

Die neue Neubiberger Pfeilerstrecke

Otto Heunecke

Zusammenfassung

Die neue EDM-Kalibrierbasis der Universität der Bundeswehr München in Neubiberg wurde durch einen von der Gesellschaft zur Kalibrierung Geodätischer Messmittel organisierten Ringversuch sowie durch Messungen des Finnish Geodetic Institute mit geringer Unsicherheit auf die Definition des Meters rückgeführt. Der Vergleich der Datensätze von 2011 und 2014 zeigt einen Maßstabsunterschied von ca. $-0,2$ ppm und die mittlere Abweichung der Pfeilerabstände des Vergleichs in allen Kombinationen ist kleiner als $0,1$ mm. Ein solches Ergebnis ist nur bei hochqualitativer Durchführung der Messungen unter strenger Beachtung aller Erfordernisse sowie einer ausgezeichneten Lagestabilität der Pfeiler zu erreichen. Das erreichte Genauigkeitsniveau macht die Kalibrierbasis zu einem Primärnormal bei der Rückführung von EDM-Strecken.

Summary

The new EDM calibration baseline at the University of the Federal Armed Forces Munich in Neubiberg is traced back to the definition of the meter by an intercomparison programme organized by the Society for Calibration of Geodetic Devices and a campaign accomplished by the Finnish Geodetic Institute with low uncertainty. The data sets from 2011 and 2014 compared, a difference in scale of approx. $-0,2$ ppm is to note and the average deviation of the compared pillar distances in all combinations is smaller than $0,1$ mm. Such a result can only be obtained with high-quality performance of the measurements in strict compliance with all requirements and an excellent stability of the pillars. The achieved accuracy level makes the calibration baseline a primary normal for the traceability of EDM distances.

Schlüsselwörter: EDM-Kalibrierung, Messgröße Länge, Mess- und Eichgesetz, Ringversuch, Rückführung

1 Einleitung

Heutige elektrooptische Distanzmesser (EDM) sind zum Teil besser als $1,0$ mm + 1 ppm im Sinne einer Standardabweichung gemäß ISO 17123 Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments, Part 4: Electro-optical distance meters (2012) spezifiziert. Im Hinblick auf ihre Prüfung und Kalibrierung werden daher, wenn man von der Regel ausgeht, dass ein Etalon mindestens fünffach besser sein sollte als der Prüfling, hochwertige Kalibrierbasen mit Messunsicherheiten für die Teilstrecken $u_d \leq \pm 0,2$ mm bzw. $U_d \leq \pm 0,1$ mm und einer Maßstabgenauigkeit besser als $u_m \leq \pm 0,2$ ppm bzw. möglichst $U_m \approx \pm 0,1$ ppm gefordert, wobei $U = 2 \cdot u$ die erweiterte Messunsicherheit ist.

Der Pfeilerstabilität sowie der Adaptierung von Instrument und Reflektor kommen angesichts dieser Anforderungen erhebliche Bedeutungen zu. Gemäß DIN 18709-1 (1995, Nr. 9.3.1.1) sind die Begriffe Strecke und Distanz dahingehend zu differenzieren, dass unter Distanzen die unmittelbaren Messwerte einschließlich der erforderlichen Korrekturen, d. h. physikalisch bedingten Aufbereitungen, zu verstehen sind und nach Addition von Reduktionen, also den geometrisch bedingten Aufbereitungen, diese in Strecken überführt werden. Im Folgenden wird daher im Ergebnis immer von Streckenmessungen gesprochen. Die Benennungen und die verwendeten Formelzeichen der Korrekturen- und Reduktionsterme erfolgen ebenfalls entsprechend DIN 18709-1.

Aktuell hat das »Joint Research Project SIB60 Metrology for long distance surveying, WP4: Improving surveying practice« das Projektziel: »Tracing the kilometre to the SI¹ metre«. Dabei handelt es sich um ein von der European Association of National Metrology Institutes (EURAMET, www.euramet.org; ein Zusammenschluss europäischer Prüfinstitutionen) getragenes und im Rahmen des European Metrology Research Programme (EMRP, www.emrponline.eu) initiiertes Forschungsvorhaben. Inhalt ist es, Strecken mit Längen von etwa einem Kilometer unter realen Umgebungsbedingungen (»in air«) bei einer Zielvorstellung von $U_m < \pm 0,2$ ppm auf die Definition des Meters zurückzuführen. Das Projekt wird von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig (PTB), Dr. Florian Pollinger (florian.pollinger@ptb.de), koordiniert.

In der geodätischen Praxis werden solche Genauigkeiten von Streckenmessungen insbesondere bei Überwachungsaufgaben relevant, wenn es darauf ankommt, bereits kleine geometrische Veränderungen zu erkennen, die nicht durch die Realisierung des Meters mit den benutzten Instrumenten verfälscht werden dürfen, insbesondere bei Messepochen mit größeren Zeitabständen. Ebenso verlangen Absteckungsaufgaben im Maschinen- und Anlagenbau häufig nach derartigen Qualitäten der Streckenmessung (Schwarz 2012). Auftrieb erfährt die geforderte Prüfung und Kalibrierung von Messgeräten zudem durch das seit dem 1.1.2015 in Kraft getretene neue Mess- und Eichgesetz (MessEG 2013).

2 Kalibrierbasis der UniBw München

Die in den Jahren 2007 bis 2008 errichtete neue Kalibrierbasis der UniBw München, die sowohl wissenschaftlichen als auch praktischen Erfordernissen und Bedürfnissen

1 SI: Système international d'unités mit der Basiseinheit Meter

genügen soll und durch das Geodätische Labor, Institut für Geodäsie, betrieben wird, besteht aus acht sowohl in der Vertikalen als auch in der Horizontalen alignierten Pfeilern bei einer Gesamtlänge von 1.100 m. Sieben Pfeiler sind auf einer Länge von 590 m nach Schwendener (1971) so verteilt errichtet worden, dass für alle gängigen EDM-Feinmaßstäbe eine akzeptable Verteilung gegeben ist. Die doppelwandigen, wärmeisolierten Pfeiler sind über einen armierten Betonsockel auf ca. 6 m tiefen Bohrpfehlen – bezogen auf die Höhe des gewachsenen Bodens – in der als geologisch stabil geltenden Münchner Schotterebene gegründet. Darüber liegt ein ca. 2 m hoher angeschütteter Erddamm. Die Zentrierplatte besteht aus V4A-Stahl mit einem Durchmesser von 42 cm, siehe die Abb. 1. Weitere Vorzüge der Basis sind die durchgängige Erreichbarkeit durch eine parallele Asphaltstraße, die Unzugänglichkeit für die Öffentlichkeit durch ihre Lage innerhalb des umzäunten Campus sowie die gegenwärtig im Ausbau befindliche Möglichkeit des 230 V Stromanschlusses an allen Pfeilern. Für spezielle Messaufbauten steht ein begehrter stationärer Messcontainer mit Internetzugang zur Verfügung. Zu weiteren Details siehe Heister (2012).

