

# Bestimmung der Kalibrierbasis der UniBw München – Messungen mit dem Mekometer ME5000 des Lehrstuhls für Geodäsie der Technischen Universität München

## Determination of Reference Distances of the Calibration Baseline at the UFAF Munich – Mekometer ME5000 Measurements of the Chair of Geodesy of the Technische Universität München

Peter Wasmeier

Die Universität der Bundeswehr in München verfügt seit 2009 über eine moderne, rückführbare Kalibrierbasis von über 1 km Länge. Im Rahmen einer GKGM-Fachtagung zur Thematik hochgenauer Distanzmessverfahren wurde diese von unterschiedlichen Institutionen und mit verschiedensten Instrumentarien übermessen, um ein möglichst hohes Maß an Genauigkeit und Zuverlässigkeit für die einzelnen Teilstrecken ableiten zu können. Der Lehrstuhl für Geodäsie der Technischen Universität München (TUM) beteiligte sich an diesem Ringvergleich mit einem Mekometer ME5000.

**Schlüsselwörter:** Kalibrierbasis, Mekometer

*The University of Federal Armed Forces in Munich has at its disposal a modern, traceable calibration baseline of more than 1 km of length since 2009. In the context of a GKGM meeting regarding high-precision distance measurements it was quantified by various institutions and with very different types of instruments to gather a preferably high degree of accuracy and reliability for the single pillar legs. The Chair of Geodesy at the Technische Universität München took part in this round-robin test using its Mekometer ME5000.*

**Keywords:** Calibration baseline, Mekometer

### 1 AUSGANGSSITUATION IM RAUM MÜNCHEN

Im Raum München gab es in der Vergangenheit mehrere Kalibrierbasen zur Überprüfung von Streckenmessgeräten, welche jedoch aus unterschiedlichen Gründen heute nicht mehr vollständig nutzbar bzw. nicht von höchster Genauigkeit sind.

Bereits im Jahr 1958 errichtete der damalige Direktor des Deutschen Geodätischen Forschungsinstituts (DGFI) und zugleich Ordinarius des

Lehrstuhls für Geodäsie der TUM, Prof. Max Kneißl, eine Basis und Normalstrecke im Ebersberger Forst – bereits zu Zeiten des Tellurometer, aber noch zehn Jahre, bevor mit dem Wild DI10 der erste katastertaugliche Distanzmesser auf den Markt kam. Diese war 864 m lang, unterirdisch vermarktet und mit Pfeilern versehen und wurde mittels eines Väisälä-Komparators eingemessen. Sie war Grundlage für die Errichtung eines europäischen Normalkilometers, und wurde bis in das aktuelle Jahrhundert hinein regelmäßig vom Amt der bayerischen Landesver-

messung und vom Lehrstuhl für Geodäsie genutzt /Drewes 1994/. Da der notwendige hohe Instandhaltungsaufwand mit den Jahren die Notwendigkeit der Eichstrecke, insbesondere im Hinblick auf die Möglichkeit, größere Distanzen mit GNSS bestimmen zu können, zunehmend überschritten hat, ist die Basis heute jedoch nicht mehr in Gebrauch und die Pfeiler zeigen deutliche Verfallserscheinungen.

Eine weitere Kalibrierbasis existiert neben dem Gelände des ehemaligen Fliegerhorsts Neubiberg (unmittelbar bei der UniBw München, heute Landschaftspark Hachinger Tal). Sie hatte ursprünglich eine Länge von 1080 m, im Rahmen von Bauarbeiten an einer Umgehungsstraße wurde jedoch der am weitesten entfernte Pfeiler unbrauchbar, sodass aktuell nur mehr eine Strecke von 540 m zur Verfügung steht. Die Basis ist noch nutzbar, durch ihre frei zugängliche Lage unmittelbar neben landwirtschaftlichen Nutzflächen aber nur unzureichend gegen potentielle Beschädigungen geschützt.

Daneben existiert seit 1990 eine Normalstrecke mit 7 Pfeilern an der Staustufe 20 des Lechs bei Landsberg/Lech, angelegt von der „Bayerischen Wasserkraftwerke AG“, heute EON Bayern. Diese wird u.a. von den umliegenden Vermessungsämtern genutzt, weist jedoch ebenfalls nur eine Länge von 515 m auf.

