Tachymetern vergleichsweise geringe Reichweite das Messsystem nur bedingt außeneinsatzfähig. Dennoch überwiegen im Vergleich zum Mekometer ME 5000 die Vorteile, sodass die Lasertracker-Kampagnen trotz des hohen logistischen und personellen Aufwandes durchgeführt wurden. Alle zum Einsatz kommenden Instrumente waren zum Zeitpunkt der Messung durch den Hersteller zertifiziert.

#### 2 ERFASSUNG DER METEOROLOGIE

Das Leistungsvermögen von IFM und ADM zeigt, dass die Unsicherheit der Streckenmessung auch maßgeblich von der ersten Geschwindigkeitskorrektion bestimmt wird und von der Erfassung der atmosphärischen Parameter Temperatur, Luftdruck und relative Luftfeuchte abhängt. Um der Zielstellung einer Maßstabsgenauigkeit von  $1\cdot 10^{-7}$  gerecht zu werden, darf die Unsicherheit der gemessenen Temperatur einen Wert von  $u_{r}=0,1$  °C , des gemessenen Drucks  $u_{\rho}=0,3$  hPa und der relativen Feuchte  $u_{F}=10$ % nicht überschreiten. Dabei sind die Größen repräsentativ für den Signalweg zu erfassen.

#### 2.1 KIT Karlsruhe

Das Sensorsystem, mit dem das KIT die Temperatur entlang des Messweges erfasste, besteht aus 5 ventilierten Pt100 Widerstandsthermometern. Die in Abb. 2 dargestellte Konstruktion einer Sensoreinheit mit Ventilation und Schutzummantelung wurde am Geodätischen Institut des KIT entwickelt und gefertigt /Eschelbach 2009/. Der polierte Edelstahlzylinder schützt den in der Mitte der unteren Öffnung positionierten Pt100 Sensor (Abb. 2, rechts) vor direkter Sonneneinstrahlung. Die Verwendung von Keramikhalterungen für Kabel und Sensor vermindert die Wärmeübertragung des Metallmantels. Ein im Abstand von 5 cm oberhalb angebrachter Ventilator belüftet das Platinplättchen mit einer Strömungsgeschwindigkeit von etwa 2 m/s. Der am unteren Ende des Zylinders angesaugte Luftstrom führt einerseits die durch Strahlung entstehende Wärme ab und verbessert andererseits die Registrierung kurzperiodischer Temperaturschwankungen. Mehrere Kalibrierungen vor und nach der Messkampagne haben die Stabilität und die Korrektheit der Kalibrierparameter gezeigt. Diese Parameter wurden im Vergleich zu zertifizierten Temperatursensoren in den Klimakammern des KIT bzw. der UniBw M mit einer Standardabweichung von 0,02 °C ermittelt.

#### 2.2 UniBw München

Bei den Messkampagnen der UniBw wurde ein Sensornetz der Firma Crossbow zur Erfassung der meteorologischen Parameter eingesetzt. Durch eine gleichmäßige und dichte Verteilung von 20 Sensorknoten (*Abb. 3*, rechts) sollte der Brechungsindex möglichst repräsentativ für den Signalweg erfasst werden. Jeder einzelne Sensorknoten erfasst die Temperatur (T), den Luftdruck (p) und die relative Luftfeuchte (F). Des Weiteren verfügt jeder Sensorknoten



Abb. 1 | Lasertracker Leica AT 901 LR während der Messung (links) und des Transportes (rechts)



Abb. 2 | Sensoreinheit für die Temperaturerfassung (links) und Temperaturfühler (rechts) des KIT

über einen Zwei-Achs-Beschleunigungssensor und einen Lichtsensor sowie tlw. über einen GPS-Sensor des Modells LEA-4A der Firma ublox. Die *Abb. 3* (links) zeigt die Sensorplatine mit den Meteorologiesensoren. Als Temperatur- und Luftfeuchtesensor ist das Modell SHT11 der Firma Sensirion verbaut und das Modell MS5534AM der Firma Intersema dient der Luftdruckmessung.



Abb. 3 | MTS 420 Sensorplatine (links) mit Temperatur-, Luftdruck- und Feuchtesensor (links) und der vollständige Sensorknoten inkl. MICA2 Funkmodul (rechts)

Für die Kommunikation wird das multi-hop ad-hoc Gitternetzwerk-Protokoll XMesh verwendet, welches von der Firma Crossbow entwickelt wurde. Das Sensornetz hat den Vorteil, dass alle Sensorknoten als Endpunkt und/oder Router dienen können. Die Anordnung der Sensorknoten ist in *Abb. 4* dargestellt.

