

Netzmessungen mit dem Leica Absolute Tracker AT402 zur Bestimmung geodätischer Prüfstrecken

Network Measurements Using the Leica Absolute Tracker AT402 with Regard to the Determination of Geodetic Base Lines

Philipp Arent, Raphael Bretscher, Martin Schlüter

Zur Bestimmung geodätischer Prüfstrecken unter Nutzung eines Leica Absolute Trackers AT402 stellen wir Konzept und Ergebnisse vor. Dazu greifen wir die positiven Erfahrungen mit Lasertrackern beim Ringversuch auf der neuen Kalibrierbasis der Universität der Bundeswehr München zwischen 2009 und 2011 auf. Im Unterschied zum Ringversuch konzentrieren wir uns auf die Bestimmung neuer und bestehender Prüfstrecken im derzeit üblichen Pfeilerdesign mit einer Pfeilerkopf-Abschlussplatte mit 5/8-Zoll-Gewindezapfen zur Dreifußaufnahme. Dafür schlagen wir eine Netzmessung unter Verwendung einfacher Pfeiler-Aufsatzadapter vor. Abschließend vergleichen wir unsere Ergebnisse, die bei unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen auf der *Eichstrecke Weinolsheim* des Landes Rheinland-Pfalz gewonnen wurden.

Schlüsselwörter: EDM-Kalibrierung, Kalibrierbasis, EDM-Prüfstrecke, Eichstrecke Weinolsheim, Messgröße Länge, Lasertracker

To determine geodetic EDM-baselines using a Leica Absolute Tracker AT402 we introduce the concept and results. For this purpose, we use the positive experience with laser trackers from the intercomparison program at the new geodetic calibration line of the University of the Federal Armed Forces Munich between 2009 and 2011. In contrast to the intercomparison program, we focus on the determination of new and existing calibration lines in the current standard pillar design with a pier head-end plate with 5/8" thread for the tribrach. We propose a network design using a simple pillar attachment adapter. Finally, we compare several results obtained during different meteorological conditions at the calibration base line of the state of Rhineland-Palatinate.

Keywords: EDM calibration, geodetic baseline, EDM-baseline, baseline Weinolsheim, measurand length, laser tracker

1 EINLEITUNG

Lasertracker haben sich bei der Auswertung des Ende 2012 publizierten Ringversuchs auf der neuen Kalibrierbasis der UniBw München als herausragendes Messmittel bewährt. In der Darstellung der jeweils größten Verbesserung pro Sensorsystem im Rahmen der abschließenden Ausreißersuche weisen alle drei am Ringversuch beteiligten Lasertracker die vom Betrag her kleinsten Werte auf (vgl. /Heunecke 2012/). Während die Kalibrierbasis der

UniBw München sich nach /Heister 2012/ durch eine universelle Adaption zu den in der Geodäsie üblichen Zentriereinrichtungen auszeichnet, finden sich in der Praxis überwiegend Prüfstrecken mit dauerhaft gegründeten Pfeilern, welche mit klassischen Pfeilerkopf-Abschlussplatten und 5/8-Zoll-Gewindezapfen zur Dreifußaufnahme ausgestattet sind. Vor diesem Hintergrund gehen wir der Frage nach, ob und inwieweit bestehende Prüfstrecken von der Bestimmung



Abb. 1 | Lasertracker Leica AT402

mittels Lasertrackern profitieren können, und setzen dafür einen Leica Absolute Tracker AT402 ein (Abb. 1). Für den eingesetzten Lasertracker AT402 bescheinigt der Hersteller im Kalibrierzertifikat die Rückführung der eingesetzten Prüfgeräte (Laserinterferometer, Frequenznormal und Wetterstationen) auf nationale Standards. Ergänzend beziehen wir Ergebnisse der Präzisionstachymeter Leica TS30 der Hochschule Mainz und des LVerGeo ein.

Der Leica AT402 verbindet mit seinem großen Messvolumen, der kompakten Bauform sowie der Stromversorgung über interne Batterien die Stärken moderner Tachymeter mit der Genauigkeit traditioneller Lasertracker. Die Messunsicherheit einer 3D-Koordinate gibt der Hersteller mit $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$ als Maximum Permissible Error (MPE) an /Hexagon Metrology 2014/. Typische Ergebnisse entsprechen in etwa der Hälfte des MPE. Der verbaute Absolut-Distanzmesser (ADM) liefert eine Genauigkeit von $\pm 10 \mu\text{m}$, die Winkelgenauigkeit beschreibt der Hersteller mit $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$. Alle Genauigkeiten beruhen auf der Verwendung eines 1,5-Zoll-Rot-Ring-Reflektors und einem Messvolumen bis zu 80 m. Diese Spezifikationen und die Zertifizierung für Außenanwendungen, die laut Hersteller erstmalig für Lasertracker gilt, prädestinieren dieses Instrument für hochgenaue Messungen im Außenbereich.