Unter dem Eindruck, dass moderne EDM-Geräte hohe Genauigkeiten mit und ohne Reflektor auf immer größere Entfernungen erzielen, bisher der Labor- und Industrievermessung vorbehaltene Instrumente wie Lasertracker zunehmend im Außenbereich eingesetzt werden und auch GNSS-Systeme durch umfangreiche Kalibrierung in den Genauigkeitsbereich terrestrischer Verfahren vordringen, ist die Errichtung einer modernen, rückführbaren, geschützten und gewarteten Kalibrierbasis ein konsequenter Schritt zur nachhaltigen und zuverlässigen Qualitätssicherung und Vergleichbarkeit von Distanzmesssystemen.

Der Lehrstuhl für Geodäsie ist daher der Anfrage, mit einem Präzisionsdistanzmesser Mekometer ME5000 diese Kalibrierbasis im Rahmen eines Ringvergleichs zu übermessen, gerne nachgekommen.

## 2 INSTRUMENTARIUM

Der Lehrstuhl für Geodäsie der TU München verfügt seit 1986 mit dem Mekometer ME 5000 der Firma Kern (später Leica) über einen der genauesten Distanzmesser für mittlere und lange Messbereiche (Abb. 1). Grundlage des Messprinzips ist die Variation der Modulationsfrequenz der ausgesendeten Mess-Lichtwelle, bis zwischen Sender und Reflektor eine exakt ganze Anzahl von Wellenlängen auftritt (Nulldurchgang der reflektierten Welle). Um diese – ähnlich dem GNSS – auftretende Ambiguität bestimmen zu können, wird die Frequenz zur Suche weiterer Nullstellen kontinuierlich verändert, sodass letztlich die unbekannte Anzahl ganzer Wellenlängen als überbestimmtes Gleichungssystem geschätzt werden kann.

Diese Instrumentenserie ist, bei entsprechender Erfassung der Meteorologie, mit bis zu  $0,2 \text{ mm} + 0,2 \text{ ppm}$  ( $k=1$ ) Streckenmessunsicherheit spezifiziert; Untersuchungen zeigen jedoch, dass insbesondere bei Strecken  $< 100 \text{ m}$  bei ausreichender Kompensation der meteorologischen Einflüsse Unsicherheitsanteile von  $0,05 \text{ mm}$  bis  $0,10 \text{ mm}$  nicht überschritten werden /Loser u.a. 1991/.

Von Herstellerseite gibt es für die wenigen noch existierenden Mekometer keinen Support mehr; das letzte offizielle Kalibrierzertifikat, welches Maßstabsabweichungen auf Grundlage der Differenzbestim-



Abb. 1 | Mekometer ME5000 [<http://ppd.fnal.gov/align/images/mekometer.jpg>]

mung zwischen angezeigter und tatsächlich erzeugter Modulationsfrequenz ausweist, datiert für das Instrument der TUM aus dem Jahr 2002 und gibt einen Wert von  $+80 \text{ ppb}$  ( $\mu\text{m}/\text{km}$ ) bei  $22^\circ\text{C}$  mit einer Variabilität von  $\pm 150 \text{ ppb}$  im Temperaturbereich von  $-10^\circ\text{C}$  bis  $+40^\circ\text{C}$  und mit einer Frequenzstabilität von  $\pm 100 \text{ ppb}$  nach 10-15 Minuten Betriebsdauer an. Im Vorfeld der Messungen auf der Eichbasis der UniBw wurde daher eine eigene Maßstabskalibrierung in der Klimakammer des Geodätischen Prüflabors bei  $0^\circ\text{C}$  bis  $40^\circ\text{C}$  durchgeführt, welche einen Wert von  $+36 \text{ ppb} \pm 152 \text{ ppb}$  ( $k=1$ ) ergab. Der Unsicherheitsanteil der Maßstabsbestimmung mit den Mitteln, welche dem Geodätischen Prüflabor der TUM zur Verfügung stehen, ist folglich größer als derjenige, welcher aus der 10 Jahre alten Kalibriermessung ableitbar wäre. Letztere kann jedoch aufgrund fehlender Aktualität nicht mehr guten Gewissens herangezogen werden.

Daneben existiert aus 2002 ein Kalibrierwert für die Additionskorrektion des Mekometers, welcher mit  $-0,05 \text{ mm} \pm 0,07 \text{ mm}$  angegeben wird. Dieser Wert ist nur relevant in Kombination mit den Additionskorrekturen der verwendeten Reflektoren, wobei deren Summe im Rahmen der Ausgleichung der Streckenmessungen mitgeschätzt wird.