Für jeden Low-Cost Sensorknoten war eine Individualkalibrierung durchzuführen. Vor und nach der Messkampagne wurden die einzelnen Sensoren in der Klimakammer des Geodätischen Labors der UniBw M kalibriert. Dabei ergab sich im Bezug zu den Referenzgeräten im Mittel für die Temperatur eine Standardabweichung von 0,1 K, für den Luftdruck von 0,1 hPa und von 0,3 % für die relative Luftfeuchte /Meyer, Ahrendt 2009/. Diese Genauigkeiten konnten jedoch nur erreicht werden, da die Temperaturstufen lange Zeit konstant gehalten wurden. In nachträglichen Tests zeigte sich, dass insbesondere die Temperatursensoren eine gewisse Trägheit aufweisen, sodass schnelle Temperaturschwankungen zu einer Verschlechterung der Genauigkeiten führen.

#### 3 MESSKONZEPT UND DURCHFÜHRUNG

Die Reichweite des AT 901 LR von nur 80 m erfordert ein entsprechend angepasstes Messkonzept. Die Abb. 5 stellt das Messen der Strecken mittels Zwischenpunkten dar. Bei Abständen von kleiner als 80 m konnten die Pfeiler direkt in Flucht gemessen werden. Der Vorteil dieser Aufstellung ist, dass durch die Differenzbildung der Strecken der konstante Anteil der Additionskorrektur eliminiert wird. Pfeilerabstände bis 160 m wurden mit Standpunkten in etwa der Mitte der Distanz mit Zwei-Lagen-Messung erfasst. Größere Entfernungen waren nur mit Zwischenpunkten zu realisieren (Abb. 5 unten und Abb. 6). Das KIT verwendete dazu zwei eingefluchtete Stative. So konnten einerseits etwaige Bewegungen der Stative während eines Standpunktwechsels direkt anhand einer veränderten Distanz zwischen den Zwischenpunkten bemerkt werden. Andererseits erhält man durch diese Vorgehensweise zwei unabhängige Werte für den Pfeilerabstand. Für die Zwischenpunkte stellte das Geodätische Labor der UniBw M einen eigens angefertigten Einsatz für herkömmliche Dreifüße bereit (Abb. 6), der als Aufnahme für den Reflektor diente. Die Standpunkte des Lasertrackers und die Stative wurden mit einem auf einem Pfeiler zentrierten Tachymeter eingefluchtet, um den Einfluss der Unsicherheit der Winkelmessung auf die gesuchte Strecke zu minimieren.

Eine entscheidende Rolle für das Erreichen der Genauigkeitsforderungen ist die Standsicherheit des Lasertrackers und der Stative für die Zwischenpunkte. Aus diesem Grund wurden vor den Messkampagnen Betonplatten auf der Basis angeordnet, auf denen dann die Schwerlast- bzw. Industriestative platziert wurden /Meyer, Ahrendt 2009/.



Abb. 4 | Verteilung der Sensorknoten entlang der Pfeilerstrecke /Meyer, Ahrendt 2009/

Abb. 5 | Messkonzept mit Zwischenpunkten



Abb. 6 | Reflektor auf einem Pfeiler (links) und Reflektoraufnahme der Zwischenpunkte (rechts)

Prinzipiell nutzte die UniBw dasselbe Messkonzept, wobei Distanzen >160 m jeweils nur einen Zwischenpunkt enthielten. Die Kontrolle auf Plausibilität bei den Messungen der UniBw M erfolgte durch mehrmaliges Messen der jeweiligen Strecken zwischen den Pfeilern in Hin- und Rückweg an unterschiedlichen Tagen. Die Strecke von Pfeiler 7 zu 8 wurde vierfach gemessen, wobei eine der vier Messungen als Ausreißer identifiziert wurde. Zur Vorbereitung der Messkampagne hat das Geodätische Labor der UniBw M den verwendeten Lasertracker einigen Tests unterzogen. Dazu zählten sowohl vor als auch nach den Messungen eine Überprüfung nach NIST (National Institute of Standards and Technology; vgl. /American Society of Mechanical Engineers 2004/). Weiter wurde die Additionskorrektion im Labor bestimmt und das Laserinterferometer im Tracker mit dem Interferometer des Längenmess-Komparators verglichen. Alle Abweichungen lagen innerhalb der oben und in Abschnitt 1.3 geschilderten und somit zu erwartenden Messunsicherheiten.