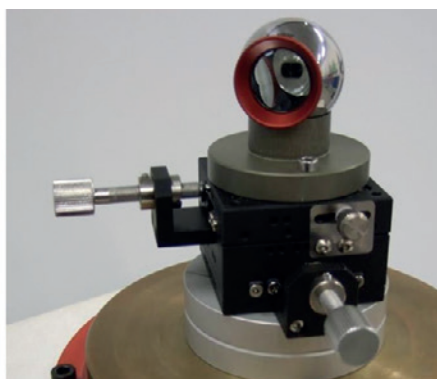


Abb. 2 | Zentrierung des SMR in konischer Bohrung (links) /Herrmann et al. 2012/, Adapter SST mit SMR auf einem Laborpfeiler (rechts)

2 MESSKONZEPT UND DURCHFÜHRUNG

Unsere Untersuchungen führen wir auf der Prüfstrecke des Landes Rheinland-Pfalz in Weinolsheim durch. Die Prüfstrecke als Messobjekt garantiert durch die Stabilität der Messpfeiler eine gute Wiederholbarkeit der Netzmessung in kurzräumigen Zeitabständen. An der L425 zwischen Weinolsheim und Dolgesheim gelegen, ist sie von der Hochschule Mainz in kurzer Zeit erreichbar, erlaubt ein weitgehend ungestörtes Arbeiten und weist die typische Zuwegung auf.

Um die beim heute üblichen Verfahren der Streckenmessung in allen Kombinationen nach /Joekel et al. 2008/ zu erwartenden Zentrierfehler zu minimieren, positionieren wir den Lasertracker stets exzentrisch. Weiterhin müssen die Pfeilerpunkte selbst besser als 0,1 mm reproduzierbar sein. Im Idealfall steht dafür auf dem Pfeiler ein konisch gebohrtes Magnetnest zur Verfügung; vgl. die Lagerung eines Spherically Mounted Reflectors (SMR) in der konischen Bohrung der Pfeilerplatte der Münchner Kalibrierbasis (Abb. 2 links). Um eine Lösung für konventionelle Prüfstrecken zu erhalten, setzen wir mehrere experimentelle Pfeileradapter als Reflektorträger ein, z. B. den sog. starren SMR-Träger (SST) in Abb. 2 (rechts), dessen Aufbau, Justierung und Eigenschaften wir in Abschnitt 2.1 beschreiben.

Aus logistischen Gründen und um unsere Erfahrungen an der Prüfstrecke gut auf alternative Aufgabenstellungen der Industrievermessung übertragen zu können, setzen wir ein langgestrecktes Netz parallel zur Prüfstrecke ein (vgl. Abschnitt 2.2). Die messungsbegleitende Einbeziehung der aktuellen meteorologischen Daten ist eine weitere zentrale Voraussetzung. Zur Selbstkontrolle führen wir die Vermessung der Prüfstrecke an mehreren Tagen mit unterschiedlichen Außentemperaturen durch. Einsatz und Prüfung der meteorologischen Sensoren beschreiben wir in Abschnitt 2.3.

2.1 5/8-Zoll-Gewindeadapter als Reflektorträger

Um Messpfeilerpositionen auf einer konventionellen Prüfstrecke mit dem Lasertracker hochgenau beobachten zu können, muss der Reflektorträger eine hochgenaue Positionierung des Reflektors zentrisch zum 5/8-Zoll-Gewindebolzen ermöglichen. Im Rahmen dieses Projekts wurde die Zentrierung anhand zweier Varianten, nämlich anhand des oben bereits genannten starren SMR-Trägers (SST) und eines sog. horizontierbaren SMR-Trägers (HST) erprobt.

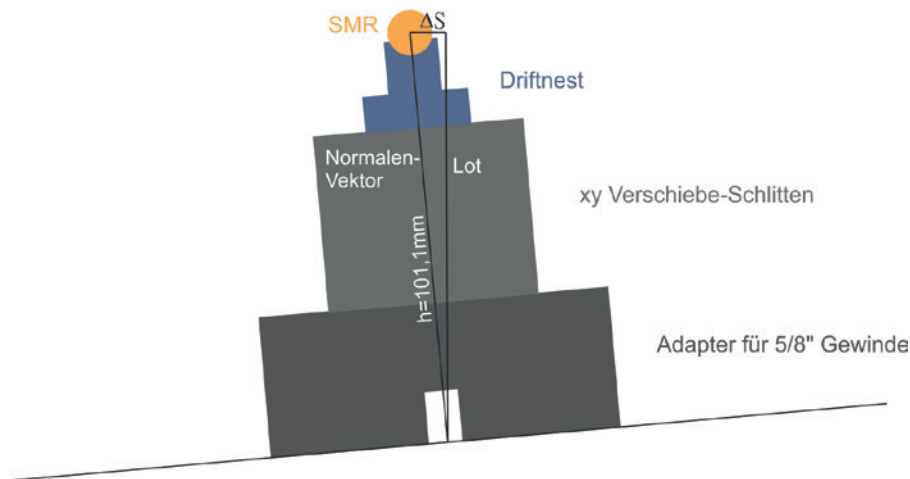


Abb. 3 | Der starre SMR-Träger (SST)

