

Auswertung des Ringversuchs auf der neuen Kalibrierbasis der UniBw München zur Bestimmung der Sollstrecken

Analysis of the Intercomparison Programme the New Calibration Line of the UniBw Munich for Determining the Nominal Distances

Otto Heunecke

Im Zeitraum September 2009 bis September 2011 fand auf der neuen Kalibrierbasis der Universität der Bundeswehr München ein durch die Gesellschaft zur Kalibrierung geodätischer Messmittel e.V. (GKGM) organisierter Ringversuch statt. Ziel war es, die Sollstrecken bestmöglich zu ermitteln. Es haben sich 7 Institutionen mit verschiedenen Instrumenten, jeweils eigener Ausrüstung, Personal und unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Durchführung der Messungen beteiligt. Im Ergebnis der Auswertung aller Messkampagnen liegen Koordinaten für die Kalibrierbasis vor, deren Qualität noch besser ist als vor dem Ringversuch erwartet. Bezogen auf die Gesamtlänge der Basis wurde $\pm 0,2$ ppm ($\pm 2 \cdot 10^{-7}$) als erweiterte, relative Messunsicherheit erreicht. Damit erfüllt die Kalibrierbasis der UniBw M die an ein Etalon für die Prüfung von hochgenauen geodätischen Entfernungsmessern gestellte Anforderung möglichst fünfmal besser zu sein als die Prüflinge.

Schlüsselwörter: EDM-Kalibrierung, Kalibrierbasis, Messgröße Länge, Ringversuch, Rückführung

Between September 2009 and September 2011 an intercomparison programme organized by the society for calibration of geodetic devices (GKGM) took place at the new geodetic calibration line of the University of the Federal Armed Forces Munich in order to determine the nominal distances optimally. The measurements were conducted by 7 institutions with different instruments, own additional equipment, personnel and varying procedures. As a result of all campaigns the coordinates of the pillars are determined with a quality much better than expected before the intercomparison programme. With respect to the total length of the baseline ± 0.2 ppm ($\pm 2 \cdot 10^{-7}$) is given as the extended relative measurement uncertainty. Thus the calibration line of the UniBw M fulfills the requirement of an etalon for testing high quality geodetic distance instruments to be preferable five times better than the test items.

Keywords: EDM calibration, geodetic baseline, intercomparison programme, measurand length, traceability

1 TEILNEHMER IM RINGVERSUCH, ZIELE

Ausgehend vom Institut für Geodäsie, Geodätisches Labor, der Universität der Bundeswehr München und organisiert durch die Gesellschaft zur Kalibrierung geodätischer Messmittel e.V. (GKGM, siehe <http://www.gkgm.de>) fand im Zeitraum September 2009 bis zum September 2011 ein breit angelegter Ringversuch auf der neuen

Kalibrierbasis der UniBw München statt. An diesem Ringversuch haben sich beteiligt (in alphabetischer Reihenfolge):

- Karlsruher Institut für Technologie, Geodätisches Institut (KIT),
- Leibniz-Universität Hannover, Geodätisches Institut (LUH),
- Leica Geosystems AG, Heerbrugg (Leica),

- Technische Universität Graz, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS),
- Technische Universität München, Lehrstuhl für Geodäsie (TUM),
- Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation (Uni Bonn),
- Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie (UniBw M).

Die Anlage der Kalibrierbasis („nach Schwendener“) mit ihren 8 Pfeilern und einer Gesamtlänge von 1100 m ist bei /Heister 2012/ im Detail beschrieben (u.a. Gründung, Fluchtung, Zentrierung, ...), so dass an dieser Stelle hierzu keine weiteren Angaben zu machen sind. Im Hinblick auf die Überprüfung und Kalibrierung heutiger elektrooptischer Distanzmesser (EDM), die zum Teil besser als $a = 1,0 \text{ mm} + b = 1 \text{ ppm}$ im Sinne einer Standardabweichung nach ISO 17123 Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments, Part 4: Electro-optical distance meters (2012) spezifiziert sind, ist für eine hochwertige Kalibrierbasis eine Messunsicherheit u für die Teilstrecken besser als $\pm 0,2 \text{ mm}$ zu fordern. Dabei muss sichergestellt sein, dass die Kalibrierbasis auf ein Standardnormal zurückgeführt ist.