#### **4 ERGEBNISSE**

Die Ergebnisse des KIT und der UniBwM wurden unabhängig voneinander ermittelt und beziehen sich auf den Mittelpunkt der konischen Bohrung in Höhe der Pfeilerplatte. Die *Tab. 1* zeigt die Gegenüberstellung der Ergebnisse. Die meisten Abweichungen liegen im Bereich von 0,02 mm bis 0,05 mm. Lediglich die Teilstrecke von Pfeiler 7 bis 8 zeigt mit ca. 0,65 mm eine größere Diskrepanz. In der Gesamtauswertung aller Kampagnen /Heunecke 2012/ wurde diese Teilstrecke der UniBw M als unverträglich identifiziert und fließt daher nicht in das Gesamtergebnis ein. Des Weiteren sind die beiden Teilstrecken 2-3 beim AT 401 des KIT und die Teilstrecke 3-4 mit Abweichungen von ca. 0,13 mm und 0,14 mm auffällig. Die Gesamtstrecke 1-8 wurde durch Summation über die einzelnen Teilstrecken berechnet. Der Unterschied von 0,72 mm begründet sich allein durch den großen Unterschied der Teilstrecke 7-8. Dies zeigt sich auch durch die hervorragende Übereinstimmung der Strecke 1-7 mit einer Abweichung von nur 0,065 mm.

Um die Ergebnisse der Teilstrecken quantitativ und qualitativ beurteilen zu können, wurden die zugehörigen Messunsicherheiten (MU) nach dem Konzept des *"Leitfaden zur Bestimmung der Unsicherheit beim Messen"* (/DIN V ENV 13005 1999/ bzw. /JCGM 100 2008/) abgeschätzt. Die berücksichtigten Eingangsgrößen mit ihren Standardunsicherheiten sowie die Quelle und die Art der Unsicherheit sind in *Tab.2* zusammengefasst. Die angewandte Vorgehensweise ist in /Neumann 2012/ ausführlich behandelt.

Im Wesentlichen kann festgehalten werden, dass bei langen Strecken die Atmosphäre den größten Beitrag zur Messunsicherheit der Strecken hat. Des Weiteren ist die Unsicherheit bei der Definition der Bezugsatmosphäre zu berücksichtigen.

Die *Tab. 3* zeigt, ob die in *Tab. 1* aufgeführten Abweichungen als signifikant in Bezug zur abgeschätzten Messunsicherheit bewertet werden müssen. Die jeweiligen Abweichungen zwischen den Messkampagnen werden dafür den geschätzten Messunsicherheiten für die Teilstrecken gegenübergestellt. Dazu sind die Abweichungen zwischen den einzelnen Messkampagnen auch in ppm-Werte umgerechnet. Es zeigt sich, dass lediglich die bereits in *Tab. 1* auffälligen Abweichungen als signifikant zu bewerten sind. In der späteren Gesamtauswertung aller Kampagnen /Heunecke 2012/ wurde der a posteriori Varianzfaktor des AT 401 zu 2,07 geschätzt. Damit wurde in der abschließenden Ausgleichung lediglich die Strecke von 7 nach 8 der UniBW als unverträglich mit den restlichen Daten klassifiziert.

Von	Nach	KIT (1) AT 901 [m]	KIT (2) AT 401 [m]	UniBw M (3) AT 901 [m]	Abweichungen (1) – (3) [mm]	Abweichungen (2) – (3) [mm]
1	2	18,780483	18,780460	18,780500	-0,017	-0,04
6	7	50,625582		50,625600	-0,018	
2	3	82,456864	82,456770	82,456910	-0,046	-0,14 !
5	6	114,298758		114,298775	-0,022	
3	4	146,147003	146,146850	146,146869	0,133 !	-0,02
4	5	177,978869		177,978840	0,029	
7	8	509,698493		509,697839	0,653 !	
1	7	590,287559		590,287494	0,065	
1	8	1099,986052		1099,985330	0,722 !	