Für größere Entfernungen existiert bei den Mekometer-Reflektoren die Möglichkeit, durch seitliche Aufsteck-Reflektoren die reflektierte Signalintensität zu erhöhen (Abb. 2). Erfahrungen mit dem ME5000 haben dazu geführt, dies bei Entfernungen ab ca.  $800 \text{ m}$  zu nutzen, um einen deutlich beschleunigten Messablauf zu gewährleisten und Fehlmessungen zu vermeiden. Inwieweit dies Einfluss auf Additionskonstante und Genauigkeit hat, ist jedoch nicht explizit untersucht.

Als Meteorologie-Sensoren verwendet wurden Aßmannsche Aspirationspsychrometer zur Bestimmung von Trocken- und Feuchttemperatur der Luft (im Schatten), welche eine Ablesung von  $0,1^\circ\text{C}$  erlauben. Diese wurden in der Klimakammer im Intervall von  $0^\circ\text{C}$  bis  $-40^\circ\text{C}$  gegen einen rückgeführten Pt100 kalibriert, wobei eine lineare Regression angesetzt wurde und aus der Vielzahl von Psychrometern des Lehrstuhls diejenigen gewählt wurden, welche annähernd identisches lineares Verhalten zeigten. Als Barometer kamen Thommen Meteo-Stationen HM30 mit einer nominellen Genauigkeit von  $1,0 \text{ hPa}$  zum Einsatz, welche gegenüber einem Referenzbarometer kalibriert wurden.



Abb. 2 | Mekometer-Reflektor mit aufgesteckten Zusatzreflektoren

Um den meteorologischen Verlauf entlang der jeweiligen Messdistanz zumindest zu nähern, wurde jeweils ein Sensorsatz an beiden Endpunkten der jeweiligen Strecke eingesetzt und gemittelt. Der Ungenauigkeitseinfluss der Meteorologie kann somit mit  $<0,3 - 0,5$  ppm abgeschätzt werden. Dieser Anteil übersteigt die nominelle entfernungsabhängige Angabe für das Mekometer und ist Ausdruck der bekannten Tatsache, dass bei größeren Entfernungen (hier bis zu 600 m) die Ungenauigkeit der meteorologischen Erfassung alle anderen Fehleranteile überwiegt. Eine Verbesserung wäre möglich durch die Verwendung genauerer Instrumente (sofern verfügbar) und die bessere Modellierung der Meteorologie entlang des gesamten Messwegs (sofern logistisch möglich).

### 3 MESSUNG UND AUSWERTUNG

Die Messung auf der Kalibrierbasis fand am 15.09.2011 statt und wurde ausgeführt als Messung in allen Kombinationen. Zur Zeitersparnis beim Umbau wurde mit zwei Prismen (und Meteo-Sensorausrüstungen)

an den Zielpunkten gleichzeitig gearbeitet, wobei darauf geachtet wurde, dass die Prismen in Hin- und Rückmessung zur Vermeidung systematischer Effekte weitgehend variiert wurden. Letztlich konnten jedoch die Einflüsse des jeweiligen Prismas hinsichtlich ihrer Additionskorrektur im Rahmen der Ausgleichung als nicht signifikant verifiziert werden ( $0,10 \text{ mm} \pm 0,06 \text{ mm}$  bzw.  $0,01 \text{ mm} \pm 0,07 \text{ mm}$ , jeweils  $k=1$ ).

Am Messtag von 9:00 bis 18:00 Uhr herrschten leichte, wechselnde Bewölkung und leichter Wind bei Temperaturen zwischen 16 und  $20^\circ\text{C}$ , sodass sich refraktionsbedingt (Luftflimmern, Anzielung über weite Strecken) keine größeren Schwierigkeiten ergaben. Einflüsse auf das Instrumentarium selbst konnten durch konsequente Beschattung vermieden werden, wobei die Temperatursensoren unter einem eigenen Sonnenschirm abseits von den Pfeilerschirmen positioniert wurden. Deutlich spürbar war aber auch bei Beschattung das sofortige Schwanken der Lufttemperatur um  $\pm 1^\circ\text{C}$  in Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung bei vorkommenden Wolkenlöchern; im Extremfall am späten Nachmittag bei gleichzeitig einsetzendem Wind sogar einmal mit einem Temperaturabfall von nahezu  $3^\circ\text{C}$  (Abb. 3 und 4).