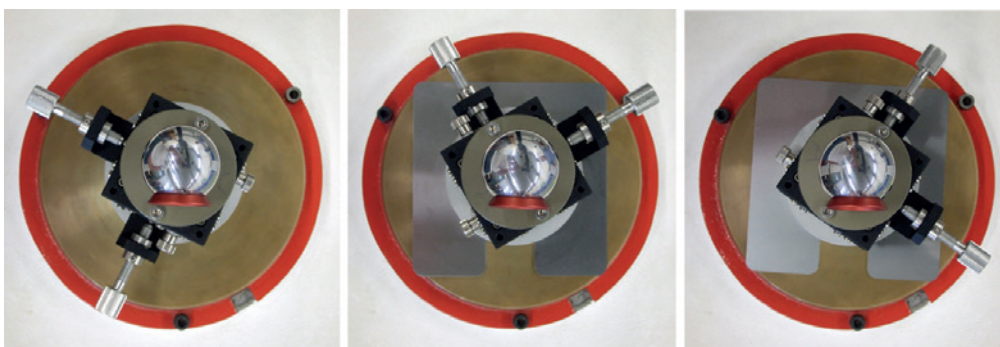


Abb. 4 | Zentrierung des starren SMR-Trägers mit Shims

Der starre SMR-Träger besteht von unten nach oben aus je einer Platte mit Gewindebohrungen, einem fixierbaren XY-Translations-tisch GMT 7T-MY60 und einem Magnetnest für den SMR (Abb. 3). Alle aufgeführten Komponenten sind im Sinne eines Baukastensystems wiederverwendbar. Der modulare Aufbau wurde aus Zeit- und Kostengründen gewählt. Der SST lässt sich durch eine sinn-gemäße präzise Fertigung in einem Stück in seiner Bauhöhe deutlich reduzieren und damit voraussichtlich weiter verbessern.

Um den SMR senkrecht über dem 5/8-Zoll-Gewindezapfen zu justieren, werden im Labor schrittweise handelsübliche Shims in U-Form mit einer Dicke von je 0,1 mm zwischen Pfeilerplatte und Aufsatzadapter unterlegt. Dadurch wird der komplette Pfeileraufsatz schrittweise gedreht, sodass SMR-Positionen bei wachsendem Abstand zur Pfeilerplatte beobachtet werden können (Abb. 4). Die jeweilige SMR-Position wird mit dem Lasertracker aus kurzer Entfernung bestimmt. Bei einem noch nicht justierten SMR-Träger formen die SMR-Positionen einen Zylinder. Der Aufsatzadapter wird über den Translationstisch so eingestellt und fixiert, dass die SMR-Positionen im Rahmen der Messgenauigkeit auf der Zylinderachse senkrecht zur Pfeilerplatte zu liegen kommen. Die Zentriergenauigkeit berechnet sich als Standardabweichung der Abstände der einzelnen Messpunkte von dieser Raumgeraden und beträgt etwa 25 μm . Abschließend erfolgt eine rechnerische Korrektur auf den lotrechten Punkt, in Höhe des SMR, über die Neigung der jeweiligen Pfeilerplatte. Die Erfassung der Neigung einer Pfeilerplatte erfolgt hier mit einer digitalen Libelle Wyler Minilevel A10.

Die Wiederholgenauigkeit bei der Bestimmung einer Pfeilerkoordinate mit dem starren SMR-Träger wurde durch mehrfache

Messungen bestimmt, wobei zwischen den einzelnen Beobachtungen der starre SMR-Träger vom Pfeiler entfernt und anschließend erneut auf dem Pfeiler aufgeschraubt wurde. Die derart ermittelte Wiederholgenauigkeit lag im Labor unter 5 μm , sowohl in der Horizontalen als auch in der Vertikalen.

Ergänzend wurde experimentiert, ob sich bei geschickter Handhabung auch unter Nutzung einer Dreiklauenaufnahme in einem höhenstabilen Dreifuß eine ausreichende Genauigkeit erzielen lässt. Da bei der Zentrierung mit U-förmigen Shims vielfach einer der drei Auflagepunkte des Dreifußes formbedingt nicht auf dem Shim aufliegt, empfiehlt sich hier der Einsatz von Kugellagerpassscheiben. Nach unserer Erfahrung erlaubt die Dreiklauenaufnahme typischerweise nur eine Zentriergenauigkeit in der Größenordnung von etwa 0,1 mm bis 0,3 mm. Verschiebt man jedoch den Dreifußadapter, der nun nach Abb. 5 mit einer Dreiklauenaufnahme versehen ist, in eine festgelegte, wiederholbare Position und schließt stets erst dann die Klemmschraube des Dreifußes, so lässt sich mit ein wenig Übung und unter Nutzung des oben beschriebenen Justiervorgangs ebenfalls eine Zentriergenauigkeit wie mit dem starren SMR-Träger erzielen.

Problematisch am horizontierbaren SMR-Träger ist, dass ein erfolgreiches Aufsetzen nicht garantiert und schwer kontrollierbar ist. Für den horizontierbaren SMR-Träger sei weiterhin der Hinweis von /Schwarz 2012/ wiederholt und betont, dass die Horizontierung mit einer Dosenlibelle am Dreifuß nicht ausreicht. Der starre SMR-Träger dagegen ist sehr einfach zu handhaben, erzwingt aber die sonst unübliche Neigungsmessung der Pfeilerplatte und die zugehörige rechnerische Korrektur.