Tab. 1 | Vergleich der gemessenen Strecken zwischen dem KIT und der UniBw M

Eingangsgröße	Standardunsicherheit u <sub>i</sub>	Тур	Quelle
Atmosphäre	0,10 ppm (KIT) 0,14 ppm (UniBw M)	Тур А Тур В	aus Kalibrierung
Rundheit des CCR-Reflektors	1,5 µm	Тур В	Herstellerangabe
Nullpunktstabilität des CCR-Reflektors	3 µm	Тур В	Herstellerangabe
Alignementsunsicherheit	10 µm	Тур В	Schätzung
Additionskorrektion (konstanter Anteil)	5 µm	Тур А	Bestimmung im Labor
CCR-Adapter für die Wechselpunkte	50 µm	Тур В	Schätzung
Stativbewegungen der Zwischenpunkte	10 µm	Тур А	Literaturangaben

Tab. 2 | Zusammenstellung der Eingangsgrößen bei der Bestimmung der Messunsicherheiten

Von	Nach	Strecke [m]	Abweichungen AT 901 [mm] (1) – (3)	Abweichungen AT 401 [mm] (2) – (3)	MU (k=1) KIT [mm]	MU (k=1) UniBw M [mm]
1	2	18,7	-0,017 (-0,90 ppm)	-0,04 (-2,1 ppm)	0,013	0,016
6	7	50,6	-0,018 (-0,40 ppm)		0,016	0,017
2	3	82,4	-0,046 (-0,60 ppm)	-0,14 ! (-1,7 ppm)	0,020	0,023
5	6	114,2	–0,022 (–0,15 ppm)		0,026	0,026
3	4	146,1	0,133 ! (+0,90 ppm)	-0,02 (-0,1 ppm)	0,032	0,029
4	5	177,9	0,029 (+0,20 ppm)		0,108	0,063
7	8	509,6	0,653 ! (+1,3 ppm)		0,144	0,120

Tab. 3 | Gegenüberstellung der Messunsicherheiten und Abweichungen der Lasertrackermessungen

## DANKSAGUNG

Die vorgestellten Arbeiten sind im Rahmen aufwendiger Messkampagnen entstanden, an denen sämtliche Mitarbeiter des Geodätischen Labors der UniBw M sowie Herr Barth und Herr Naab vom Geodätischen Institut Karlsruhe mitgewirkt haben. Für ihre ausgezeichnete Arbeit sei ihnen an dieser Stelle ausdrücklich gedankt.

## LITERATUR

American Society of Mechanical Engineers (2004): Performance Evaluation of Laser Based Spherical Coordinate Measurement Systems, ASME B89.4.19-2004.

DIN V ENV 13005: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. Ausgabe 06/1999, Berlin:Beuth, 1999.

Eschelbach, C. (2009): Refraktionskorrekturbestimmung durch Modellierung des Impuls- und Wärmeflusses in der Rauhigkeitsschicht. Dissertation. Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik, Karlsruher Institut für Technologie.

Heunecke, 0. (2012): Auswertung des Ringversuchs auf der neuen Kalibrierbasis der UniBw München zur Bestimmung der Sollstrecken. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 119(2012) 11/12.

JCGM 100: Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections). Version 2008, Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1), 2008.

Leica (2012): Internetseite von Leica Geosystems zum Lasertracker AT 901. http://www.leica-geosystems.de/de/Leica-Absolute-Tracker-AT901\_69047. htm, letzter Zugriff: 03/2012.

Meyer, A.; Ahrendt, C. (2009): Die Bestimmung der "Soll"-Strecken der Kalibrierbasis der Universität der Bundeswehr München durch Anwendung

verschiedener Präzisionsdistanzmessverfahren. Diplomarbeit am Institut für Geodäsie – Geodätisches Labor, Universität der Bundeswehr München (unveröffentlicht).

Neumann, I. (2012): Messunsicherheit bei elektrooptisch bestimmten Strecken. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 119(2012) 11/12.

Dipl.-Ing. (FH) Christoph Herrmann KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT) – GEODÄTISCHES INSTITUT

Englerstraße 7 | 76131 Karlsruhe christoph.herrmann@kit.edu

# Dipl.-Ing. Wolfgang Liebl

INSTITUT FÜR GEODÄSIE – GEODÄTISCHES LABOR

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN

Werner-Heisenberg Weg 39 | 85577 Neubiberg wolfgang.liebl@unibw.de

## Dr.-Ing. Ingo Neumann

INSTITUT FÜR GEODÄSIE – GEODÄTISCHES LABOR

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN

Werner-Heisenberg Weg 39 | 85577 Neubiberg ingo.neumann@unibw.de