Eine Möglichkeit, die Rückführung zu gewährleisten, ist ein qualifizierter Ringversuch oder auch Ringvergleich, wie dieser an der UniBw M durchgeführt worden ist. Dazu heißt es in /GM-AR 2002/: „In Fällen, in denen Kalibrierergebnisse von Normalen oder Referenzmaterialien nicht auf nationale oder internationale Normale rückführbar sind, muss deren Richtigkeit auf andere geeignete Weise (z.B. Vergleichsmessungen, Ringversuche) nachgewiesen werden“. Von wesentlicher Bedeutung ist, die erreichte Genauigkeit abzuschätzen und dies entsprechend zu dokumentieren, um das „Normal“ – die Kalibrierbasis – quantitativ bewerten zu können.

2 VORGABEN, EINGESETZTE INSTRUMENTE UND A PRIORI GENAUIGKEITEN

Vorgabe für jeden Teilnehmer im Ringversuch war, die vollständig korrigierten und reduzierten Strecken im Niveau der Pfeilerköpfe zu bestimmen und für eine Gesamtauswertung an der UniBw M zur Verfügung zu stellen. Die Wahl geeigneter und verfügbarer Instrumente (siehe Tab. 1) und die Vorgehensweise, wie die Vorgabe bestmöglich zu erreichen ist, waren freigestellt. Jede Institution führte die Messkampagnen mit eigenem Personal und eigenem Equipment durch, insbesondere auch sämtliche Messungen zur Erfassung der meteorologischen Bedingungen für das Anbringen der 1. Geschwindigkeitskorrektur¹. Die Art und Weise der Berücksichtigung von Kalibrierparametern, z.B. die Bestimmung und Berücksichtigung der Modulationsfrequenz zur Berechnung der Frequenzkorrektur¹ oder das Mitführen einer Unbekannten für die Nullpunktkorrektur¹ bei der Ausgleichung der in allen Kombinationen gemessenen Strecken einer Kampagne, wurde von den Ringversuchsteilnehmern unterschiedlich praktiziert. Gefordert war allein die Vorlage der Ergebnisse gemäß Vorgabe inklusive zuzuordnender Genauigkeitsangaben. Für die Gesamtauswertung ergibt sich durch die gemachte Vorgabe vollständig korrigierter und reduzierter Strecken, dass an die übermittelten Ergebnisse bei der Gesamtauswertung keine weiteren Korrekturen anzubringen und auch keine zusätzlichen Unbekannten bei der Ausgleichung im Ansatz mitzuführen sind.

¹ Begriffe siehe /DIN 18709-1, 1995, Abschnitt 9/.

Institution	Instrument	Frequenzprüfung	Anmerkung
KIT	Leica AT 901 LR		zertifiziert vom Hersteller
KIT	Leica AT 401		nur testweise
LUH	Kern ME 5000		
Leica	Leica TS 30 Leica TC 1800 Leica TS 15 Leica TS 02+	ja ja ja ja	geprüfte Instrumente, akkreditiertes Labor /Reischmann 2010/
IGMS	Leica TCA 1800		
TUM	Kern ME 5000		
Uni Bonn	Kern ME 5000 Leica TS 30	ja ja	
Uni Bonn	Verschiedene GNSS Empfänger und Antennen		
UniBw M	Leica AT 901 LR		zertifiziert vom Hersteller
UniBw M	Kern ME 5000	ja	

Tab. 1 | Eingesetzte Instrumente im Ringversuch

Ebenso unterschiedlich wie die gewählten Instrumente und Messprozeduren, über die die Teilnehmer im Ringversuch anlässlich des GKGM-Workshops am 27./28. Oktober 2011 in Neubiberg berichtet haben, gestaltete sich die gestellte Aufgabe, die Genauigkeit der Ergebnisse abzuschätzen. Teilweise wurde dies konventionell anhand der bei der Ausgleichung der Messungen einer Kampagne erzielten empirischen Standardabweichungen gemacht, teilweise überschlägig und zum Teil wurde den Vorgaben des Guide for the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) /DIN V ENV 13005 1999/ entsprechend ein detailliertes Unsicherheitsbudget aufgestellt.