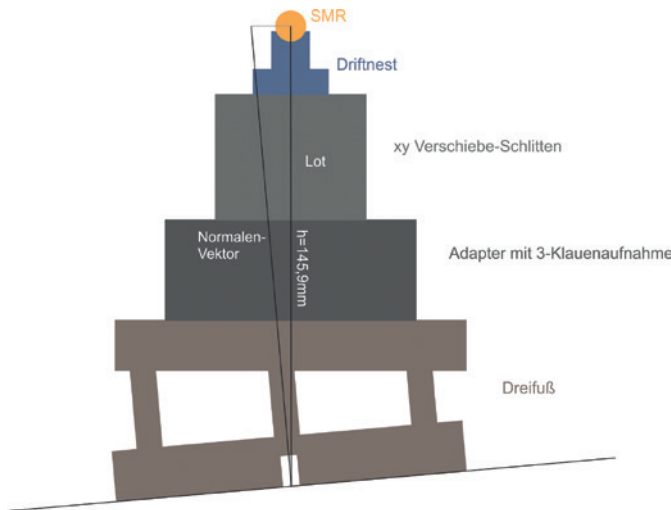


Abb. 5 | Der horizontalisierbare SMR-Träger (HST)

In den praktischen Durchgängen auf der *Eichstrecke Weinolsheim* wurden stets beide Adaptervarianten unabhängig voneinander verwendet und ausgeglichen. Die maximale Auswirkung der Pfeilerneigungen als Zentrierungskorrektur in Richtung der Prüfstrecke resultiert aus zwei einander entgegengesetzten Neigungen auf Pfeiler 1 und auf Pfeiler 5, welche zu der erheblichen Streckenkorrektur von 2,14 mm führen.

2.2 Netzplanung und Netzgeometrie

Ziel der Netzmessung ist, die Koordinaten der sechs Pfeiler der *Eichstrecke Weinolsheim* in einem lokalen System zu bestimmen. Zentrierfehler werden minimiert, indem das Messinstrument grundsätzlich frei stationiert wird und auf den Messpfeilern ausschließlich die oben beschriebenen Adapter verwendet werden. Aus den Pfeilerkoordinaten werden abschließend die Strecken zwischen den Pfeilern berechnet. Um eine fundierte Aussage über die Genauigkeit der bestimmten Strecken treffen zu können, wurden die Pfeiler in drei unabhängigen Messungen an drei Messtagen mit unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen gemessen.

Im Unterschied zur Sollstreckenbestimmung mit Lasertrackern im Ringversuch 2012 in München nach /Herrmann et al. 2012/ verzichten wir generell auf in die Prüfstrecke eingefluchtete Zwischenpunkte. Stattdessen orientieren wir uns, primär aus logistischen Gründen, bei der Netzplanung an der typischen Zuwegung, die in direkter Nachbarschaft parallel zur Prüfstrecke verläuft. Dazu wurde der Lasertracker anfangs über vier Verknüpfungspunkte orientiert. Die Pfeiler wurden unabhängig voneinander jeweils mit beiden Adaptertypen aufgenommen. Anschließend wurden für den nächsten Standpunkt zwei weitere Verknüpfungspunkte vorgeschoben (Abb. 6 oben). Beim Standpunktwechsel dienten diese vorgeschobenen Punkte

wieder als Verknüpfungspunkte, der Pfeiler wurde erneut aufgenommen und es wurden ebenfalls Neupunkte vorgeschoben (Abb. 6 unten). So entsteht ein langgestrecktes Netz, welches die Pfeiler in Richtung der Prüfstrecke einschließt und die Doppelaufnahme jedes Pfeilerpunkts ermöglicht. Die Zielweiten betragen in der Netzplanung maximal 115 m. Bei der tatsächlichen Netzmessung hat sich gezeigt, dass lediglich Strecken bis zu 70 m wirtschaftlich gemessen werden konnten, was zu zehn Tracker-Standpunkten und 18 Verknüpfungspunkten führt.

Entscheidend für die Genauigkeit sind die Standsicherheiten der Stative für die Verknüpfungspunkte. Die Verknüpfungspunkte wurden mit stabilen Holzstativen und darauf fixierten Magnethaltern etwa in Kippachshöhe des Trackers realisiert. Für den Tracker wurde ein High-Definition-Surveying-(HDS-)Stativ mit Fiberglasbeinen verwendet. Die Standpunkte wurden stets auf den asphaltierten Weg entlang der Prüfstrecke gelegt. Die Netzgeometrie ermöglicht eine gewisse Kontrolle hinsichtlich etwaiger Punktverschiebungen.

Die vorab mit der Software Spatial Analyzer (New River Kinematics Inc.) durchgeführte Netzplanung beruht auf der Monte-Carlo-Simulation und ergab Koordinatenabweichungen von 0,03 mm bis 0,05 mm in Richtung der Prüfstrecke (y) und 0,10 mm bis 0,24 mm quer zur Prüfstrecke (x). Für die spätere Berechnung der Strecken zwischen den Pfeilern ist lediglich die Y-Richtung von Belang. Eine zweite Netzplanung mit dem Programm Netz2D des Geodätischen Instituts des KIT, welches auf dem Gauß-Markoff-Modell basiert, ergab keine signifikanten Unterschiede. Abb. 7 zeigt die Streckenverhältnisse sowie die Fehlerpunktwolken einer ausgewerteten Messung 30 000-fach überhöht (blau = Pfeiler, rot = Verknüpfungspunkte).