Da neben den Sollstrecken für die Prüfung von EDM auch die astronomischen Azimute bestimmt wurden, ist die Pfeilerstrecke der UniBw auch auf die Prüfung von Vermessungskreiseln ausgelegt. Zudem eignet sie sich für satellitengestützte Messungen, da sowohl eine völlige Horizontfreiheit als auch ein praktisch multipath-freies Umfeld gegeben sind.

Die Einflussgrößen bei der elektrooptischen Streckenmessung sind zu gruppieren in

- A) Auswirkungen im und auf das Instrument einschließlich Reflektor,
- B) Auswirkungen auf den Signalverlauf in der Atmosphäre und
- C) Auswirkungen bei der geometrischen Aufbereitung, d. h. dem zu wählenden Raumbezug.

Eine strikte und eindeutige Zuordnung sowie Trennung der Einflussgrößen nach diesem Schema ist jedoch nicht gegeben, wie u. a. Schwarz (2012) näher ausführt. Der genauigkeitslimitierende, der Kategorie B) zuzuordnende Faktor der elektrooptischen Streckenmessung ist die Erfassung der repräsentativen meteorologischen Parameter Temperatur, Luftdruck und des Partialdrucks des Wasserdampfes² im Moment der Messung. Bekanntlich gilt, dass eine Temperaturabweichung von $-0,1\text{ °C}$, eine Luftdruckabweichung von $+0,35\text{ hPa}$ oder eine Änderung des Wasserdampf-Partialdrucks von $+1,67\text{ hPa}$ gegenüber den verwendeten Werten bei der 1. Geschwindigkeitskorrektur k_n jeweils zu einem Effekt von $+0,1\text{ ppm}$ führen.

Die Pfeilerstrecke in Neubiberg ist auf einem Damm gelegen, entlang dem sich erfahrungsgemäß eine gute



Abb. 1: Neue Kalibrierbasis in Neubiberg

Durchmischung einstellt, sodass ausgehend von den Messstellen für die Meteorologieerfassung der Atmosphärenzustand zutreffend durch eine lineare Interpolation modelliert werden kann. Für die Temperatur als der kritischen Größe verfügt das Geodätische Labor über eine automatisierte Erfassungsanlage mit zehn Sensoren, wobei aber zu beachten ist, dass selbst die örtliche, aktuelle Temperatur kaum besser als $0,1\text{ °C}$ zu bestimmen ist. Gemäß Empfehlung der International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) und der International Association of Geodesy (IAG) aus dem Jahr 1999 ist für die meteorologische Korrektur von Distanzen die Gruppenbrechzahl N_{Gr} nach Ciddor zu verwenden (u. a. Schwarz 2012):

$$N_{Gr} = 287,6155 + \frac{4,88660}{\lambda_T^2} + \frac{0,06800}{\lambda_T^4} \quad (1)$$

mit λ_T als Trägerwellenlänge des EDM.

Im direkten Vergleich zu der zuvor empfohlenen Dispersionsformel nach Edlen kommt es in Abhängigkeit von λ_T zu einer Verkürzung von ca. $0,1 - 0,15\text{ ppm}$. Die für die Rückführung auf die SI-Definition des Meters zu beachtende Genauigkeit von (1) wird mit ca. $0,5\text{ ppm}$ abgeschätzt (Rüeger 1998), was u. a. durch den lediglich pauschal angesetzten CO_2 -Anteil mit 375 ppm sowie sonstigen, nicht berücksichtigten Änderungen der Luftzusammensetzungen begründet ist. In dem Moment, wo alle elektrooptisch gemessenen Distanzen mit (1) aufbereitet werden und keine anderweitigen Messwerte für

2 Der Partialdruck des Wasserdampfes ist eine Funktion des Sättigungsdampfdrucks E und der relativen Feuchte, wobei sich E üblicherweise aus einer der auf Magnus zurückgehenden Näherungslösungen für die Clausius-Clapeyron-Gleichung ergibt. Es zeigt sich z. B. durch Vergleich mit der Lösung nach Goff & Gratch, dass die verschiedenen, in der Literatur zu findenden Näherungen auch im Hinblick auf eine Anforderung von $0,1\text{ ppm}$ bzgl. k_n in der Regel ausreichend rechenstark sind.

Strecken zur Verfügung stehen, kommt dies jedoch nicht bzw. nur bedingt zum Tragen. Die 2. Geschwindigkeitskorrektur k_{2n} erreicht bei Distanzen bis zu 1 km auch bei extrem angesetzten Refraktionskoeffizienten keine Beträge, die es zwingend zu berücksichtigen gilt.

Bei steigenden Messgenauigkeiten ist der Zentrierung des Instruments und des Reflektors in zunehmendem Maße Beachtung zu schenken. StandarddreifüÙe mit dem 3-Klauen-Prinzip werden üblicherweise mit einer Zentrierunsicherheit von 0,3 mm spezifiziert. Sie sind für Sollstreckenbestimmungen hoher Qualität daher nicht geeignet. Bei einer Aufbauhöhe von ca. 0,25 bis 0,35 m über Pfeilerplatte ist zudem die Horizontierung durch sorgfältiges Einspielen einer Röhrenlibelle gefordert. Ausgehend von einer Libellenangabe von 40" kann man von $\pm 0,002$ mm im Unsicherheitsbudget ausgehen. Bei der Basis in Neubiberg ist es möglich, sphärisch gelagerte Reflektoren unmittelbar in konische Bohrungen zu positionieren, sodass kein Genauigkeitsverlust durch die Zentrierung und Horizontierung entsteht (siehe Abb. 1 unten rechts).