Korrelationen zwischen den einzelnen Messergebnissen einer Kampagne, d.h. den Teilstrecken oder den Koordinaten der Pfeiler, wie diese physikalisch bedingt durch die Eingangsgrößen (insbesondere die meteorologischen Parameter) und mathematisch begründet durch eine Ausgleichung entstehen /Heunecke 2004/, wurden nicht dokumentiert und sind in der Gesamtauswertung folglich nicht berücksichtigt. Erfahrungen bei Netzauswertungen zeigen, dass sich durch eine solche Vernachlässigung im stochastischen Modell praktisch keine Auswirkungen auf das Ergebnis ergeben /Klier 1999/, auch wenn ein strenges Vorgehen das Mitführen von physikalischen und mathematischen Korrelationen in gestuften Auswertungen („Tienstra-Prinzip“) verlangt.

Die Tab. 2 gibt wieder, wie in der Messkampagne von Leica Geosystems das Unsicherheitsbudget veranschlagt wurde. Allein in dieser Messkampagne wurden ein TS 30 (Spezifikation $0,6 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$), ein TC 1800 (Spezifikation $1,0 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$), ein TS 15 (Spezifikation $1,0 \text{ mm} + 1,5 \text{ ppm}$) und ein TS 02 (Spezifikation $1,5 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$) eingesetzt. Im von Leica Geosystems entsprechend der Spezifikationen der Tachymeter gewichteten Ergebnis sind die 7 übermittelten Teilstrecken mit Messunsicherheiten von 0,23 bis 0,26 mm angegeben /Nindl u.a. 2013, Tab. 9/.

Eingangsgröße	Kurzzeichen	Standardunsicherheit	Quelle
Distanzmessung	du	±0,13 mm	aus Ausgleichung(en)
zyklische Fehler	u _{Dz}	±0,1 mm	Schätzung
Nullpunktkorrektur	u ₀	±0,1 mm	aus Ausgleichung(en)
Frequenzfehler	u _{d,f}	±0,1 ppm	Gerätespezifikation
Messung Lufttemperatur	u _{Dt}	±0,2 °C ~ 0,2 ppm	aus Zertifikat
Messung Luftdruck	u _{Dp}	±0,3 mbar ~ 0,1 ppm	aus Zertifikat
Messung relative Luftfeuchte	u _{Drh}	±0,4 % ~ 0,002 ppm	aus Zertifikat
Dreifußexzentrizität Klemmsystem	u _{KS}	±0,04 mm	Schätzung
Dreifußexzentrizität Anzugschraube	u _{AZS}	±0,05 mm	Schätzung
Reflektorexzentrizität GPH1P	u _r	±0,1 mm	Schätzung
Exzentrizität Einschraubbolzen Pfeilerplatte	u _{EB}	±0,01 mm	Schätzung
Ablesefehler	u _{DISP}	2,9 * 10 ⁻⁶ m	Geräteeinstellung
Horizontierung (Röhrenlibelle)	u _H	±0,01 mm	abgeleitet aus Einstellgenauigkeit

Tab. 2 | Unsicherheitsbudget der Messungen durch Leica Geosystems AG (siehe /Nindl u.a. 2013, Tab. 8/)

In leicht modifizierter aber entsprechender Weise wie in Tab. 2 sind vom KIT und der UniBw M für die eingesetzten Lasertracker Leica AT 901 die Messunsicherheiten für die Teilstrecken ermittelt. Die Spezifikation des Absolutdistanzmessers (ADM) des AT 901 ist mit einer erweiterten Messunsicherheit $U = \pm 0,01 \text{ mm}$ ($k = 2$) angegeben, wobei kein streckenabhängiger Anteil berücksichtigt ist. Über den erheblichen Aufwand, Strecken größer als 80 m mit dem AT 901 messen zu können, siehe /Herrmann u.a. 2012/. Eine den Messaufbau berücksichtigende Abschätzung der Messunsicherheiten hat Beträge von 0,03 mm für die kürzeste und 0,14 mm für die längste Teilstrecke von 509 m Länge ergeben. Um den Outdoor-Bedingungen Rechnung zutragen, sind die beiden AT 901 mit $a = 0,02 \text{ mm} + b = 0,2 \text{ ppm}$ im stochastischen Modell der Gesamtausgleichung angesetzt (Tab. 3). Beides sind damit die qualitativ besten Instrumente im Ringversuch.