Als vergleichende Messung wurden die Pfeiler an jeweils drei Messtagen mit dem Präzisionstachymeter Leica TS30 von drei

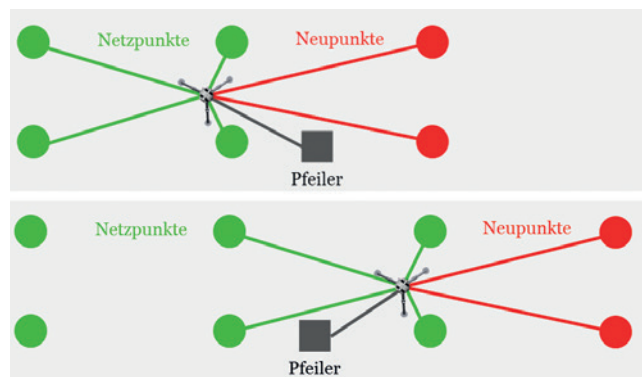


Abb. 6 | Konzeption der Netzmessung

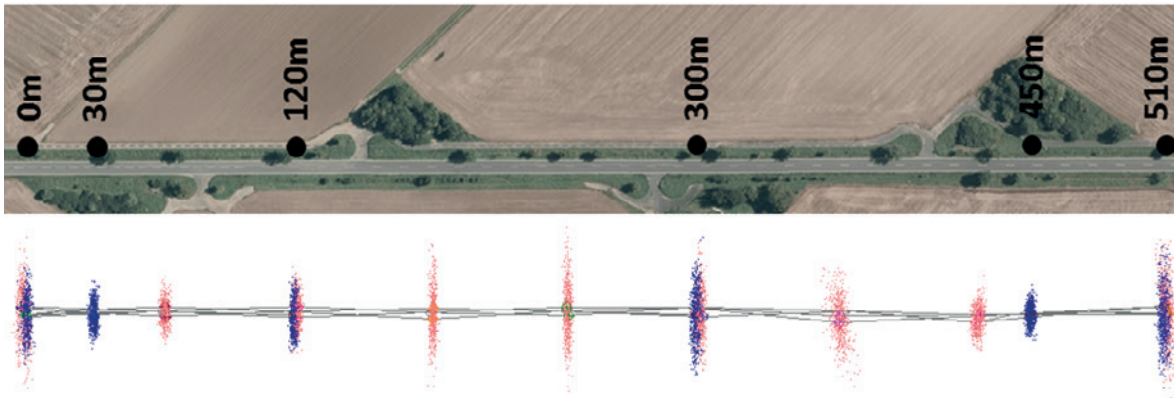


Abb. 7 | Streckenaufteilung der Eichstrecke Weinolsheim (oben), Fehlerpunktwolken der ausgewerteten Messung, 30000-fach überhöht (unten)

Standpunkten entlang der Prüfstrecke aufgenommen. Auch hier wurde auf das klassische Aufnahmeverfahren der Pfeiler in allen Kombinationen verzichtet und das Instrument exzentrisch am Anfang, am Ende und in der Mitte der Prüfstrecke positioniert, um eventuelle Zentrierungsfehler nicht in die Bestimmung der Pfeiler zu übertragen.

2.3 Erfassung der Meteorologie

Zur Erfassung der meteorologischen Daten haben wir die Sensoren des AT402 sowie die nicht rückgeführten Handmessgeräte Greisinger GFTB100 (Präzisionshygrometer, -thermometer und -barometer) und Greisinger GMH3710 (Präzisionsthermometer) genutzt. Gemäß den Herstellerangaben liegt die Standardabweichung einer gemessenen Temperatur bei $\pm 0,3$ °C für den externen Temperatursensor des AT402 und bei $\pm 0,1$ °C für die Greisinger Handmessgeräte. Druck und relative Luftfeuchte werden laut den Herstellern mit einer Genauigkeit von $\pm 1,0$ hPa bzw. ± 5 % beim AT402 und $\pm 1,5$ hPa bzw. $\pm 1,5$ % beim Greisinger GFTB100 erfasst. Um den Maßstab einer gemessenen Strecke auf $1 \cdot 10^{-7}$ festlegen zu können, müssten die absoluten meteorologischen Bedingungen auf 0,1 °C, 0,3 hPa und 10 % relative Feuchte genau bekannt sein und zwar repräsentativ für die gesamte Bahnkurve des Messstrahls /Herrmann et al. 2012/.

Um das Genauigkeitspotenzial der meteorologischen Sensorik unter den praktischen Gegebenheiten während der Prüfstreckemessungen realistisch einschätzen zu können, haben wir an vier Tagen während der Monate Oktober bis Dezember 2014 für jeweils ein bis zwei Stunden die eigenen Messwerte mit den Daten der Wetterstation des Instituts für Physik der Atmosphäre der Johannes-Gutenberg-Universität (JGU) Mainz verglichen. Höhe über Grund und Untergrund wurden vergleichbar gewählt, statt einer ventilierten Strahlungsschutzhütte war unsere Sensorik nur durch einen einfachen Feldschirm vor direkter Strahlung und entsprechend der Bauweise der Handmessgeräte vor indirekter Strahlung geschützt. Bei unterschiedlichem Bewölkungsgrad betrug die mittleren Temperaturen in den jeweiligen Zeitfenstern 19 °C, 12 °C, 7 °C und 3 °C. Tab. 1 zeigt die mittleren Abweichungen sowie deren Standardabweichungen. Entsprechend dieses einfachen Vorgehens sollte der

Maßstab einer gemessenen Strecke auf etwa $3 \cdot 10^{-7}$ festzulegen sein, grundsätzlich erscheinen alle Sensoren ähnlich gut geeignet zur Erfassung der Meteorologie während der Netzmessungen.