Die Höhen der Pfeilerplatten sind mittels geometrischen Nivellements bestimmt worden. Entsprechend der Abschätzung der Erdkrümmung mit $s^2 \cdot (2R)^{-1}$, wobei s der Aufpunktabstand und R der Erdradius sind, weichen die NHN-Höhen der Pfeiler 1 und 8 um etwa 2 cm von dem zentralen Pfeiler 7 ab. Die Reduktion vom Bogen auf die Sehne bleibt auch bei den langen Strecken unterhalb 3 μ m. Als Bezugsgerade für die Sollstrecken gilt bei der Basis in Neubiberg das mittlere Niveau der Pfeilerplatten (siehe Abb. 2). Dies bedeutet, dass die Höhen- und Neigungsreduktion $r_{N,H}$ klein bleibt und z. B. bei Messungen mit dem Mekometer 5000 unter Verwendung der Kern Zwangszentrierung ($i = t = 0,335$ m, i : Instrumentenhöhe, t : Reflektorhöhe) maximal 0,06 mm beträgt.

Bei einer Prüfung eines EDM auf der Pfeilerstrecke in Neubiberg werden aus den meteorologisch korrigierten und auf das mittlere Pfeilerplattenniveau reduzierten Sollstrecken die als entfernungsunabhängig angesehene Nullpunktkorrektur k_0 und die Maßstabskorrektur k_m

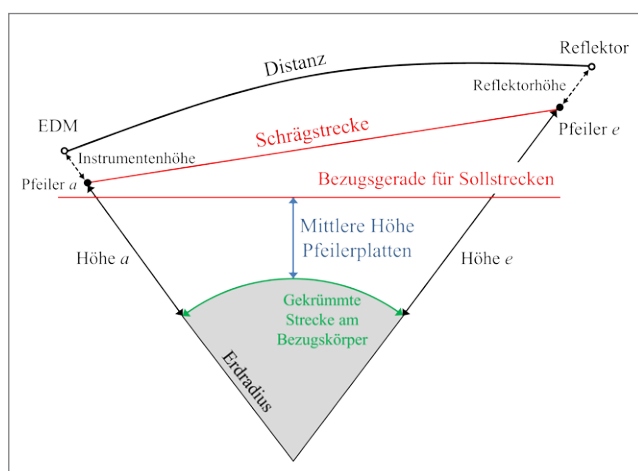


Abb. 2: Aufbereitung von Streckenmessungen (vgl. Schwarz 2012)

als Kalibrierergebnisse ermittelt. Nachteilig dabei ist, dass Unzulänglichkeiten bei der 1. Geschwindigkeitskorrektur k_n sich nicht von k_m trennen lassen. Zwar existiert auch der Ansatz, den Maßstab eines EDM als Frequenzkorrektur k_f aus einer Fotodiodenschaltung zur Bestimmung der ausgesendeten Modulationswellenlänge unabhängig von k_n zu ermitteln, jedoch müssen dabei die instrumenteninternen, herstellerseitigen Kompensationen z. B. bezüglich der Temperatur bei Erwärmung bekannt sein, um einen zutreffenden Wert für k_f zu erhalten. Zumeist sind diese Kompensationen nicht offen dokumentiert. Eine Untersuchung auf eine zyklische Korrektur k_z von EDM, die nach dem Phasenvergleichsverfahren die Feinmessung durchführen, muss separat auf einem Longitudinalkomparator erfolgen. Heutige Präzisionsinstrumente zeigen dabei im Allgemeinen Amplituden bis ca. 0,1 mm. Auch dafür hält das Geodätische Labor der Universität der Bundeswehr München die Möglichkeiten bereit.

3 GKGM Ringversuch zur Sollstreckenbestimmung

Die Gesellschaft zur Kalibrierung Geodätischer Messmittel e. V. (GKGM, www.gkgm.de) arbeitet technisch wissenschaftlich auf dem Gebiet der Kalibrierung geodätischer Instrumente. Zu diesen Aufgaben gehört die Organisation und Durchführung von Ringversuchen, wie der, der im Zeitraum September 2009 bis September 2011 auf der neuen Pfeilerstrecke in Neubiberg erfolgte. Bezüglich der Rückführung 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«. Und weiter bezüglich 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.«

Ziel war es, die Sollstrecken bestmöglich zu ermitteln. Einzige Vorgabe für jeden Teilnehmer im Ringversuch war, die vollständig korrigierten und reduzierten Strecken im Niveau der Pfeilerplatten einschließlich Angaben der erzielten bzw. abgeschätzten Messunsicherheiten zu bestimmen und für eine Zusammenführung aller Ergebnisse an der UniBw zur Verfügung zu stellen. Die Wahl der Instrumente und die Vorgehensweise, wie die gemachte Vorgabe optimal zu erreichen ist, waren freigestellt. Beteiligt haben sich sieben Institutionen mit verschiedenen Instrumenten, jeweils eigener Ausrüstung, Personal und unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Durchführung der Messungen. In insgesamt elf Kampagnen kamen 13 unterschiedliche Messinstrumente zum Einsatz, u. a. vier Kern Mekometer 5000 (Trägerwel-

lenlänge $\lambda_T = 632,8$ nm Bezugsgruppenbrechungsindex $n_0 = 1,000284515$) und zwei Lasertracker Leica AT 901 ($\lambda_{T,ADM} = 795$ nm, $n_0 = 1,0002711152$). Die Tracker messen Strecken nicht mehr nur rein interferometrisch (IFM), sondern über eine Polarisationsmodulation ähnlich dem Mekometer 5000 (Loser et al. 1991) auch absolut (ADM).

Für einen Teil der verwendeten Instrumente lagen eine Frequenzprüfung und/oder eine Herstellerzertifizierung vor. Ferner fand eine satellitengestützte Bestimmung der Basislinien statt. Durch die praktisch uneingeschränkte Horizontfreiheit ist die Basis in Neubiberg dafür bestens geeignet. Korrelationen zwischen den einzelnen Messergebnissen einer Kampagne, d.h. den Teilstrecken bzw. den Koordinaten der Pfeiler, wie diese physikalisch bedingt durch die Eingangsgrößen (insbesondere die meteorologischen Parameter) und mathematisch begründet durch eine Ausgleichung entstehen, wurden bei der Übergabe nicht dokumentiert und sind in der Auswertung des Ringversuchs folglich nicht berücksichtigt. Erfahrungen zeigen, dass sich durch eine solche Vernachlässigung im stochastischen Modell nur geringe Auswirkungen auf das Ergebnis ergeben, auch wenn ein strenges Vorgehen das Mitführen von Korrelationen in gestuften Auswertungen verlangt.

Für die Auswertung wird von einem stochastischen Modell

$$\sigma^2 [\text{mm}^2] = a^2 [\text{mm}^2] + d^2 [\text{km}^2] * b^2 [\text{ppm}^2] \quad (2)$$

ausgegangen, wobei a einen konstanten Anteil, b als ppm-Wert einen streckenabhängigen Anteil und d die Strecke darstellen. Um dem Refraktionseinfluss auf elektroofptische Streckenmessungen auch bei hohem Aufwand bei der Bestimmung der meteorologischen Bedingungen Rechnung zu tragen, ist (bis auf eine Ausnahme) für alle EDM und Tracker von $b = 0,2$ ppm ausgegangen. Für die beiden Leica AT 901 ist der konstante Anteil mit $a = 0,02$ mm angesetzt, für die vier Mekometer 5000 mit $a = 0,10 - 0,20$ mm je nach Maßgabe durch den Ringversuchsteilnehmer. Damit sind die Tracker die dominierenden Instrumente und, insbesondere bei Instrumenten neuester Bauart mit gesteigerten Reichweiten sowie Zentriermöglichkeit mittels Dreifuß, neben ihren sonstigen Anwendungen für die Sollstreckenbestimmung prädestiniert (vgl. Eschelbach et al. 2015).

Alle 73 im Ringversuch vorliegenden Strecken wurden einer zwangsfreien 1D-Ausgleichung mit PANDA (Fa. GEOTEC GmbH; Laatzen, www.geotec-gmbh.de) zugeführt. Bei der Auswertung wurde eine Strecke als grob falsch detektiert und gestrichen. Die Tab. 1 gibt einige Kenngrößen der Ausgleichung wieder; hierbei bezeichnen n die Anzahl der Beobachtungen, u' die Anzahl der Unbekannten, d' die Anzahl der Datumsdefekte, f die Anzahl der Freiheitsgrade und \bar{r} die mittlere Redundanz. Weitere Details wie etwa zur Varianzkomponentenschätzung siehe Heunecke (2012).

Es ergeben sich die Pfeilerkoordinaten und ihre Standardabweichungen gemäß Tab. 2, wobei die letzte als

Tab. 1: Kenngrößen der Ausgleichung Ringversuch

$n = 72$	$u' = 8$	$d' = 1$	$f = 65$	$\bar{r} = 0,892$
----------	----------	----------	----------	-------------------

Tab. 2: Pfeilerkoordinaten und Standardabweichungen Ringversuch (siehe Heunecke 2012, Tab. 5)

Pfeiler	Ausgegliche Koordinaten Ringversuch [m]	Stabw. aus Ausgleichung [mm]
1	0,00000 ₀	0,04 ₁
2	18,78048 ₁	0,03 ₇
3	101,23735 ₅	0,03 ₃
4	247,38427 ₇	0,02 ₈
5	425,36307 ₇	0,02 ₈
6	539,66178 ₁	0,03 ₁
7	590,28736 ₆	0,03 ₅
8	1099,98573 ₆	0,08 ₁

Index geschriebene Kommastelle nur mitgeführt ist, um Rundungsunschärfen zu vermeiden. Infolge der Art der Abschätzung der in das stochastische Modell eingehenden Größen können die aus der Ausgleichung ermittelten Standardabweichungen als Messunsicherheiten u angesehen werden. Der Guide for the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) (DIN V ENV 13005, 1999) besagt, dass mit dem Faktor $k = 2$ auf die erweiterte Messunsicherheit U überzuleiten ist; anzugeben als \pm -Werte. Mit Hilfe einer entsprechenden Option in PANDA lassen sich die »relativen Genauigkeiten« zwischen zwei Punkten (in mm) ermitteln, wobei die Korrelationen der laufenden Ausgleichung einfließen. Im Ergebnis führt dies zu der Aussage, dass mit dem Ringversuch $u_m \leq \pm 0,2$ ppm für die Basis in Neubiberg mutmaßlich erreicht worden ist.³

Die eingesetzten Messinstrumente nutzen unterschiedliche Messprinzipien und Wellenlängen. Jeder Teilnehmer im Ringversuch setzte sein eigenes Personal ein und verwendete seine meteorologische Ausrüstung und seine eigene Methodik zur Erfassung von repräsentativer Temperatur, Luftdruck und Partialdruck des Wasserdampfs. Die Vorverarbeitung bis zur Zusammenstellung der korrigierten und reduzierten Strecken erfolgte mit unterschiedlicher Auswertesoftware der einzelnen Teilnehmer. Zudem fanden die Messungen verteilt über einen Zeitraum von zwei Jahren bei unterschiedlichen Wetterbedingungen statt. Es liegen also unabhängige Einzelergebnisse aus den Kampagnen vor. Daher kann für den Ringversuch

3 Bei einem vergleichbaren Ringversuch auf der alten Prüfstrecke in den Jahren 1982/83, an dem sich sieben Institutionen mit ihren Kern Mekometer 3000 beteiligt haben, ist es zu Abweichungen zwischen den Datensätzen bis 4 ppm gekommen, sodass seinerzeit bezüglich des Maßstabes der alten Prüfstrecke Ungewissheiten geblieben sind (Caspary 1983).

uneingeschränkt von Vergleichsbedingungen gesprochen werden. Sofern im Datenkollektiv noch systematische Effekte enthalten sein sollten, liegen diese in einer Größenordnung, dass sie von zufälligen Messabweichungen nicht zu unterscheiden sind.

4 Messkampagne des FGI in Neubiberg

In der Zeit vom 13. bis 17. Oktober 2014 fand, eingebunden in das EMRP JRP SIB60, eine Messkampagne des Finnish Geodetic Institute (FGI) – seit dem 1. Januar 2015 Finnish Geospatial Research Institute – mit einem Kern Mekometer 5000 (Nr. 357094 inkl. Reflektor Nr. 374414) statt mit dem Ziel, den sog. Nummela-Standard auf die Basis in Neubiberg zu übertragen. Das FGI gilt als eine der weltweit renommiertesten Institutionen bei der hochgenauen Bestimmung von Strecken. Diese Tradition geht auf Y. Väisälä (1891–1971) und das von ihm entwickelte Weißlichtinterferometer zurück, bei dem ein 1 m Quarz-Endmaß die Meterdefinition realisiert. Die Länge eines solchen Endmaßes wird bezogen auf eine Temperatur von 20 °C unter Laborbedingungen mit einem Laserinterferenzkomparator bestimmt, bevor der Quarz in den Väisälä-Interferenzkomparator verbaut wird. Jokela (2014) zeigt auf, dass ein solcher Quarz seine Länge im Laufe der Jahre um einige μm ändert. Die Normalstrecke in Nummela existiert praktisch unverändert seit 1947 und wird durch eine optische Multiplikation der Länge des Endmaßes rückgeführt. Der Aufbau der Nummela-Basis, deren Anordnung noch aus der Zeit rührt, wo eine exakte Streckenmessung nur mittels Invardrähten möglich war, und das Prinzip des Väisälä-Interferenzkomparators sind im Detail bei Jokela (2014) beschrieben.

Die Basis besteht aus acht Untergrundvermarkungen mit den Abständen von 1 m, 6 m, 24 m, 72 m, 216 m, 432 m und 864 m bezogen auf die Markierung 1. Neben diesen Markierungen befinden sich Pfeiler, auf denen ein EDM adaptiert werden kann und auf die die interferometrisch bestimmten Strecken durch Projektion übertragen werden. Eine interferometrische Bestimmung der Basis bedeutet einen Zeitaufwand mehrerer Wochen, wobei die eigentlichen Messungen nur nachts bei sehr stabilen Wetterbedingungen möglich sind. Die gegenwärtig letztmalig ausgewertete und insgesamt 15. Bestimmung seit 1947 datiert aus 2007.⁴ Für diese Kampagne gibt Jokela (2014) für die 864 m Strecke eine aus theoretischen Überlegungen abgeschätzte Unsicherheit von $U_d = \pm 0,07_9$ mm an. Er dokumentiert auch das Streuverhalten aller 15 vorliegenden Interferenzmessungen (Tab. 4.32, p. 110). Die Abweichungen der beiden langen Strecken untereinander variieren unregelmäßig bis zu 0,6 mm, ein säkularer Trend ist dabei nicht offensichtlich.

⁴ In 2013 hat eine weitere Kampagne stattgefunden, die zum Zeitpunkt der Erstellung der Dissertationsschrift von J. Jokela (2014) noch nicht ausgewertet war.

Der Skalentransfer auf eine rückzuführende Kalibrierbasis durch das FGI erfolgt in drei Schritten: Zunächst wird das verwendete Kern Mekometer 5000 in Nummela zeitnah kalibriert. Mit diesem Instrument wird die rückzuführende Basis in mehreren Durchgängen in allen Kombinationen gemessen und schließlich wird nochmals in Nummela kontrolliert, ob etwaige Veränderungen durch den Transport und die Benutzung aufgetreten sind. Für die Auswertungen an der UniBw wurden die durch das FGI gemessenen $n = 122$ Distanzen (jeweils das Mittel aus zwei Messungen) zur Verfügung gestellt. Dabei waren bis auf das Anbringen der auf der Nummela-Basis bestimmten Werte für die Nullpunktkorrektur k_0 und den Instrumentenmaßstab k_m noch keine Aufbereitungen berücksichtigt. Zur Erfassung der Meteorologie wurden je zwei in Finnland geprüfte Assmann'sche Aspirationspsychrometer sowie Thommen Aneroidbarometer verwendet, die jeweils am Stand- und Zielpunkt einer Streckenmessung angeordnet waren.

Bei der Aufbereitung der Distanzen ist die Dispersionsformel (1) benutzt worden. Auch wenn durch die Wahl des Raumbezugs klein gehalten, sind alle durch die Theorie geforderten Korrekturen- und Reduktionsterme streng berücksichtigt. Alle Strecken gehen mit $a = 0,1$ mm und $b = 0,2$ ppm entsprechend (2) in die Ausgleichung ein. Keine der 122 Strecken musste abgewichtet oder gestrichen werden! Die größte Verbesserung beträgt $v_{\max} = 0,50$ mm. Weitere acht Verbesserungen liegen betragsmäßig im Bereich 0,4 – 0,5 mm, alle anderen sind kleiner. Es wurde an fünf Werktagen unter variierenden atmosphärischen Bedingungen gemessen. Dabei wurden die Kern DreifüÙe jeweils neu aufgesetzt und horizontalisiert. Die Tab. 3 und 4 protokollieren das mit PANDA erhaltene Ausgleichungsergebnis.

Tab. 3: Kenngrößen der Ausgleichung FGI-Messungen

$n = 122$	$u' = 8$	$d' = 1$	$f = 115$	$\bar{r} = 0,930$
-----------	----------	----------	-----------	-------------------

Tab. 4: Pfeilerkoordinaten und Standardabweichungen FGI-Messungen

Pfeiler	Ausgegliche Koordinaten FGI-Messungen [m]	Stabw. aus Ausgleichung [mm]
1	0,00000 ₀	0,03 ₂
2	18,78040 ₄	0,03 ₀
3	101,23744 ₄	0,02 ₈
4	247,38424 ₈	0,02 ₆
5	425,36323 ₈	0,02 ₉
6	539,66192 ₃	0,02 ₉
7	590,28763 ₀	0,02 ₉
8	1099,98594 ₉	0,03 ₈

5 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Das Ergebnis des Ringversuches als Soll und das Ergebnis der FGI-Messungen als Ist betrachtet, ergeben sich die in der Tab. 5 zusammengestellten Differenzen Δ für die Strecken von Pfeiler 1 zu den anderen Pfeilern der Kalibrierbasis. Die für diese Strecken ermittelten Standardabweichungen s_Δ werden benötigt, um die Differenzbeträge zu studentisieren. Übersteigt die Testgröße T einen Wert von 2,77, gilt eine Differenz als signifikant (Heunecke et al. 2013, S. 158 ff.). Dieser Fall ist für die Strecke 1–7 gegeben. Bildet man für alle 28 Streckenkombinationen die Differenzen, liegt die maximale Abweichung bei der Strecke 2–7 bei $-0,34$ mm. Der Betrag der durchschnittlichen Abweichung ist $< 0,1$ mm. Es zeigt sich eine gewisse Häufung der größeren Abweichungen bei dem Pfeiler 7.

Um die Differenzen der Tab. 5 zu analysieren, bietet sich eine lineare Regression (Heunecke et al. 2013, S. 197 ff.) an, bei der alle Werte als gleichgewichtet betrachtet worden sind (Abb. 3). Für die Regressionskoeffizienten ergeben sich $b_0 = 0,00_3$ mm und $b_1 = -0,25_0$ ppm bei einem multiplen Bestimmtheitsmaß (Heunecke et al. 2013, S. 200 f.) von $B = 0,575$. Beide Regressionskoeffizienten sind nicht signifikant. Der Verlauf der Differenzen kann durch eine Steigungsgerade folglich nur eingeschränkt angenähert werden. Zur weiteren Untersuchung wurden die aus dem Ergebnis der FGI-Messungen in Tab. 4 zu ermittelnden Strecken wie ein Prüfling

Tab. 5: Streckendifferenzen bzgl. Pfeiler 1 mit ihren Standardabweichungen

Strecke von – nach	Differenz Δ [mm]	Stabw. s_Δ [mm]	Testgröße $T = \frac{ \Delta }{s_\Delta}$
1–2	0,07 ₇	0,06 ₉	1,11
1–3	-0,08 ₉	0,06 ₆	1,34
1–4	0,02 ₉	0,06 ₄	0,45
1–5	-0,16 ₂	0,06 ₅	2,49
1–6	-0,14 ₂	0,06 ₆	2,14
1–7	-0,26 ₄	0,06 ₈	3,87
1–8	-0,21 ₃	0,10 ₃	2,07

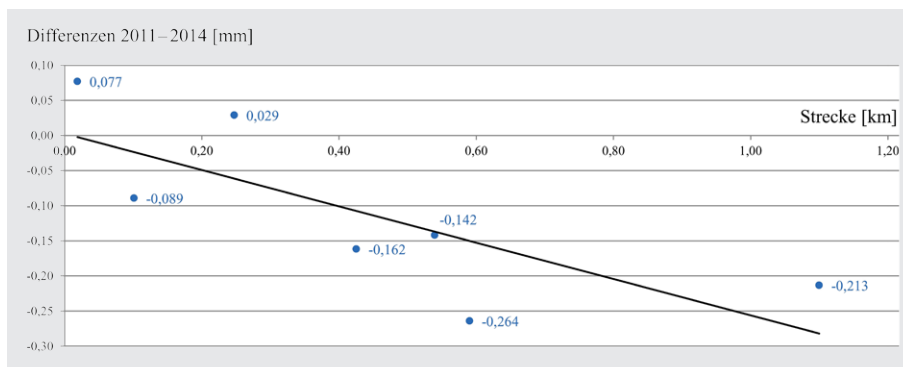


Abb. 3: Lineare Regression der Differenzen aus Tab. 5

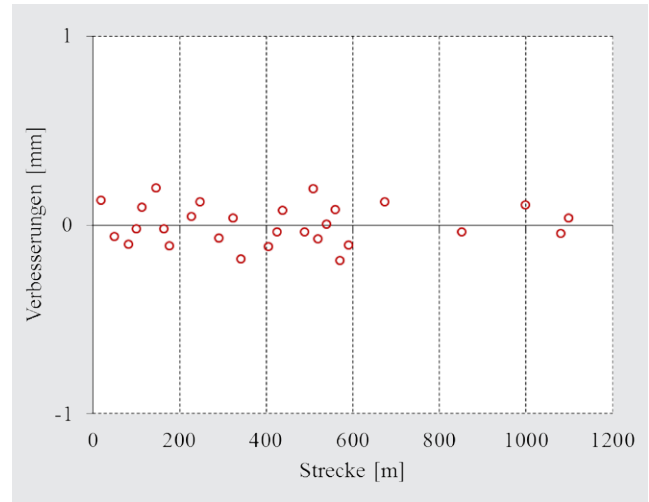


Abb. 4: Verbesserungen der FGI-Messungen nach Anbringen von k_0 und k_m

einer EDM-Kalibrierung behandelt, bei der das Ergebnis des Ringversuchs die Sollstrecken darstellt. Für die Nullpunktkorrektur erhält man $k_0 = -0,04_8$ mm und für den Maßstab $k_m = -0,18_2$ ppm; beide Kenngrößen wiederum nicht signifikant. Die Abb. 4 zeigt die Restabweichungen nach Anbringen dieser Korrekturwerte, die im Mittel der 28 gebildeten Strecken mit $0,08_7$ mm streuen. Ein praktisch identisches Ergebnis wird erhalten, wenn man alle 122 vorliegenden Strecken unmittelbar zur Kalibrierung wie bei einem Prüfling verwendet.

6 Gesamtauswertung

Alle $n = 72 + 122$ vorliegenden Strecken von 2011 und 2014 wurden einer gemeinsamen Ausgleichung zugeführt. Dabei zeigte sich, dass insgesamt 13 Strecken gegenüber den beiden Einzelausgleichungen abgewichtet werden mussten. Prinzipiell könnte dies als Indiz für zwischenzeitlich aufgetretene Pfeilerbewegungen zu interpretieren sein. Von den 194 Verbesserungen haben sechs einen Betrag $\geq 0,5$ mm, davon je drei im Datenkollektiv des Ringversuchs und der FGI-Messungen. Der Maximalbetrag $v_{\max} = 0,68$ mm ergibt sich an der gleichen Stelle wie beim Ringversuch für eine Messung mit dem Mekometer 5000 der UniBw (Heunecke 2012). Die geringen Beträge der Standardabweichungen laut Tab. 7 sind dem hohen Grad der Überbestimmung mit $\bar{r} = 0,957$ (siehe Tab. 6) geschuldet. Infolge der kleineren Werte für die Standardabweichungen aus Tab. 4 im Vergleich zu denen der Tab. 2 tendieren die Pfeilerkoordinaten der Gesamtauswertung zur FGI-Lösung (Tab. 7). Bildet man alternativ zur gemeinsamen Ausgleichung der Strecken das gewichtete Mittel der Epochenlösungen von

Tab. 6: Kenngrößen der Gesamtauswertung

$n = 194$	$u' = 8$	$d' = 1$	$f = 187$	$\bar{r} = 0,957$
-----------	----------	----------	-----------	-------------------

Tab. 7: Pfeilerkoordinaten und Standardabweichungen Gesamtauswertung

Pfeiler	Ausgeglichene Gesamtauswertung [m]	Stabw. aus Ausgleich [mm]
1	0,00000 ₀	0,02 ₀
2	18,78040 ₃	0,01 ₇
3	101,23731 ₆	0,01 ₈
4	247,38431 ₆	0,01 ₈
5	425,36319 ₃	0,01 ₈
6	539,66194 ₇	0,01 ₇
7	590,28755 ₆	0,01 ₉
8	1099,98593 ₇	0,03 ₆

2011 und 2014, verbleiben alle Koordinatenabweichungen < 0,09 mm gegenüber dem Ergebnis der Tab. 7.

Die Nutzung der Option »relative Genauigkeit« bei PANDA unter Berücksichtigung des Erweiterungsfaktors $k = 2$ führt auf die in der Tab. 8 nachgewiesenen Unsicherheiten U_d für die Pfeilerabstände in allen Kombinationen. Für die längste Strecke 1–8 beträgt diese $\pm 0,09_1$ mm als Maximalwert. Schließlich kann man noch alle 28 Streckenkombinationen der Gesamtauswertung den entsprechenden Auswertungen des Ringversuchs und der FGI-Messungen gegenüberstellen. Zur Lösung von 2014 beträgt der Maximalwert der Differenzen $-0,15_1$ mm bei der Strecke 2–7 und zur Lösung von 2011 ist der Maximalwert 0,20₁ mm bei der Strecke 1–8.

Tab. 8: Erweiterte Messunsicherheit U_d für die Pfeilerabstände der Gesamtauswertung

1–2	1–3	1–4	1–5	1–6	1–7	1–8
$\pm 0,03_4$	$\pm 0,04_8$	$\pm 0,05_5$	$\pm 0,06_0$	$\pm 0,06_1$	$\pm 0,06_4$	$\pm 0,09_1$
	2–3	2–4	2–5	2–6	2–7	2–8
	$\pm 0,03_9$	$\pm 0,05_0$	$\pm 0,05_6$	$\pm 0,05_8$	$\pm 0,06_1$	$\pm 0,08_9$
		3–4	3–5	3–6	3–7	3–8
		$\pm 0,04_5$	$\pm 0,05_5$	$\pm 0,05_7$	$\pm 0,06_1$	$\pm 0,08_9$
			4–5	4–6	4–7	4–8
			$\pm 0,04_9$	$\pm 0,05_5$	$\pm 0,06_0$	$\pm 0,08_9$
				5–6	5–7	5–8
				$\pm 0,04_4$	$\pm 0,05_2$	$\pm 0,08_6$
					6–7	6–8
					$\pm 0,03_7$	$\pm 0,08_2$
						7–8
						$\pm 0,08_2$
Angaben in mm						

7 Prüfung von Messgeräten

Am 1.1.2015 ist das neue Mess- und Eichgesetz (MessEG 2013) einhergehend mit der Mess- und Eichverordnung (MessEV 2014) in Kraft getreten. Ziel ist die EU-konforme Vereinheitlichung der Verfahren für das sog. Inverkehrbringen und die Verwendung von Messgeräten, wobei »Inverkehrbringen« die erstmalige Bereitstellung eines Messgeräts auf dem Markt der Europäischen Union ist. Das Gesetz gilt für Anwendungen im geschäftlichen und amtlichen Verkehr (§ 1 MessEV) und verlangt für die eingesetzten Messgeräte eine Konformitätsbewertung: »Messgeräte müssen die wesentlichen Anforderungen erfüllen; dies schließt die Einhaltung der Fehlergrenzen ein« (siehe § 6 MessEG). Geschäftlicher Verkehr ist jede Tätigkeit, die nicht rein privater, innerbetrieblicher oder amtlicher Natur ist, sofern dabei Messwerte ermittelt oder verwendet werden, die geeignet sind, den wirtschaftlichen Wert einer Sache oder einer Dienstleistung näher zu bestimmen (§ 6 MessEV).

Das Gesetz ist u. a. bindend, wenn die Messgröße Länge oder Kombinationen von Längen zur Längen- oder Flächenermittlung zu bestimmen sind. Im öffentlichen Vermessungswesen sind das MessEG und die MessEV nicht anzuwenden (siehe § 5 MessEV). Vom Anwendungsbereich ausgenommen sind auch die Messgeräte, die den Vorschriften des öffentlichen Vermessungswesens entsprechen, was Interpretationsspielraum für privatrechtliche Vermessungen bietet. Gegenwärtig ist in Diskussion, wie die Anforderungen an eine Konformitätsbewertung insbesondere für die Verwender von Messgeräten sinnvoll gestaltet werden kann. Dies betrifft vor allem Umfang und Wiederkehr von einzufordernden Konformitätsbewertungen bei der »Feststellung der Einhaltung von Fehlergrenzen« (§ 7 MessEV). Bei der Prüfung ist nachweisbar zu gewährleisten, dass eine metrologische Rückführung gegeben ist (§ 47 MessEG). Der Verwender muss im geschäftlichen Verkehr sicherstellen, dass sein Messgerät über die für den Verwendungszweck erforderliche Genauigkeit verfügt (§ 23 MessEV).

Losgelöst von Vorgaben und Verpflichtungen, die sich aus der neuen Rechtssituation ergeben, sind hoheitliche Vermessungen in fast allen Bundesländern ohnehin nur mit geprüften Messgeräten zulässig. Die Prüfvorgaben sind an den Erfordernissen der Landes- und Liegenschaftsvermessungen orientiert, wobei bezüglich von Tachymetern im Allgemeinen nur der Nachweis für den Distanzmessteil gefordert wird. Im privatrechtlichen Bereich fordert z.B. DIN 18710-1 (2010) im auszuarbeitenden Messprogramm und bei der Dokumentation einer Ingenieurvermessung Angaben zur Prüfung der eingesetzten Messinstrumente. Der Umfang und die Wiederkehr der Prüfungen werden dabei in der Praxis unterschiedlich gehandhabt und liegen gewöhnlich bei ein bis zwei jährlichen Intervallen bis zu Prüfungen unmittelbar vor und nach wichtigen Messeinsätzen. Die Prüfung eines EDM besteht im Allgemeinen in einer Kalibrierung mit der

Ermittlung von k_0 und k_m , bei der die verbleibenden Abweichungen vor allem auch die Güte des Instruments kennzeichnen. Wird eine Kalibrierung auf einer Basis von denselben Personen und mit der gleichen Zusatzausrüstung wie bei den sonstigen Messungen durchgeführt, handelt es sich vom Ansatz her um eine »Systemprüfung«.

8 Fazit

Der Durchmesser eines europäischen Haars beträgt laut Wikipedia ca. 0,05 – 0,07 mm. Die größte aufgetretene Differenz zwischen dem Ergebnis des Ringversuchs und dem der FGI-Messungen beträgt also etwa sechs Haarbreiten auf einer Strecke 2–7 = 571 m, wobei zwischen den besagten Kampagnen etwa drei Jahre liegen. Eine gewisse Häufung der größeren Abweichungen auf der Pfeilerstrecke ist bei Pfeiler 7 zu erkennen. Die Strecke 1–7 wird beim Vergleich beider Epochenlösungen als signifikant abweichend ausgewiesen, siehe Tab. 5. Dennoch spricht das Ergebnis insgesamt für die hohe Lagestabilität der Pfeiler, was als solches ein wesentliches Kriterium einer qualitativ hochwertigen Kalibrierbasis ist. Es ist weitergehenden Untersuchungen vorbehalten, wie der Maßstabeffekt von ca. –0,2 ppm (4 Haarbreiten/km) zwischen dem Ergebnis des Ringversuchs und dem durch die FGI-Messungen nach Neubiberger übertragenen Nummela-Standard zu erklären ist.

Das Gesamtergebnis (siehe Tab. 7) tendiert der besseren Genauigkeit der FGI-Lösung wegen zu dem Ergebnis der Messungen vom Oktober 2014. Die Tab. 8 besagt, dass für alle Teilstrecken nach der Gesamtauswertung $U_d < \pm 0,1$ mm gilt. Die in Tab. 7 nachgewiesenen Koordinaten werden nunmehr für die Auswertung von EDM-Prüfungen auf der neuen Kalibrierbasis in Neubiberger verwendet. Führt man das Ergebnis der Gesamtauswertung als neue Solllösung ein, bedeutet dies für die Prüflinge geringfügige Veränderungen von $\Delta k_0 \approx -0,03$ mm und $\Delta k_m \approx -0,16$ ppm gegenüber der Verwendung der Sollstrecken aus dem Ringversuch.

Der GKGM-Ringversuch und die Messungen des FGI im Rahmen des EURAMET-Projekts in Neubiberger zeigen die Grenze des derzeit Machbaren bei der Streckenmessung mit elektrooptischen Instrumenten auf. Der durch die neue Pfeilerstrecke in Neubiberger realisierte Normalkilometer ist im Ergebnis mit geringer Unsicherheit auf die SI-Definition des Meters rückgeführt – mutmaßlich ist $U_m < \pm 0,2$ ppm erreicht. Jedoch besteht hinsichtlich der anzuwendenden Dispersionsformel (1) noch weiterer Forschungsbedarf (vgl. Schwarz 2012). Das erreichte Ergebnis macht die Pfeilerstrecke in Neubiberger zu einem optimalen und hochrangigen Primärstandard auch im europäischen Vergleich. Fortschritte bei der Güte von elektrooptischen Streckenmessungen »in air« wird es angesichts der Refraktion nur durch die Verwendung von Mehrfarbenlasern geben, bei denen aus den Differenzen der Messungen mit unterschiedlichen Trägerwellen unter

Nutzung des Dispersionseffekts die meteorologisch korrigierte Distanz ermittelt werden kann (siehe u. a. Meiners-Hagen et al. 2014). Aber auch wenn es zukünftig solche marktreifen EDM geben sollte, sind auch sie wiederkehrend auf Kalibrierbasen zu prüfen.

Dank

Die Messungen des FGI in Neubiberger, durchgeführt durch Herrn Dr. J. Jokela, erfolgten im Rahmen des EMRP-Vorhabens »Joint Research Project SIB60 Metrology for long distance surveying, WP4: Improving surveying practice«. Das EMRP wird von den teilnehmenden Ländern und der Europäischen Union gemeinschaftlich finanziert. Dr. Jokela ist herzlich für die hervorragende Arbeit bei der Messkampagne in Neubiberger und die Überlassung der Rohmessungen zu danken.

Literatur

- Caspary, W.: Die Genauigkeit der Mekometermessungen auf der Prüfstrecke Neubiberger. In: Elektrooptische Präzisionsstreckenmessung. Schriftenreihe UniBw München, Heft 11, S. 115–130, ISSN 0173-1009, 1984.
- DIN 18709-1: Begriffe, Kurzzeichen und Formelzeichen im Vermessungswesen – Teil 1: Allgemeines. Beuth-Verlag, Berlin, 1995.
- DIN 18710-1: Ingenieurvermessung – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Beuth-Verlag, Berlin, 2010.
- DIN V ENV 13005: Leitfaden zur Bestimmung der Unsicherheit beim Messen. Beuth-Verlag, Berlin, 1999.
- Eschelbach, C., Heckmann, B., Lösler, M.: Hochgenaue Sollstreckenbestimmung mit einem mobilen Lasertracker an der Kalibrierbasis Neu-Isenburg. AVN Heft 3, S. 95–101, 2015.
- GM-AR: Verwaltungsvorschrift Gesetzliches Messwesen – Allgemeine Regelungen. Bundesanzeiger Nr. 108a vom 15.06.2002.
- Heister, H.: Die neue Kalibrierbasis der UniBw München. AVN Heft 10, S. 336–343, 2012.
- Heunecke, O.: Auswertung des Ringversuchs auf der neuen Kalibrierbasis der UniBw München zur Bestimmung der Sollstrecken. AVN Heft 11-12, S. 380–385, 2012.
- Heunecke, O., Kuhlmann, H., Welsch, W., Eichhorn, A., Neuner, H.: Handbuch Ingenieurgeodäsie, Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. 2. Aufl., Wichmann-Verlag, ISBN 978-3-87907-467-9, 2013.
- ISO 17123: Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments, Part 4: Electro-optical distance meters (EDM measurements to reflectors). Beuth-Verlag, Berlin, 2012.
- Jokela, J.: Length in geodesy – On metrological traceability of a geospatial measurand. Publ. Finnish Geodetic Institute No. 154, 240 p. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-711-310-6>, 2014.
- Loser, R.; Meier, D.; Münch, K.H.; Schwarz, W. (1991): Das Funktionsprinzip des Mekometers ME 5000. AVN Heft 10, S. 324–345, 1991.
- Meiners-Hagen, K., Pollinger, F., Prellinger, G., Rost, K., Wendt, K., Pöschl, W., Dontsov, D., Schott, W., Mandryka, V.: Refractivity compensated tracking interferometer for precision engineering, Proceedings of the 58th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium, 2014.
- MessEG: Gesetz über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt, ihre Verwendung und Eichung sowie über Fertigpackungen (Mess- und Eichgesetz) vom 25. Juli 2013.
- MessEV: Verordnung über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt sowie über ihre Verwendung und Eichung (Mess- und Eichverordnung) vom 11. Dezember 2014.
- Rüger, J.M.: Refractive index formulae for electro-optical distance measurement. FIG Proceedings, Comm. 5, paper TS28/1, pp. 191–208, Brighton, 1998.
- Schwarz, W.: Einflussgrößen bei elektrooptischen Distanzmessungen und ihre Erfassung. AVN Heft 10, S. 323–335, 2012.
- Schwendener, H.R.: Elektronische Distanzmesser für kurze Strecken, Genauigkeitsfragen und Prüfverfahren. In: Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik, Heft 3, S. 59–67, 1971.

Anschrift des Autors

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke
 Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie
 Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberger
 otto.heunecke@unibw.de