Bei den Messungen des IGMS wurde an Stelle der 1. Geschwindigkeitskorrektur mit der Lokalen-Maßstab-Parameter Methode (LSPM) (siehe /Brunner, Lienhart 2012/, /Brunner, Rüeger 1992/) ausgewertet, so dass der streckenabhängige Anteil im stochastischen Modell hier geringer anzusetzen ist. Die Uni Bonn gibt nur geschätzte Aussagen zur Messunsicherheit der TS 30 Messungen mit etwa 0,2 mm /Schauerte 2011/ und besser als 0,6 mm für die aus GNSS Messungen abgeleiteten Strecken /Zeimetz, Kuhlmann 2013/ an.

Das Mekometer ME 5000 ist als bestes am Markt verfügbares EDM mit 0,2 mm + 0,2 ppm angegeben. Für die a priori Schätzung einer Streckenmessung bei der Gesamtauswertung muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass es sich um vorausgewerte Ergebnisse der jeweiligen Kampagnen handelt. Mehrfachmessungen der Strecken und ein Ausgleichungsgewinn führen hier (in Abhängigkeit der Messbedingungen und der Durchführung) zu Genauigkeitssteigerungen, was sich in nach Instrumententyp getrennten Auswertungen vor der Gesamtausgleichung teilweise bestätigt hat (Tab. 3).

Alle vorliegenden Messkampagnen sind getrennt nach Instrumenten für die Ausgleichung mit dem Programm PANDA (Fa. GEOTEC GmbH in Laatzen, siehe <http://www.geotec-gmbh.de>) als jeweilige Beobachtungsgruppen² zusammengefasst, denen die in Tab. 3 aus-

gewiesenen Standardabweichungen als a priori Schätzungen zugeordnet sind. Dabei ist von einem stochastischen Modell einer Streckenmessung mit

$$\sigma^2 [\text{mm}^2] = a^2 [\text{mm}^2] + d^2 [\text{km}^2] \cdot b^2 [\text{ppm}^2] \tag{1}$$

ausgegangen. Hier bezeichnen a einen konstanten und b als ppm-Wert einen streckenabhängigen Anteil; d ist die Strecke. Die Angaben in Tab. 3 entsprechen praktisch für alle eingesetzten Instrumente den Abschätzungen der Messunsicherheiten bzw. dokumentierten Standardabweichungen der Ringversuchsteilnehmer. Geringfügige Abweichungen ergaben sich aus getrennten Vorauswertungen für die vier ME 5000, die drei Tracker und die eingesetzten Tachymeter. Da GNSS Messungen bekanntermaßen allenfalls geringe Abhängigkeiten von streckenproportionalen Effekten haben (alle Pfeiler liegen auf gleiche Höhe), ist lediglich eine konstante Standardabweichung ($b = 0$) für alle 7 Teilstrecken angesetzt.

Um dem Refraktionseinfluss auf elektrooptische Streckenmessungen auch bei hohem Aufwand bei der Bestimmung der meteorologi-

Institution	Instrument	a [mm]	b [ppm]
LUH	Kern ME 5000	0,10	0,2
TUM	Kern ME 5000	0,10	0,2
Uni Bonn	Kern ME 5000	0,20	0,2
UniBw M	Kern ME 5000	0,20	0,2
KIT	Leica AT 901 LR	0,02	0,2
KIT	Leica AT 401	0,05	0,2
UniBw M	Leica AT 901 LR	0,02	0,2
Leica	gewichtetes Mittel aus vier Tachymetern	0,20	0,2
IGMS	Leica TCA 1800	0,30	0,1
Uni Bonn	Leica TS 30	0,20	0,2
Uni Bonn	verschiedene GNSS-Empfänger und Antennen	0,60	0,0

Tab. 3 | Genauigkeitsparameter für die Gesamtauswertung, siehe Formel (1)

2 Im Zusammenhang mit Ausgleichungen ist es üblich, von Beobachtungen anstelle von Messungen zu sprechen.

Beobachtungsgruppe	Anzahl der Beobachtungen	Faktor „a“ posteriori s_0	gestrichene Beobachtungen	größte Verbesserung	
				von - nach	ν_{\max} [mm]
ME 5000 LUH	7	1,01		3 – 4	-0,28
ME 5000 TUM	7	1,13		2 – 3	-0,43
ME 5000 Uni Bonn	7	0,90		4 – 5	0,40
ME 5000 UniBw M	7	1,15		7 – 8	0,67
Leica AT 901 KIT	7	0,99		3 – 4	-0,12
Leica AT 401 KIT	3	2,07		2 – 3	0,17
Leica AT 901 UniBw M	6	1,07	1	3 – 4	0,12
Ergebnis Leica	7	0,89		7 – 8	-0,33
Leica TCA 1800 IGMS	7	0,68		5 – 6	0,60
Leica TS 30 Uni Bonn	7	0,94		4 – 5	0,50
Ergebnis GNSS Uni Bonn	7	0,36		7 – 8	-0,33

Tab. 4 | Ergebnisse Ausreißersuche und Varianzkomponentenschätzung

schen Bedingungen Rechnung zu tragen /Hennes 2002/, /Schwarz 2012/, ist bei der Gesamtauswertung durchgehend von $b = 0,2$ ppm ausgegangen. Bei dem durch das IGMS gewählten Vorgehen ist der Einfluss der 1. Geschwindigkeitsreduktion weitestgehend eliminiert, der TCA 1800 aber spezifikationsbedingt etwas schlechter als der TS 30 beim streckenunabhängigen Anteil einzuschätzen ist. Die Tab. 3 gibt das verwendete stochastische Modell der Gesamtauswertung wieder.

3 AUSWERTUNG, ERGEBNISSE

Die von den Teilnehmern im Ringversuch übermittelten Strecken sind mittels einer zwangsfreien Ausgleichung mit PANDA ausgewertet. Dazu mussten aus formalen Gründen neben den Strecken in x -Richtung als Pseudobeobachtungen auch $y = 0$ mit unbedeutend kleiner Varianz in die 2D-Ausgleichung eingeführt werden. Zu beachten ist, dass damit die Anzahl der Beobachtungen verdoppelt ist. Im Ergebnis müssen die sich auf die Pfeilerkoordinaten beziehenden Genauigkeitsaussagen der PANDA-Protokolle, in die die Standardabweichung der Gewichtseinheit eingeht, mit dem Faktor $\sqrt{2}$ multipliziert werden. Alle nachstehenden Angaben beziehen sich auf eine 1D-Ausgleichung in x -Richtung unter Berücksichtigung des besagten Faktors.

Von den $n = 73$ vorliegenden Strecken musste eine Messung mit dem Leica AT 901 als grob falsch verworfen werden, was auch vor der Ausgleichung schon auffällig war. Zwei weitere Strecken mussten geringfügig abgewichtet werden, um keinen Ausreißer im Data Snooping /Niemeier 2008/ mehr vorliegen zu haben. In einer freien Ausgleichung im Modell der Gesamtpurminimierung mit $u = 8$ Pfeilerkoordinaten und mit einem Datumsdefekt $d = 1$ (freier Translationsparameter in Koordinatenrichtung) verbleibt eine Redundanz von

$$r = n - u + d = 65 \quad (2)$$

bei einer sehr hohen mittleren Redundanz von

$$\bar{r} = 1 - \frac{u}{n - u + d} = 0,892 \quad (3)$$

Das Ausgleichungsergebnis kann folglich als sehr gut in sich kontrolliert betrachtet werden. Die Tab. 4 protokolliert die Ausreißersuche und die Varianzkomponentenschätzung. Dabei bietet die Varianzkomponentenschätzung eine Möglichkeit, das a priori Modell der Tab. 3 empirisch zu prüfen und erforderlichenfalls anzupassen.

Ist der a posteriori Faktor s_0 kleiner als 1, heißt dies, dass die Genauigkeit der Beobachtungsgruppe besser als die angesetzte Standardabweichung entsprechend der Tab. 3 ist. Zu sehen ist, dass insbesondere die GNSS Messungen noch besser hätten in Ansatz gebracht werden können, was /Zeimetz, Kuhlmann, 2013/ aus ihren Untersuchungen heraus auch bereits ableiten. Änderungen an der Bestimmung der Koordinaten bewirken kleine Anpassungen im stochastischen Modell jedoch de facto nicht (lediglich in der Größenordnung weniger μm); die Werte der Tab. 3 wurden beibehalten.

Die größten Verbesserungen je Beobachtungsgruppe sind ebenfalls in Tab. 4 protokolliert. Als größte aller Abweichungen der Gesamtauswertung tritt ein Wert von $\nu_{\max} = 0,67$ mm beim ME 5000 der UniBw M auf (normiert 3,08). Systematiken bei einer gruppenweisen Betrachtung der Verbesserungen sind nicht auffällig, wenn man davon absieht, dass für den nur testweise zum Einsatz gekommenen AT 401 alle drei Verbesserungen positiv sind. Insbesondere die Verbesserungen der beiden AT 901, den qualitativ besten Instrumenten im Ringversuch, streuen unregelmäßig.

Es ergeben sich die Pfeilerkoordinaten und ihre Standardabweichungen aus Tab. 5, wobei die letzte Kommastelle nur angegeben ist, um Rechenunschärfen zu vermeiden.

Im stochastischen Modell gemäß Tab. 3 gehen überwiegend Größen ein, die als Mess- bzw. Standardunsicherheiten ermittelt worden sind. Folglich darf man auch die aus der Ausgleichung ermittelten Standardabweichungen s als Messunsicherheiten u ansehen. Der GUM lässt dies zu, in dem ausgesagt ist, dass der dem Messergebnis als Messunsicherheit zugeordnete Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, beispielsweise eine Standardabweichung sein kann. Im vorliegenden Fall sind, siehe oben, die Standardabweichungen der Tab. 5 aus Beobachtungen bzw. Messungen abgeleitet, die unter erweiterten Vergleichsbedingungen (zu dem Begriff siehe Abschnitt 4) gewonnen wurden. Der GUM besagt, dass mit dem

Pfeiler	ausgeglichene Koordinaten [m]	Stabw. aus der Ausgleichung (Messunsicherheit) [mm]
1	0,000000	0,041
2	18,780481	0,037
3	101,237355	0,033
4	247,384277	0,028
5	425,363077	0,028
6	539,661781	0,031
7	590,287366	0,035
8	1099,985736	0,081

Tab. 5 | Pfeilerkoordinaten und Standardabweichungen aus der Ausgleichung

Faktor $k = 2$ auf die erweiterte Messunsicherheit U zu schließen ist. Dieser Faktor entspricht exakt dem Quantil $t_{r,1-\frac{\alpha}{2}} = t_{65,0,975} = 2,00$ der Student-Verteilung bei 65 Freiheitsgraden und einem Vertrauensniveau von $1 - \alpha = 95 \%$, wenn man die Normalverteilung für die eingehenden Beobachtungen unterstellt. Die Werte der dritten Spalte in Tab. 5 multipliziert mit $k = 2$ ergeben somit die halbe Weite der 95 % Konfidenzintervalle für die Pfeilerkoordinaten oder, als \pm anzugeben, die erweiterte Messunsicherheit U .

Aus den Pfeilerkoordinaten der Tab. 5 ergeben sich die Teilstrecken in allen Kombinationen. Mit Hilfe einer entsprechenden Option in PANDA lassen sich die „relativen Genauigkeiten“ zwischen zwei Punkten (in mm) ermitteln. Anders als nur mit den in Tab. 5 angegebenen Größen ist dies der korrekte Weg, bei dem auch die Nebendiagonalelemente der Kofaktormatrix der Pfeilerkoordinaten berücksichtigt sind. Der Korrelationskoeffizient zwischen den Pfeilern 1 und 8 wird aus PANDA mit $\rho_{1-8} = -0.55$ ermittelt; wirkt bei einer Differenzbildung dieser beiden Koordinaten also genauigkeitsmindernd /Heunecke 2004/. Die Tab. 6 stellt diese auf die Teilstrecken bezogenen erweiterten Messunsicherheiten zusammen. Eine Abhängigkeit von der Streckenlänge ist – wie zu erwarten – zu erkennen. Für

die längste Teilstrecke 1 – 8 ergibt sich $\pm 0,216$ mm, was bezogen auf die Strecke selbst die relative Genauigkeit von $\pm 1,97 \cdot 10^{-7} \approx \pm 2 \cdot 10^{-7}$ bedeutet. Würde man die besagte Korrelation außer Acht lassen, ergäbe sich $\pm 1,65 \cdot 10^{-7}$.

4 ERWEITERTE VERGLEICHSBEDINGUNGEN UND TRANSPARENZ

Die eingesetzten Messinstrumente nutzen unterschiedliche Messprinzipien und Wellenlängen. Jeder Teilnehmer im Ringversuch verwendete seine meteorologische Ausrüstung und seine eigene Methodik zur Erfassung von repräsentativer Temperatur, Luftdruck und Partialdruck des Wasserdampfes. Die Vorverarbeitung bis zur Zusammenstellung der korrigierten und reduzierten Strecken erfolgte mit unterschiedlicher Auswertesoftware der Teilnehmer. Zudem fanden die Messungen verteilt über einen Zeitraum von zwei Jahren bei recht unterschiedlichen Wetterbedingungen statt.

Angesichts dieser Sachlage kann von Vergleichsbedingungen und zudem einer Stichprobe ansehnlichen Umfangs gesprochen werden. Da die übermittelten Ergebnisse an der UniBw M gesammelt wurden, ohne die Teilnehmer im Ringversuch zuvor Kenntnis von den Ergebnissen der anderen zu geben, liegen unabhängige Einzelergebnisse vor. Beides gemeinsam ergibt sogenannte „erweiterte Vergleichsbedingungen“ gemäß /DIN 1319-1, 1995/. Dies sind solche Bedingungen, „unter denen eine Gesamtheit unabhängiger Messergebnisse für dieselben speziellen Messgrößen so gewonnen wird, dass durch einen Vergleich systematische Messabweichungen erkennbar werden“.

Sofern im Datenkollektiv des Ringversuchs an der UniBw München noch systematische Effekte enthalten sein sollten, liegen diese in einer Größenordnung, dass sie von zufälligen Messabweichungen nicht zu unterscheiden sind. Erst für den Workshop im Oktober 2011 wurden alle Ergebnisse den jeweils anderen übermittelt, um die erforderliche Transparenz für alle Teilnehmer im Ringversuch zu schaffen. Bis dahin hatte allein das Institut für Geodäsie der UniBw M einen Überblick über die Teilergebnisse.

1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8
$\pm 0,038$	$\pm 0,060$	$\pm 0,088$	$\pm 0,115$	$\pm 0,128$	$\pm 0,136$	$\pm 0,216$
	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8
	$\pm 0,048$	$\pm 0,080$	$\pm 0,104$	$\pm 0,121$	$\pm 0,130$	$\pm 0,214$
		3-4	3-5	3-6	3-7	3-8
		$\pm 0,064$	$\pm 0,098$	$\pm 0,114$	$\pm 0,122$	$\pm 0,208$
			4-5	4-6	4-7	4-8
			$\pm 0,074$	$\pm 0,094$	$\pm 0,102$	$\pm 0,198$
				5-6	5-7	5-8
				$\pm 0,058$	$\pm 0,072$	$\pm 0,184$
					6-7	6-8
					$\pm 0,044$	$\pm 0,174$
						7-8
						$\pm 0,169$

Tab. 6 | Erweiterte Messunsicherheit U für die Teilstrecken ($k = 2$)

5 ZUSAMMENFASSUNG, DANK, AUSBLICK

Die neue Kalibrierbasis der UniBw München ist mit einer hervorragenden Genauigkeit bestimmt worden. Die in der *Tab. 6* dokumentierten Genauigkeiten geben als \pm Werte die erzielte erweiterte Messunsicherheit $U = k \cdot u$ mit $k = 2$ für die Teilstrecken wieder.

Für die Teilnahme im Ringversuch ist allen beteiligten Institutionen und der GKGM herzlich zu danken! Ohne ihr großes Engagement wäre ein solches Vorhaben nicht möglich gewesen. Die hochwertigen Resultate der einzelnen Messkampagnen zeugen von der Fähigkeit der teilnehmenden Institutionen: „Ein herausragender Kompetenznachweis ist die erfolgreiche Beteiligung an Ringversuchen, weil hierbei alle Aspekte der Prüfung/Kalibrierung (Vorbereitung, Methode, Mittel, Personal, Umgebungsbedingungen, Auswertung, Bescheinigung) eingeschlossen sind“ /GM-AR 2002, Abschnitt 4.8/.

Nur bei akribischer Beachtung aller Details bei der Erfassung der originären Messwerte, der zu beachtenden Eingangsgrößen /Schwarz 2012/ und einer Aufbereitung unter Berücksichtigung aller relevanten Korrekturen und Reduktionen sind solche Genauigkeiten zu erzielen. Weil zertifizierte Instrumente und im Hinblick auf die Maßstabsdefinition auch zum Teil zeitnah frequenzgeprüfte Instrumente eingesetzt wurden – parallel dazu auch GNSS-Messungen –, kann die Pfeilerstrecke im Ergebnis des qualifizierten Ringversuches als rückgeführt betrachtet werden.

Da sich der Ringversuch über zwei Jahre erstreckt hat, ist das Ergebnis der Gesamtauswertung auch als ein Beleg für die Pfeilerstabilität zu betrachten. Der Pfeilerstabilität kommt angesichts der hohen Anforderungen an Kalibrierbasen eine erhebliche Bedeutung zu. Die Prüfstrecke an der UniBw München ist insbesondere auch für hochgenaue elektrooptische Distanzmesser, wie diese beispielsweise im TS 30 oder dem TCA 1800 verbaut sind, geeignet.

Die Abstimmung und der Abgleich der Ergebnisse auf der Prüfstrecke in Neubiberg mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) und den in Braunschweig verfügbaren Komparatoren für das Standardnormal „Meter“ erfolgt gegenwärtig.

LITERATUR

Brunner, F. K.; Lienhart, W. (2012): Anwendung der Lokalen-Maßstab-Parameter Methode (LSPM) bei der Vermessung einer Kalibrierbasis. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 119(2012)11/12, 363-368.

Brunner, F. K.; Rüeger, J. M. (1992): Theory of the local scale parameter method for EDM. Bulletin Geodesique, Springer publishing house, 355-364.

DIN 1319-1: Grundlagen der Messtechnik, Teil 1: Grundbegriffe. Ausgabe Januar 1995, Berlin, Beuth.

DIN 18709-1: Begriffe, Kurzzeichen und Formelzeichen im Vermessungswesen, Teil 1: Allgemeines. Ausgabe Oktober 1995, Berlin, Beuth.

DIN V ENV 13005: Leitfaden zur Bestimmung der Unsicherheit beim Messen. Ausgabe Juni 1999. Berlin, Beuth.

GM-AR: Verwaltungsvorschrift Gesetzliches Messwesen – Allgemeine Regelungen. Bundesanzeiger Nr. 108a vom 15.06.2002.

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

Hennes, M. (2002): Zum Refraktionseinfluss auf terrestrische geodätische Messungen im Kontext der Messtechnik und der Instrumentenentwicklung. In: Flächenmanagement und Bodenordnung (fub), 64(2002)2, 73-86.

Heunecke, O. (2004): Nochmals über Korrelationen in der Messtechnik. In: Festschrift Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Hans Pelzer zum 68. Geburtstag, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 250, 91-108, Hannover.

ISO 17123: Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments, Part 4: Electro-optical distance meters (EDM measurements to reflectors). Ausgabe Juni 2012. Berlin, Beuth.

Klier, T. (1999): Untersuchungen über das Elementarfehlerverhalten von tachymetrischen Beobachtungen in Netzen der Ingenieurvermessung. Diplomarbeit Geodätisches Institut, Universität Hannover (unveröffentlicht).

Zeimetz, P.; Kuhlmann, H. (2013): Einsatz kalibrierter GNSS-Antennen zur genauen Längenmessung. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 120(2012)1.

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.

Niemeier, W. (2008): Ausgleichsrechnung – Statistische Auswertemethoden. De Gruyter Lehrbuch, Berlin/New York, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, ISBN 978-3-11-019055-7.

Nindl, D.; Hardegen, W.; Wippel, E. (2013): Bericht zur Teilnahme am Ringvergleich auf der Kalibrierbasis der UniBw München – Messkampagne Leica Geosystems. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 120(2012)1.

Reischmann, S. (2010): Akkreditierung schafft Vertrauen. In: Reporter Nr. 63, Magazin der Leica Geosystems, 6-7.

Schauerte, W. (2011): Ergebnisse zu den ME5000- und Leica TS30-Messungen. Vortrag GKGM-Workshop Kalibrierung geodätischer Messmittel, Schwerpunkt: Hochgenaue Messung langer Strecken, Neubiberg, 27./28. Oktober 2011.

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

Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke

INSTITUT FÜR GEODÄSIE
UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN

Werner-Heisenberg-Weg 39 | 85577 Neubiberg
otto.heunecke@unibw.de