Die eingehendere Analyse der Temperaturdaten unter Einbeziehung der jeweiligen äußeren Bedingungen lässt vermuten, dass der Einfluss der indirekten Strahlung nicht unterschätzt werden darf. Beim Auftreten kurzer Wolkenlücken weichen die mobilen Sensoren systematisch von der strahlungsgeschützten Wetterstation ab, während bei sehr dichter Bewölkung in den Tagesrandstunden die 0,1-°C-Grenze unterschritten wird. Vermutlich lassen sich die in Tab. 1 für die Temperaturerfassung angegebenen Standardabweichungen durch die Nutzung eines mobilen, aktiv ventilierten Strahlungsschutzes signifikant reduzieren. Für die externen Temperaturfühler von AT402 und GMH3710 besteht dazu eine Reihe von Optionen (vgl. z. B. /Blonquist & Bugbee 2014/).

Auf der Prüfstrecke wurden die Sensoren des AT402 am Anfang und einer der Präzisionsthermometer am Ende jedes Messwegs platziert. Durch die kurzen Messdistanzen von generell kleiner als 100 m wird so ein recht hoch aufgelöstes Temperaturprofil entlang der Prüfstrecke, zeitlich parallel zur Messung, erstellt. Der AT402 registriert und verrechnet die Wetterdaten synchron mit den einzelnen Messungen. Die bei der Ablesung am Ende des Messwegs entstandenen Unterschiede waren kleiner als 0,3 °C, sodass hier auf eine Verrechnung verzichtet wurde. In der Optimierung der Gewinnung repräsentativer meteorologischer Daten sehen wir für uns zunächst naheliegendes pragmatisches Verbesserungspotenzial, wie oben diskutiert. /Schwarz 2012/ fordert und begründet darüber hinaus grundlegende und weitgefächerte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Blick auf das Ziel einer Genauigkeit von kleiner $1 \cdot 10^{-7}$. Mannigfaltige neue Möglichkeiten lohnen, neu

Instrument	Temperatur		Luftdruck	
	Mittlere Abweichung	Standardabweichung	Mittlere Abweichung	Standardabweichung
AT402	0,17 °C	0,24 °C	1,51 hPa	0,12 hPa
GFTB 100	0,12 °C	0,29 °C	1,09 hPa	0,08 hPa
GMH 3710	-0,18 °C	0,23 °C	-	-

Tab. 1 | Vergleich der meteorologischen Sensoren mit der Wetterstation des Instituts für Physik der Atmosphäre der JGU

gedacht zu werden, von der GNSS-Integration bei sehr großen Reichweiten bis zur simultanen Klimaprofilierung durch Unmanned Aircraft Systems (UAS).

3 ERGEBNISSE UND BEWERTUNG

Die Auswertung der Leica-AT402-Netzmessung wurde getrennt für die drei Messtage durchgeführt. Die Auswertung erfolgte in Spatial Analyzer mit der Programmfunktion Unified Spatial Metrology Network (USMN). Diese basiert auf einer verketteten Transformation, die auch als Bündelausgleichung bezeichnet wird.

Häufig wird bei Messungen mit dem Lasertracker in der Industrievermessung mit nicht-horizontierten lokalen Koordinatensystemen gearbeitet. Der AT402 bietet allerdings, wie ein geodätisches Tachy-

meter, die Möglichkeit, stets ein horizontiertes System unter Verwendung des integrierten Kompensators anzulegen. Beide Auswertestrategien wurden durchgeführt und gegenübergestellt. Unter Einbeziehung der Kompensatorablesungen in der Ausgleichung werden in der Bündelausgleichung vier Unbekannte, also drei Translationen in x -, y - und z -Richtung und eine Rotation um die z -Achse geschätzt. Alternativ, ohne Nutzung der Kompensatorablesungen, werden zusätzlich die Rotationen um die x - und y -Achse mitgeschätzt (Stehachsschiefen). Der gemessene Horizont jedes einzelnen lokalen Lasertrackersystems wird dann nicht berücksichtigt.