Die Messung selbst bestand für jede der 56 gemessenen Strecken aus drei Einzelmessungen und den entsprechenden Meteorologie-Ableesungen auf Stand- und Zielpfeiler. Die Auswertung wurde nach dem Standard-Verfahren durchgeführt als vermittelnde Ausgleichung mit den sieben Teilstrecken sowie den beiden Additionskorrekturen der Prismen als Unbekannte, wobei aufgrund der hohen inneren Genauigkeit und der durch die Messung in allen Kombinationen vorhandenen Redundanz fünf Beobachtungen, welche vor allem die Messungen der längeren Teilstrecken zu Pfeiler 8 betrafen, verworfen wurden. Diese wiesen Residuen von  $> 1 \text{ mm}$  auf und wurden daher als Ausreißer detektiert. In der Konsequenz ist damit der Teilabschnitt zwischen Pfeiler 7 und 8 mit geringerer Beobachtungszahl vorhanden als die anderen Abschnitte.

Als Resultat lassen sich die einzelnen Teilstrecken mit einer einfachen Standardabweichung von  $0,06 - 0,08 \text{ mm}$  (innere Genauigkeit, GUM Typ A) angeben, was für die Gesamtstrecke einer Standardabweichung von  $0,19 \text{ mm}$  entspricht. Auf die Angabe der einzelnen Streckenlängen wird hier verzichtet, da sie außerhalb einer tatsächlichen Kalibriermessung nicht von Interesse für den Leser sind. Die durchschnittliche Größe der Residuen ist im Betrag  $0,15 \text{ mm}$ , mit Maximalwerten von  $0,43 \text{ mm}$  bzw.  $0,47 \text{ mm}$  (Abb. 5). Auffällig ist die Tatsache, dass insbesondere im

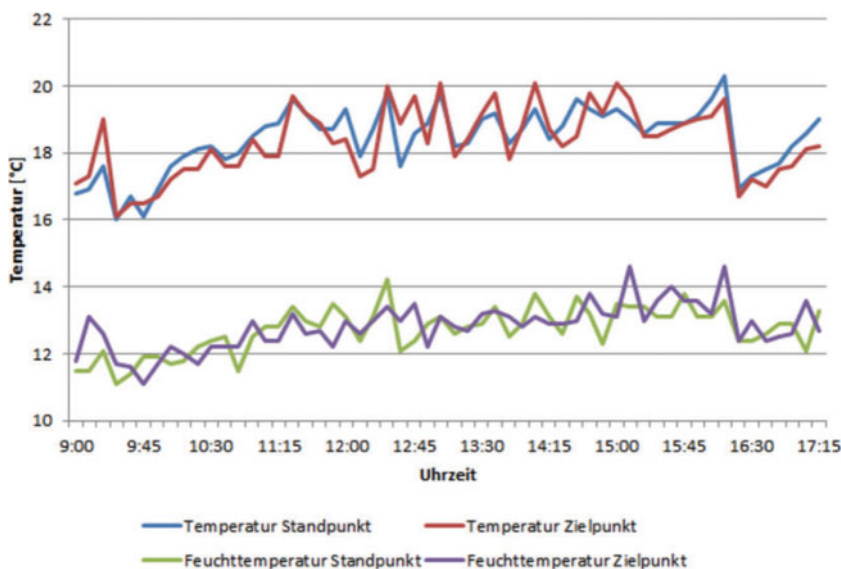


Abb. 3 | Temperaturverlauf am Messtag

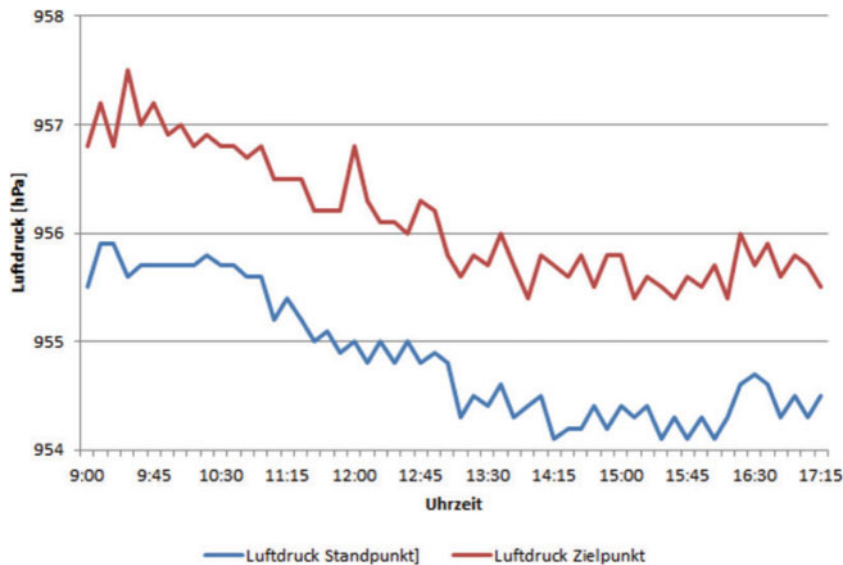


Abb. 4 | Luftdruckverlauf am Messtag

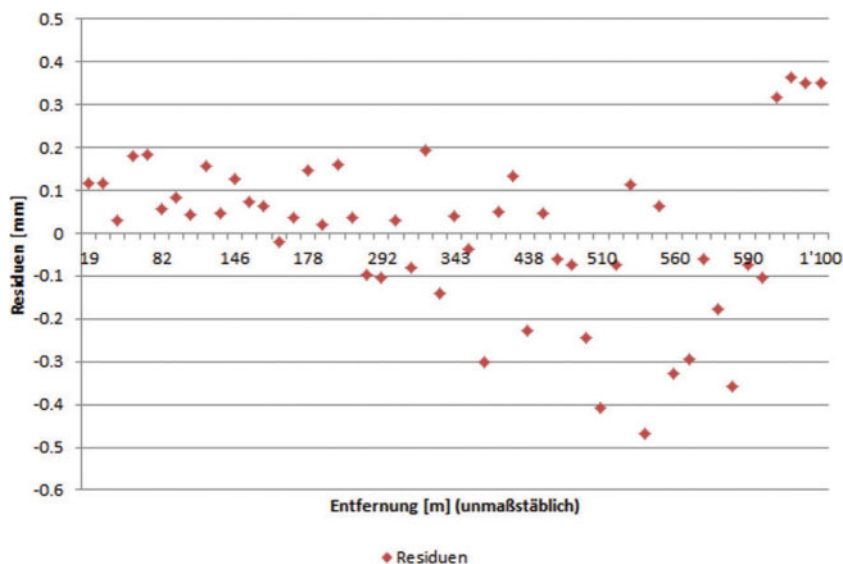


Abb. 5 | Residuen der Beobachtungen nach der Ausgleichung

Nahbereich die Residuen durchwegs positiv sind, während sie im mittleren Entfernungsbereich zwischen 350 m und 600 m tendenziell negativ ausfallen. Es ist möglich, dass dieses Verhalten durch die Auswahl des Messbereichs am Mekometer, welches durch einen Schalter zwischen unterschiedlichen Frequenzmodulationshüben wählen lässt, zumindest verursacht wird. Der übliche Wechsellpunkt liegt bei Entfernungen von ca. 500 m. Ein weiterer Einfluss liegt aber sicher in den zunehmend ungenauer bestimmbar meteorologischen Einflüssen; gerade die nahezu identischen Werte für die längeren Strecken ab 800 m lassen hier einen unkorrigierten, systematischen Einfluss z.B. als Restfehler aus der Instrumentenkalibrierung, vermuten. Ebenso ist ein Einfluss der seitlichen Aufsteck-Reflektoren nicht auszuschließen.

Eine weiterführende Berechnung des Unsicherheitsbudgets nach dem GUM unter Einschluss aller aufgeführten und sonstiger Unsicherheitseinflüsse (Zentrierungen, gleiche Höhenlage der Punkte, Alignment etc.) wurde vorerst nicht durchgeführt. Die Bewertung der Resultate im Vergleich mit den anderen beteiligten Institutionen, zusammen mit einer Abschätzung des Fehlerbudgets (auf Basis der Genauigkeiten vom Typ A dieser Messreihe) ist in /Heunecke 2012/ zu finden.

## LITERATUR

- Drewes, H. (1994): Das Deutsche Geodätische Forschungsinstitut, Abt. I: Theoretische Geodäsie. Mittlg. DWW Bayern (46), 123-136, 1994.
- 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.
- Loser, R.; Meier, D.; Münch, K. H.; Schwarz, W. (1991): Das Funktionsprinzip des Mekometer ME5000. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 98(1991)10, 324 – 345.

**Dr.-Ing. Peter Wasmeier**

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
LEHRSTUHL FÜR GEODÄSIE

Arcisstraße 21 | 80333 München  
p.wasmeier@bv.tum.de