Der Vergleich der Ausgleichungsergebnisse, die aus den unterschiedlichen Auswertestrategien resultieren, zeigt keine signifikanten Unterschiede in den horizontalen Komponenten (S_x , S_y). Im Gegensatz dazu liegen in der vertikalen Komponente (S_z) signifikante Unterschiede vor. Die mittlere Standardabweichung der Höhenkomponente, bei der Ausgleichung mit Drehung um x - und y -Achse, beträgt 0,43 mm. Werden die Kompensatorablesungen einbezogen, so beträgt die mittlere Standardabweichung der Höhenkomponente lediglich 0,12 mm. Die Standardabweichung der 3D-Koordinate, bei deren Bestimmung der Horizont festgehalten wurde, ist ca. 40 % geringer als bei einer Ausgleichung ohne Berücksichtigung des Horizonts (Tab. 2). Im Vergleich beider Auswertestrategien zeigt sich, dass für die Stehachsschiefen offensichtlich grob fehlerhafte Ergebnisse resultieren. Die Ursache dafür sehen wir primär in der Netzgeometrie, die nicht auf die Schätzung der Stehachsschiefen hin ausgelegt ist. Deshalb beziehen wir die Kompensatorablesungen als Beobachtungen in die Netzausgleichung ein. Weitere geometrische Reduktionen betrachten wir an dieser Stelle nicht, Bahnkrümmungs- und Erdkrümmungsreduktion dürfen im Hinblick auf die resultierenden Strecken zwischen den Pfeilerpunkten vernachlässigt werden /Joeckel et al. 2008/.

Die mittlere Standardabweichung in Richtung der Prüfstrecke beträgt 0,04 mm. Die Standardabweichungen quer und vertikal zur Prüfstrecke zeigen – wie schon aus der Netzplanung bekannt

Punktnummer	S_x	S_y	S_z	S_d
Pfeiler 1	0,42 mm	0,04 mm	0,16 mm	0,45 mm
Pfeiler 2	0,27 mm	0,04 mm	0,10 mm	0,29 mm
Pfeiler 3	0,25 mm	0,03 mm	0,12 mm	0,28 mm
Pfeiler 4	0,39 mm	0,03 mm	0,13 mm	0,42 mm
Pfeiler 5	0,16 mm	0,04 mm	0,08 mm	0,18 mm
Pfeiler 6	0,40 mm	0,05 mm	0,13 mm	0,42 mm
Mittlere Standardabweichung	0,32 mm	0,04 mm	0,12 mm	0,34 mm
			<0,1	<0,5

zum Vergleich: ohne Horizont

Punktnummer	S_x	S_y	S_z	S_d
Mittlere Standardabweichung	0,33 mm	0,05 mm	0,43 mm	0,55 mm

Tab. 2 | Standardabweichungen, in Spatial Analyzer als measurement uncertainties bezeichnet

Strecke	Strecke	Horizontierbarer SMR Träger			Starrer SMR Träger		TS 30	LVermGeo
		28.10.2014	31.10.2014	12.11.2014	28.10.2014	12.11.2014		
P1-P2	30,1 m	0,05 mm	-0,05 mm	-0,01 mm	0,06 mm	-0,06 mm	0,18 mm	0,15 mm
P1-P3	120,0 m	0,09 mm	-0,21 mm	0,00 mm	0,16 mm	-0,09 mm	0,07 mm	0,31 mm
P1-P4	300,1 m	0,03 mm	-0,13 mm	-0,06 mm	0,06 mm	0,05 mm	-0,09 mm	0,58 mm
P1-P5	450,1 m	-0,24 mm	-0,09 mm	-0,12 mm	0,22 mm	0,08 mm	-0,08 mm	0,28 mm
P1-P6	510,2 m	-0,13 mm	0,01 mm	-0,08 mm	0,16 mm	-0,02 mm	-0,26 mm	0,61 mm
Mittlere Abweichung		0,09 mm			0,10 mm		0,13 mm	0,39 mm

Tab. 3 | Gegenüberstellung der Messergebnisse

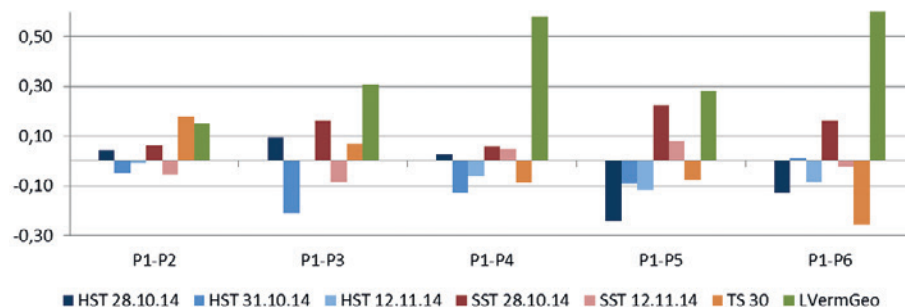


Abb. 8 | Diagramm zur Gegenüberstellung der Messergebnisse (in mm)

(Abb. 7) – um den Faktor 10 größere Werte. Damit dürfen auch diese Abweichungen im Hinblick auf die resultierenden Strecken zwischen den Pfeilerpunkten vernachlässigt werden.

Abschließend werden die Strecken zwischen den Pfeilern der Prüfstrecke aus den Ergebnissen der drei Messtage, bei denen jeweils beide Adaptervarianten verwendet wurden, ermittelt und dienen als Bezug für Tab. 3 und Abb. 8. Die mittleren Abweichungen der einzelnen Messtage von den mittleren Strecken aus allen Trackermessungen liegen für beide Adaptertypen bei 0,10 mm. Bei der Messung mit dem Präzisionstachymeter Leica TS30 weichen die ermittelten Strecken lediglich um 0,13 mm von den Strecken ab, die mit dem Leica AT402 bestimmt wurden. Ähnlich wie den Lasertracker haben wir dafür den TS30 exzentrisch zu den Pfeilern der Prüfstrecke stationiert.

Das Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation des Landes Rheinland-Pfalz (LVermGeo) unterhält die *Eichstrecke Weinolsheim* zur Prüfung der im Land eingesetzten EDM-Geräte. Die hierfür vorhandenen Sollstrecken zwischen den Pfeilern der Prüfstrecke wurden ebenfalls mit den Strecken, die im Rahmen dieses Projekts mit dem Leica AT402 bestimmt wurden, verglichen. Die Gegenüberstellung der Messungen des Leica AT402 mit den Sollstrecken zeigt eine Übereinstimmung im Rahmen der vom LVermGeo angegebenen Genauigkeit von ca. 0,5 mm. Die mittlere Abweichung beträgt 0,39 mm (Tab. 3 und Abb. 8).

Die verbleibenden, geringfügigen Differenzen im Submillimeterbereich resultieren nach unserer Einschätzung primär aus der unterschiedlichen Temperaturerfassung und dem unterschiedlichen Messkonzept. Bei den Trackermessungen haben wir ein wesentlich feiner aufgelöstes Temperaturprofil entlang der Prüfstrecke erstellt, als bei tachymetrischen Prüfstreckenbestimmungen bislang üblich. Weiterhin positioniert das LVermGeo seine Instrumente, im Gegensatz zu unserem Vorgehen, direkt auf den Pfeilern, wobei die Zentriergenauigkeit des Instruments mit in die Streckenbestimmung einfließt.

4 FAZIT UND AUSBLICK

Durch die Netzmessungen mit dem Leica Absolute Tracker AT402 gelingt es, die Genauigkeit der Prüfstreckenbestimmung Weinolsheim gegenüber der derzeit üblichen Vorgehensweise mit dem Leica TS30 etwa um den Faktor 2 bis 3 zu steigern, bei erheblich gesteigertem Aufwand. Kurz- und mittelfristig wird unser Hauptaugenmerk einer Optimierung der Gewinnung repräsentativer meteorologischer Daten für den Lichtweg der elektrooptischen Distanzmessung gelten müssen.

DANK

Für die freundliche Zusammenarbeit danken wir den Mitarbeitern des Vermessungs- und Katasteramts Rheinhessen-Nahe, Dienstort Alzey, sowie Herrn Gerhard Kabel vom Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz (LVermGeo) in Koblenz für die Bereitstellung der Informationen zur *Eichstrecke Weinolsheim*.

Das Institut für Physik der Atmosphäre (IPA) der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz stellt uns seit vielen Jahren neben

seinem vorbildlichen kostenfreien Internetangebot immer wieder nichtöffentliche Datenreihen unbürokratisch zur Verfügung. Für beide nicht selbstverständlichen Services möchten wir uns hier stellvertretend bei Herrn Dr. Philipp Reutter und Herrn Berthold Friederich herzlich bedanken.

LITERATUR

Blonquist, M.; Bugbee, B. (2014): Radiation shields. In: Meteorological Technology International, (2014)8, 78 – 82.

Heister, H. (2012): Die neue Kalibrierbasis der UniBw München. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 119(2012)10, 336 – 343.

Herrmann, C.; Liebl, W.; Neumann, I. (2012): Lasertrackermessungen des KIT Karlsruhe und der UniBw München zur Bestimmung der Sollstrecken der Kalibrierbasis der UniBw München. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 119(2012)8-9, 309 – 313.

Heunecke, O. (2012): Auswertung des Ringversuchs auf der neuen Kalibrierbasis der UniBw München zur Bestimmung der Sollstrecken. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 119(2012)11-12, 380 – 385.

Hexagon Metrology (2014): Leica Absolute Tracker AT402. Produktbroschüre.

Joeckel, R.; Stober, M.; Huep, W. (2008): Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren. Wichmann, Berlin/Offenbach.

Schwarz, W. (2012): Einflussgrößen bei elektrooptischen Distanzmessungen und ihre Erfassung. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 119(2012)10, 323 – 335.

B. Sc. Philipp Arent

HOCHSCHULE MAINZ
INSTITUT FÜR RAUMBEZOGENE
INFORMATIONSD- UND MESSTECHNIK I3MAINZ

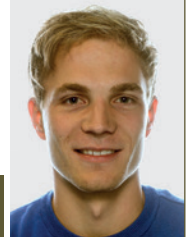
Lucy-Hillebrand-Str. 2 | 55128 Mainz
philipp.arent@students.hs-mainz.de



B. Sc. Raphael Bretscher

HOCHSCHULE MAINZ
INSTITUT FÜR RAUMBEZOGENE
INFORMATIONSD- UND MESSTECHNIK I3MAINZ

Lucy-Hillebrand-Str. 2 | 55128 Mainz
raphael.lutz.bretscher@students.hs-mainz.de



Prof. Dr.-Ing. Martin Schlüter

HOCHSCHULE MAINZ
INSTITUT FÜR RAUMBEZOGENE
INFORMATIONSD- UND MESSTECHNIK I3MAINZ

Lucy-Hillebrand-Str. 2 | 55128 Mainz
martin.schlueter@hs-mainz.de



Manuskript eingereicht: 20.02.15 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet