

Die neue Kalibrierbasis der UniBw München

The new Calibration Baseline of the UniBw Munich

Hans Heister

Im Jahre 2009 konnte an der UniBw München die neue *Kalibrierbasis* für EDM, GPS und nordsuchende Kreisel fertiggestellt werden. Sie besteht aus 7 + 1 tief gegründeten Pfeilern und hat eine gesamte Länge von 1100 m, wobei 7 Pfeiler auf 590 m nach Schwendener verteilt errichtet wurden. In diesem Beitrag wird über den Entwurf und die bauliche Realisierung dieser Prüfeinrichtung berichtet. Auf Einladung der GKGM wurde im Rahmen eines Ringversuchs, an dem 7 Institutionen beteiligt waren, versucht, die Messgröße Länge rückzuführen.

Schlüsselwörter: EDM-Prüfstrecke, Eichstrecke, Kalibrieren, Rückführung

In the year 2009 at the UniBw Munich a new calibration baseline could be completed with the options to calibrate EDM, GPS and north seeking gyro instruments. The baseline consists of 7 +1 deep founded pillars and has a total length of 1100 m. 7 of these pillars were distributed over a length of 590 m following the rules of Schwendener. In this contribution the design and the constructional implementation of this test facility is reported. On invitation of GKGM 7 institutions, all specialized on high precision distance measurements, were invited to determine the measurand length, particularly with regard to traceability.

Keywords: EDM baseline, legal calibration, instrument calibration, traceability

1 EINFÜHRUNG

Mit der Fertigstellung der Umgehungsstraße von Ottobrunn Ende des Jahres 2002 und der Aufgabe des Fliegerhorstes Neubiberg wurde die Funktionalität der alten EDM-Prüfstrecke (Abb. 1) der UniBw München so stark beeinträchtigt, dass eine Neuanlage dieser geodätischen Prüfeinrichtung angedacht werden musste. Mit der Neugestaltung des südlichen Universitätsgeländes, bedingt durch die Auflassung des Fliegerhorstes, konnte auch der Antrag zum Neubau einer *Kalibrierbasis* in die Planungsarbeiten eingebracht werden. Diesem Antrag wurde dann auch 2005 zugestimmt, so dass unmittelbar danach mit der fachlichen Ausgestaltung einer solchen Einrichtung begonnen werden konnte.

Mit der Begriffsfestlegung „*Kalibrierbasis*“ sind zwei inhaltliche Schwerpunkte verbunden:

- Zum einen sollte die neue Prüfeinrichtung der anspruchsvollen Messaufgabe „Kalibrieren“ voll genügen. Dies verlangt das Ermitteln des Zusammenhangs zwischen dem Messwert und dem wahren oder richtigen Wert der Messgröße; zudem sollte diese Messgröße auf den entsprechenden nationalen Standard rückgeführt worden sein.

- Zum anderen sollte die Einsatzmöglichkeit, die Vielfalt der zu prüfenden Instrumente, erweitert werden und die Genauigkeit der Soll-Vorgaben den heutigen Erfordernissen entsprechen.



Abb. 1 | Lage der alten und neuen Kalibrierbasis der UniBw München

Verfeinert man diese Vorgaben, so lassen sich folgende Ziele zur Anlage der Kalibrierbasis ableiten:

1. Festlegung der instrumententypischen Messgrößen
2. Bestimmung und Rückführung der „Soll“-Messgrößen
3. Festlegung der zu bestimmenden Kalibrierparameter (Konstante, Faktoren oder Funktionen)

Die hierzu durchzuführenden Überlegungen haben dann schließlich direkte Auswirkung auf

- die Anlage und den Aufbau der Kalibriereinrichtung,
- das Prüfverfahren und die Messanordnung sowie
- das Auswerteverfahren und die statistische Analyse.

Nur die richtige Abstimmung dieser drei Themenkomplexe führt zu einem repräsentativen Kalibrierergebnis einschließlich der so wichtigen Schätzung der Messunsicherheiten.

2 REALISIERUNG DER KALIBRIERBASIS

2.1 Die alte EDM-Prüfstrecke der UniBwM

Bevor konkret auf das Anforderungsprofil der neuen Kalibrierbasis eingegangen wird, soll noch mal ein kurzer Rückblick auf die alte Prüfstrecke geworfen werden, da sie sowohl für die Neuanlage als auch bei der Diskussion um die Rückführung noch eine gewisse Bedeutung hat.

Die Anlage der alten Prüfstrecke ist ausführlich in /Caspary, Heister 1984/ beschrieben. Sie wurde 1981 fertig gestellt und war nur für die Überprüfung von elektrooptischen Distanzmessgeräten (EDM) konzipiert. Sie bestand aus 7 + 1 Pfeilern, die als Bohrpfähle ca. 5 m tief gegründet wurden. 7 Pfeiler waren auf ca. 540 m nach den Kriterien von /Schwendener 1971/ aufgeteilt, der 8. Pfeiler stand um weitere 540 m versetzt, so dass insgesamt 1080 m für unterschiedliche Prüfziele von EDM zur Verfügung standen.

Bereits damals wurde angestrebt, „Soll“-Strecken zu bestimmen. Die instrumentellen Möglichkeiten hierzu waren begrenzt, die Frage der Rückführung auf ein Vergleichsnorm der Physikalisch-Technischen-Bundesanstalt blieb ungeklärt. Dennoch ergaben sich zunächst zwei Wege, die Erfolg versprechend schienen.

Zum einen wurde ein Ringversuch mit dem damals genauesten Distanzmessgerät Kern ME 3000 durchgeführt. Neben der Fa. Kern selbst beteiligten sich 6 weitere Hochschulen an diesem Experiment. Somit konnten insgesamt 374 Strecken, unabhängig mit 7 Instrumenten und höchster Präzision gemessen, einer gemeinsamen Auswertung und Analyse unterzogen werden /Caspary 1984/. Das Ergebnis war nur zum Teil befriedigend. Während die Standardabweichung der Streckenverhältnisse aus der gemeinsamen Ausgleichung mit $s_0 = 0,1$ mm geschätzt wurde, ergaben sich für die Maßstäbe der einzelnen Instrumente Differenzen von bis zu 5,6 ppm, die maximale Streckendifferenz auf 1080 wurde zu 6,7 mm ermittelt. Die Frage nach einem besseren Maßstab konnte erst wesentlich später geklärt werden. Das 1986 auf dem Markt erschienene Nachfolgemodell Kern ME 5000 wies wesentlich stabilere Messeigenschaften bezüglich des Maßstabs auf. Somit konnten erneut Messungen mit diesem Gerät, aber auch Übertragungsmessungen von der damals noch intakten Münchener Normalstrecke (Normalkilometer) im Ebersberger Forst /Eichhorn, Kneißl 1959/ auf die Prüfstrecke der UniBwM durchgeführt werden.

Der Normalkilometer im Ebersberger Forst galt schon zu dieser Zeit als rückgeführt. Er war 1958 mit Hilfe der Interferenzmessungen nach Väisälä bestimmt worden, wobei das benutzte Quarzmetersystem beim BIPM in Sèvres bei Paris mit einer Genauigkeit von $0,01 \mu\text{m}$ angeschlossen werden konnte /Eichhorn, Kneißl 1959/. Die notwendigen Messungen mit dem Kern ME 5000 wurden 1988 vom Geodätischen Institut der TU München durchgeführt. Die Genauigkeitsabschätzung führte zu einer Standardabweichung für den Maßstab von $s_M = 0,2$ ppm. Unter kritischer Bewertung aller Umstände, Stabilität der Vermarkung des Normalkilometers, Techniken in der Erfassung der meteorologischen Parameter und der Zeitachse kann doch mit kleinem Restrisiko den Ergebnissen vertraut werden. Dies auch deshalb, weil bereits vorab durchgeführte Messungen mit dem LDM2 Terrameter – ein zwei Farben Laser-Distanzmessgerät für lange Strecken – diesen Maßstab im Rahmen der Messgenauigkeit bestätigen konnten.

2.2 Anforderungsprofil

Aus den Überlegungen zu den o.a. Zielsetzungen ergaben sich folgende konkrete Anforderungen:

1. Die neue Prüfeinrichtung sollte für die Kalibrierung folgender Instrumententypen geeignet sein:
 - Elektronische Distanzmessgeräte, elektronische Tachymeter,
 - GPS-Messsysteme und
 - nordsuchende Kreiseltheodolite.

Damit verbunden sind dann die Messgrößen

- Länge,
- Koordinaten (absolut, relativ, lokal),
- astronomisches Azimut.

2. Die Messunsicherheiten für die Messgrößen wurden zu einem Fünftel der üblichen, für die Praxis festgelegten Spezifikationen der einzelnen Instrumententypen als Zielvorgabe abgeleitet:

Länge: Standardunsicherheit des Maßstabs	$u_M \leq 0,2$ ppm
der Teilstrecken	$u_S \leq 0,2$ mm
Koordinaten (lokal, relativ): Standardunsicherheit	$u_K \leq 0,3$ mm
Astronomisches Azimut: Standardunsicherheit	$u_A \leq 0,6''$

Verbunden mit der Festlegung auf diese Messgrößen ist ebenfalls die Frage bzw. das Konzept zur Rückführung, das später gesondert diskutiert wird bzw. in /Heunecke 2012/ noch einmal aufgegriffen wird.

Als weitere Punkte des Anforderungsprofils, die vorrangig das Umfeld und die Ausführung der Kalibrierbasis beschreiben, sind anzuführen:

3. Gute, homogene meteorologische Bedingungen sowie eine verbesserte Erfassung der meteorologischen Parameter Temperatur, Luftdruck und Feuchte.
4. GPS-Tauglichkeit, d.h. möglichst ungestörte Rundumsicht bis zum Horizont.
5. Hohe Standfestigkeit der Beobachtungspfeiler.
6. Gute Zugänglichkeit, aber auch geschützt vor Beschädigung und Missbrauch.
7. Rückführung der erforderlichen Messgrößen.

2.3 Zu bestimmende Kalibrierparameter

Die Anlage und Ausgestaltung einer Prüfeinrichtung wird, wie oben dargelegt, auch wesentlich bestimmt durch die für das zu untersuchende Instrument typischen Kalibrierparameter. Da insbesondere in den 80er und 90er Jahren zu diesem Thema umfangreich publiziert wurde – stellvertretend sei auf /Rüeger 1996/ und /Jöckel, Stober, Huep 2008/ verwiesen – soll hierzu jedoch nur in aller Kürze eingegangen werden.

Zu elektrooptischen Distanzmessgeräten:

1. Additionskorrektur c

Probleme: Anteile sind sowohl dem Instrument als auch dem Prisma zuzuordnen. Deshalb gilt der Kalibrierparameter c nur für die geprüfte Kombination. Der Kalibrierwert c kann eventuell entfernungsabhängig sein. Der Kalibrierwert c ist abhängig von der Ausrichtung des Prismas. Der Kalibrierwert c ist korreliert mit dem zyklischen Phasenfehler. In der Regel sollten Laboruntersuchungen im Vorfeld diese Einflussgrößen quantitativ bestimmen.

2. Maßstab m

Probleme: Die Bestimmung von m erfordert Soll-Strecken (Rückführung). Der Kalibrierwert m ist hochgradig korreliert mit den Parametern zur meteorologischen Korrektur. Der Kalibrierwert m ist korreliert mit dem zyklischen Phasenfehler. Die Bestimmung des Kalibrierwertes ist abhängig vom Auswertemodell.

Zu nordsuchende Kreiseltheodolite

Der zu bestimmende Kalibrierparameter ist der „Kalibrierwert E “. Er ist der Winkel zwischen der Weisung (Richtungsablesung plus Wert der Schwingungsmittellage, Kreiselanzeige) und der astronomischen Nordrichtung.

Probleme: Die Bestimmung von E erfordert ein astronomisches „Soll“-Azimut. Zur korrekten Reduktion von E auf eine Bezugsfläche müssen die Lotabweichungskomponenten ξ und η bekannt sein. Zur korrekten Reduktion von E auf eine Bezugsfläche muss die entsprechende Meridiankonvergenz berechnet werden. Nur eine West-Ost-Ausdehnung ermöglicht bei Hin- und Rückmessung eine unabhängige Bestimmung in unterschiedlichen Meridianen.

Die Rückführung ist noch diskussionswürdig.

Zu GPS-Messsystemen:

Wegen der Komplexität von Antenne, elektronischem Messsystem und Auswertesoftware ist i.d.R. für die Praxis nur eine *Systemüberprüfung* möglich. In einzelnen Fällen, z.B. für die Antenne, können auch Kalibrierparameter bestimmt werden. Auch hierzu sei auf die einschlägige Literatur verwiesen z.B. /Fuhlbrügge 2004/, /Heister 2006/, /Wanninger 2002/.

Es können folgende Prüfverfahren auf einer Kalibrierbasis durchgeführt werden:

- a) Soll-Ist-Vergleich von direkt gemessenen Messgrößen:
„Soll“-Koordinaten - Koordinaten im RTK-Modus

- b) Soll-Ist-Vergleich von abgeleiteten Messgrößen:

„Soll“-Strecken – GPS-Basislinien

- c) Weitere Prüfverfahren, wobei eine Kalibrierbasis als GPS-Außen-Labor dienen kann:

- systematischer Antennentausch,
- relative Antennen-Kalibrierung,
- Zero-Base-Line-Test,
- Bestimmung von Multipatheinflüssen.

Auch bei diesem Instrumententyp ist die Frage der Rückführung noch in Diskussion.

3 PLANUNG UND AUFBAU

Aus den guten Erfahrungen mit der alten Prüfstrecke wurde entschieden, ein ähnliches Design für die neue *Kalibrierbasis* anzustreben, d.h. eine 7 + 1 Pfeiler Anordnung über eine Gesamtlänge von ca. 1100 m.

Dank der Neuplanung des südlichen Geländes der UniBw München konnte die Anlage der neuen Prüfstrecke auf einem Damm gelegen erfolgen, eine nahezu ideale Lage für gute meteorologische Bedingungen und freier Rundumsicht. Weitere Vorzüge sind die gute Erreichbarkeit durch den Bestand des Taxiways des alten Flughafens (Abb. 1) und die Unzugänglichkeit für die Öffentlichkeit durch Lage innerhalb des umzäunten Geländes der UniBwM.

Zusätzlich konnte bei der Aufschüttung des Dammes erreicht werden, dass eine horizontale Ausrichtung aller Pfeilerköpfe, bezogen auf den mittleren Pfeiler, über den gesamten Bereich der Basis möglich wurde. Dies hat den Vorteil, dass die gemessenen Strecken ohne weitere geometrische Reduktionen direkt in ein Auswerteprogramm eingeführt werden können.

3.1 Geometrische Anlage

Zur Überprüfung von elektrooptischen Distanzmessgeräten, insbesondere zur Bestimmung der Additionskorrektur c , hat sich die Aufteilung nach Schwendener voll bewährt. Deshalb wurde zunächst ein Streckenabschnitt von 7 Pfeilern über eine Distanz von ca. 590 m für diese Prüfaufgabe festgelegt. Ein weiterer 8. Pfeiler konnte, wie bei der alten Prüfstrecke, um ca. 510 m fluchtend abgesetzt errichtet werden, um zur Bestimmung des Maßstabes m längere Strecken heranziehen zu können, aber auch, um für die Überprüfung von GPS-Messsysteme einen größeren Messbereich zu erschließen.

Die Kriterien, die /Schwendener 1971/ festgelegt hat, sind folgende:

- a) Gleichmäßige Verteilung aller Strecken über den in der Praxis vorkommenden Entfernungsbereich.
- b) Gleichmäßige Verteilung aller Strecken über den Feinmaßstab (halbe Modulationswellenlänge).

Theoretisch ist dieses Aufteilungsproblem für alle Fälle *nicht* eindeutig zu lösen, jedoch lassen sich befriedigende Näherungen durchaus erreichen. Nach /Rüeger 1996/ kann man mit den Vorabfestlegungen

kürzeste Distanz $A = 18,7 \text{ m}$

längste Distanz $C_0 = 590,3 \text{ m}$

Feinmaßstab $U = 3 \text{ m}$

Anzahl der Pfeiler $n = 7$

folgende Designparameter bestimmen:

$$B = 1/15 (C_0 - 6A - U) = 31,67 \text{ m}$$

$$D = 1/36 U = 0,083 \text{ m}$$

Mit den Größen A, B, D ergeben sich nun die 6 Teilstrecken nach dem in *Tab. 1* dargestelltem Schema.

Von	Nach	Rechenschema	Strecke
P1	P2	A + D	19,53 m
P2	P3	A + 2 B + 5 D	82,45 m
P3	P4	A + 4 B + 9 D	146,12 m
P4	P5	A + 5 B + 11 D	177,96 m
P5	P6	A + 3 B + 7 D	114,29 m
P6	P7	A + B + 3 D	50,62 m

Tab. 1 | Streckenaufteilung nach Schwendener für eine 7-Pfeiler-Anordnung

Wie bereits erwähnt, wurde ein 8. Pfeiler (*Abb. 4*) um weitere 510 m versetzt errichtet, so dass sich insgesamt die in *Tab. 2* aufgeführten Streckenkombinationen ergeben.

von nach	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
P1	-	18,8	101,2	247,4	425,4	539,7	590,3	1100,0
P2		-	82,5	228,6	406,6	520,9	571,5	1081,2
P3			-	146,1	324,1	438,4	489,0	998,7
P4				-	178,0	292,3	342,9	852,6
P5					-	114,3	164,9	674,6
P6						-	50,6	560,3
P7							-	509,7

Tab. 2 | Mögliche Streckenkombinationen der neuen Kalibrierbasis UniBwM

Interessant ist nun die Frage, inwieweit die Kriterien von Schwendener erfüllt wurden und wie sich die weiteren Verteilungen auch über den erweiterten Messbereich bis 1100 m darstellen. Diese Verteilung sowie alle weiteren Verteilungen über gängige Feinmaßstäbe sind in den *Abb. 2* und *3* dargestellt. Wie zu erwarten, ist die Verteilung bezüglich der originären Design-Parameter bis auf wenige Lücken homogen. Aber auch für andere Feinmaßstäbe U wurden durchaus noch gute bis befriedigende Verteilungen erreicht.

Somit sind alle geometrische Größen und Bedingungen formuliert, um die bautechnische Planung und Realisierung der Kalibrierbasis zu vollziehen.

Neben der Aufteilung der Pfeiler über den gesamten Messbereich galten weitere Überlegungen der Festlegung des kartesischen Koordinatensystems, insbesondere auch im Hinblick auf die Absteckungsarbeiten während der Bauphase.

Wie oben dargelegt, wurde eine horizontale Ausrichtung bezogen auf Pfeiler 7 (*Abb. 4*) angestrebt, um die geometrischen Reduktionen der Messergebnisse zu minimieren. Dies bedeutete, dass alle Pfeilerköpfe mit hoher Genauigkeit in einer horizontalen und vertikalen

Ebene liegen müssen. Dennoch ist bei hochgenauen Messungen die Divergenz der Lotlinien, die zwischen Pfeiler 1 und 8 ca. 11 mgon beträgt, eventuell zu berücksichtigen; bei einer Aufstellungshöhe von 50 cm beträgt die lineare Abweichung 0,09 mm. Für die Kalibrierung von nordsuchenden Kreiseltheodoliten ist die Ost-West-Komponente η der Lotabweichungen von Bedeutung. Sie kann aus den Differenzen der Geoidundulationen ΔN abgeschätzt werden (*Tab. 3*); dabei entspricht $\Delta \tilde{\eta}$ der Lotabweichungsdifferenz in Richtung der Kalibrierbasis und somit nur näherungsweise der in West-Ost-Richtung.

Standpunkt	N (GCG 05) [m]	ΔN [cm]	$\Delta \tilde{\eta}$ [mgon]
P 1	45,636	+1,4	1,5
P 2	45,636	+1,4	1,6
P 3	45,634	+1,2	1,6
P 4	45,630	+0,8	1,5
P 5	45,626	+0,4	1,5
P 6	45,623	+0,1	1,3
P 7	45,622	0,0	-
P 8	45,610	- 1,2	1,5

Tab. 3 | Geoidundulationen und Lotabweichungen der neuen Kalibrierbasis UniBwM

Demnach kann die Neigung des Ellipsoides gegenüber dem Geoid über den gesamten Bereich der Basis als linear betrachtet werden. D.h. für die Kalibrierung und den Vergleich von Kreiselazimuten aus Hin- und Rückmessungen müssen keine Korrekturen angebracht werden.

3.2 Realisierung

Die bautechnische Planung und Überwachung der Bauarbeiten wurde durch die Ingenieurgesellschaft Grundbau GmbH (IGG), Augsburg, in enger Zusammenarbeit mit dem Geodätischen Labor der UniBwM durchgeführt. Wie bereits erwähnt, wurde aus den guten Erfahrungen mit der alten Prüfstrecke die gleiche Pfeilergründung vorgenommen, d.h. ca. 5-6 m tiefe Bohrpfähle, bezogen auf die Höhe des gewachsenen Bodens (*Abb. 5*), mit einem Durchmesser von 60 cm. Jeder Bohrpfahl schließt mit einem Stahlbetonfundament ab, auf dem in einem getrennten Bauabschnitt der eigentliche Messpfeiler errichtet wurde. Die Verbindung ist durch entsprechende Armierung so steif gestaltet, dass kein Stabilitätsverlust zu befürchten ist. Diese Aufteilung hatte den Vorteil, dass für die Absteckung unterschiedliche Genauigkeitshierarchien eingeführt werden konnten. Die höchste Genauigkeit (*absolute* Toleranz in Flucht und Höhe von $\leq \pm 5 \text{ mm}$) wurde bei den Pfeilern oberhalb des Fundamentes und schließlich bei der Einbringung der Pfeiler-

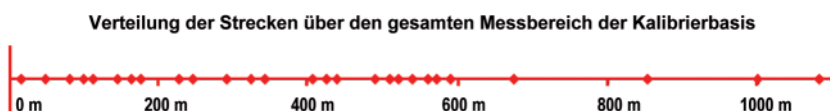


Abb. 2 | Verteilung aller messbaren Strecken

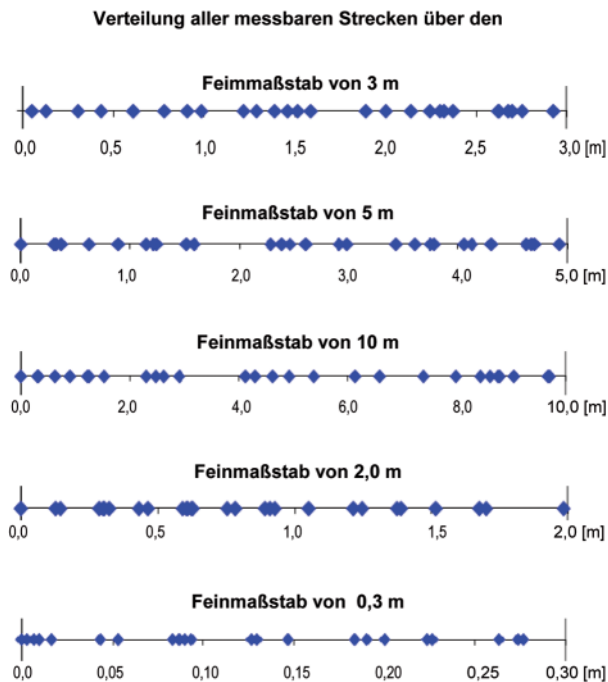


Abb. 3 | Verteilung der Strecken über verschiedene Feinmaßstäbe

platte verlangt. Jeder Messpfeiler wurde abschließend durch ein PVC-Rohr geschützt (Abb. 6). Der Spalt zwischen Betonpfeiler und dieser Ummantelung konnte genutzt werden, um zusätzliches Wärmedämmmaterial (Schüttmaterial aus aufgeschäumten Glasperlen der Fa. Poraver) einzubringen. Abgeschlossen wird der Pfeiler durch

eine spezielle Zentrierplatte aus V4A-Stahl mit einem Durchmesser von 42 cm, die sich durch eine universelle Adaption zu den in der Geodäsie üblichen Zentriereinrichtungen auszeichnet. Hierdurch wird erreicht, dass jedes geodätische Messgerät nahezu ohne Genauigkeitsverlust im Vergleich zu der zentriereigenen Genauigkeit auf dem Messpfeiler zentriert werden kann.

Zur genauen Absteckung der Pfeiler wurde ein präzises Höhen- und Lagenetz entlang der Basis und des Taxiways angelegt. Die Punkte sind so ausgewählt worden, dass gleichzeitig dadurch die Querachse eines jeden Pfeilers festgelegt wurde. Von dieser Achse aus konnte dann jeder Pfeiler mit der dem Bauabschnitt vorgegebenen Genauigkeit abgesteckt werden (Abb. 7). Nach Beendigung der Bauarbeiten wurde der Damm wieder auf die Planhöhe von ca. 551,5 m angeschüttet, und auf der Krone ein befestigter Kiesweg angelegt.

Es bleibt noch zu erwähnen, dass neben den 8 Pfeilern der Kalibrierbasis zwei weitere Pfeiler am westlichen Ende errichtet wurden, dessen Pfeilerkopfhöhe etwa 1,2 m über denen der Kalibrierbasis liegt (Abb. 8). Diese beiden Pfeiler haben direkten Stromanschluss und ermöglichen auch eine Rechnerverbindung zu einem nahe stehenden Mess-Container, so dass die Möglichkeit zum permanenten Betrieb einer GPS-Station oder meteorologischer Sensoren gegeben ist.

4 ABSCHLIESSENDE BEWERTUNG DER KALIBRIERBASIS

Alle baulichen Maßnahmen, beginnend mit dem Setzen der Bohrpfähle im Herbst 2007 bis zum Einbringen der Pfeilerplatten, wurden im August 2008 abgeschlossen. Um Effekte von Setzungen sowie

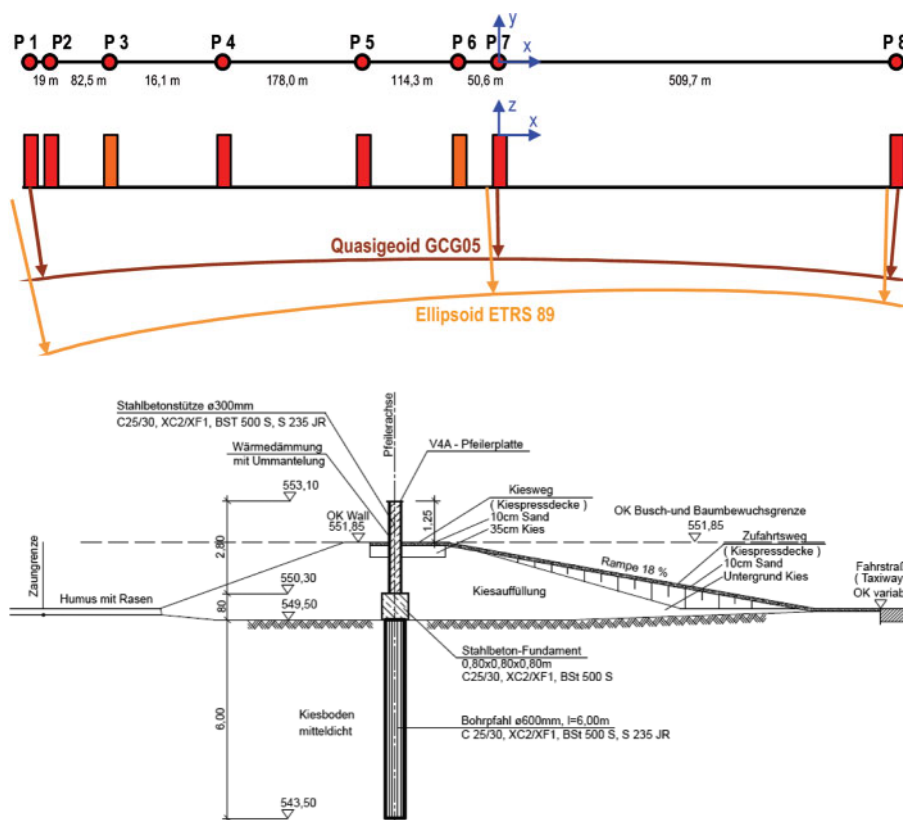


Abb. 4 | Bezugssystem der Kalibrierbasis

Abb. 5 | Systemschnitt eines Messpfeilers

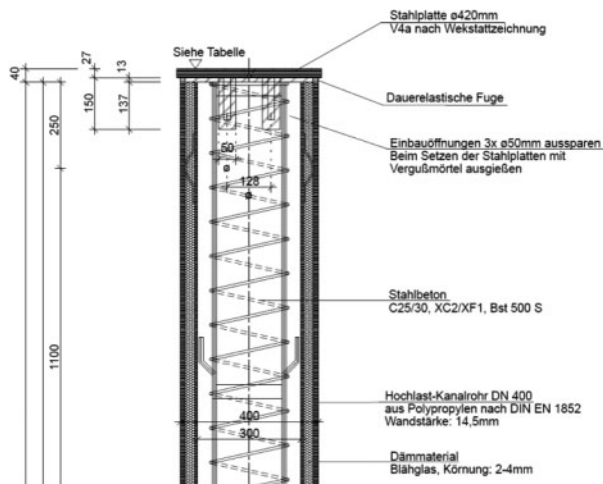


Abb. 6 | Pfeilerkopf mit Zentriereinrichtung

Kriechen und Schwinden des Betons bei weiteren Messungen weitgehend auszuschließen, entschloss man sich, die Basis ein Jahr ruhen zu lassen. Danach galten die ersten Messungen der Kontrolle,

ob die gesteckten Ziele bezüglich der geometrischen Anlage erreicht wurden. Durch Präzisionsnivellement und Alignment können folgende Messunsicherheiten angegeben werden:

Hz-Alignment	$u(Hz) = 3 \text{ mm}$
V-Alignment	$u(V) = 3 \text{ mm}$
Zentrierung	$u(Z) = 0,02 \text{ mm}$

Damit ist die geometrische Realisierung gemäß Entwurfsvorgaben im geforderten Genauigkeitsrahmen gut erreicht worden.

Im Rahmen weiterer Messungen (s. /Herrmann, Liebl, Neumann 2012/) wurden auch umfangreiche meteorologische Untersuchungen bezüglich der Temperaturverhältnisse entlang der Basis durchgeführt. Hierzu wurde ein „wireless“ Sensornetzwerk, bestehend aus 20 Sensoren, gleichmäßig über den gesamten Messbereich von 1100 m aufgebaut. Am 06.10.2009 konnten dann kontinuierlich die Temperatur- und Feuchtwerte dieser 20 Sensoren von morgens 07:00 bis nachts 23:00 Uhr aufgezeichnet werden. Ein Auszug der Ergebnisse ist in den Abb. 9 und 10 dargestellt /Herrmann, Liebl, Neumann 2012/. Als Resümee kann man entnehmen, dass insbesondere über den Bereich der Basis bis 590 m durchschnittlich nur mit einem Temperaturunterschied von $\Delta t \approx 1\text{-}2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ zu rechnen ist. Die höchste Stabilität der Luftfeuchte wird nachmittags gegen 15:00 Uhr



Abb. 7 | Absteckung der Pfeiler



Abb. 8 | Fertiggestellte Kalibrierbasis



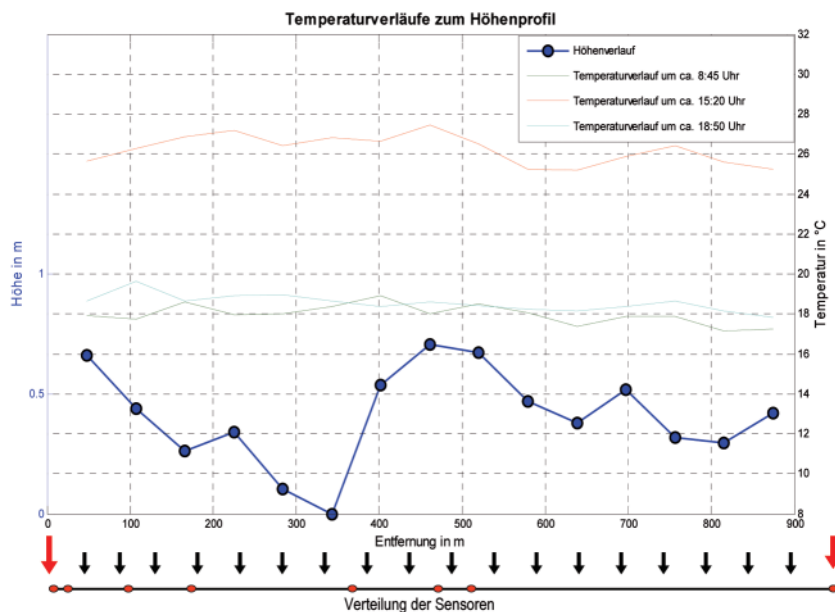


Abb. 9 | Temperaturverteilung entlang der Basis

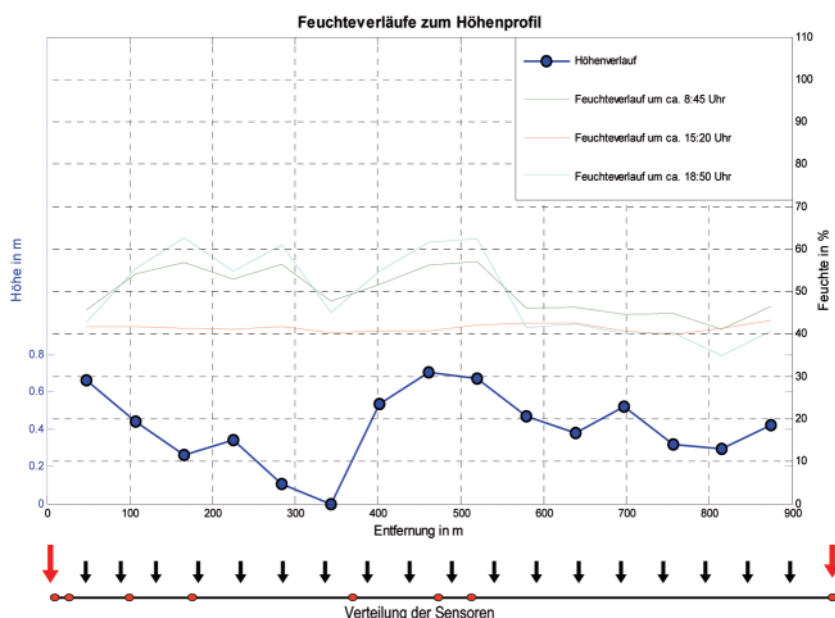


Abb. 10 | Verteilung der relativen Luftfeuchte entlang der Basis

erreicht. Für die Standardkalibrierung von EDM sind aber auch die sonstigen Abweichungen von $\pm 10\%$ in der relativen Luftfeuchte vernachlässigbar.

Obwohl dies nur *eine* Messreihe ist, kann davon ausgegangen werden, dass bei günstigeren Bedingungen wie z.B. vollständige Bewölkung eine sehr gute Homogenität in der Verteilung der meteorologischen Daten entlang der Basis erwartet werden kann.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zusammenfassend kann man sagen, dass das Anforderungsprofil, so wie es im Abschnitt 2.2 formuliert wurde, bis auf die Bestimmung der „Soll“-Messgrößen und die damit verbundene Rückführung, hervorragend erfüllt wurde. Diese verbleibende Aufgabe erfordert jedoch

einen hohen Messaufwand verbunden mit dem Einsatz auch unterschiedlicher, unabhängiger Messverfahren. Erste umfangreiche Messungen zur „Soll“-Strecken-Bestimmung wurden im Herbst 2009 von der UniBwM selbst durchgeführt. Sie sind in /Herrmann, Liebl, Neumann 2012/ ausführlich beschrieben. Hierbei wurden auch Übertragungsmessungen von der alten Prüfstrecke durchgeführt, um zur Rückführung eine erste Vergleichsmessung beizutragen. Des Weiteren hat der Verfasser in einer ersten Vorstellung der neuen *Kalibrierbasis UniBw München* am 20.06.2009 alle Mitglieder der GKGM zu einem Ringversuch eingeladen, mit dem Ziel, unter Einbringung aller instrumentellen Möglichkeiten zur hochpräzisen geodätischen Streckenmessung bestmögliche Messergebnisse zu liefern, wobei auch interferometrische Messverfahren zum Einsatz kommen sollten.

Hierbei standen folgende Fragen im Vordergrund:

- Können durch den Ringversuch die Anforderungen an eine „Soll“-Streckenbestimmung erreicht werden?
- Zeigt der Ringversuch Möglichkeiten zur Rückführung der Messgröße „Länge“ auf?
- Welche Genauigkeitsgrenzen werden durch die Unsicherheit bei der Bestimmung der meteorologischen Parameter gesetzt?

Diese Herausforderung haben dann nachfolgende Institutionen angenommen:

Institut für Geodäsie und Geoinformation (IGG) der Universität Bonn,
 Professur für Geodäsie,
 Geodätisches Institut (GIH) der Leibniz Universität Hannover,
 Institut für Geodäsie (IfG) der UniBw München,
 Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement der Technischen Universität München, Lehrstuhl für Geodäsie,
 Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) der Technischen Universität Graz,
 Geodätisches Institut (GIK) des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) sowie Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz.

Die Ergebnisse sind im Einzelnen in weiteren Beiträgen in den avn-Themenheften „Hochgenaue Messung langer Strecken“ veröffentlicht und in /Heunecke 2012/ zusammengefasst und kritisch bewertet.

Allen, die sich diesem anspruchsvollen und aufwendigen Experiment gestellt haben, sei an diese Stelle noch einmal ausdrücklich gedankt.

LITERATUR

Caspary, W. (1984): Die Genauigkeit der Mekometermessungen auf der Prüfstrecke Neubiberg. In: Caspary, W. und Heister, H.: Elektrooptische Distanzmessung, Beiträge zum Geodätischen Seminar am 23. September 1983. Schriftenreihe des Wissenschaftlichen Studiengangs Geodäsie, Hochschule der Bundeswehr München, 1984, 115-130.

Caspary, W.; Heister, H. (1983): Elektrooptische Distanzmessung, Beiträge zum Geodätischen Seminar am 23. September 1983. Schriftenreihe des Wissenschaftlichen Studiengangs Geodäsie, Hochschule der Bundeswehr München, 1984.

Eichhorn, G.; Kneißl, M. (1959): Ergebnisse der Interferenzmessungen 1958 mit dem 'Väisälä'-Komparator auf der Münchener Normalstrecke. Abhandlungen der mathem.-naturwissenschaftl. Klasse, Heft 98, München 1959.

Fuhlbrügge, H.-J. (2004): Zur Prüfung von GNSS-(Echtzeit)-Systemen als Beitrag zur Qualitätssicherung im Vermessungswesen. Mitteilungen aus den Geodätischen Instituten der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2004.

Heister, H. (2006): Systemprüfung von GPS-Empfangs-Systemen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 113(2006)5, 162-168.

Herrmann, Chr.; Liebl, W.; Neumann, I. (2012): Lasertrackermessungen des KIT Karlsruhe und der UniBw München. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 119(2012) 11/12.

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.

Joeckel, R.; Stober, M.; Huep, W. (2008): Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren. 5. Auflage, Wichmann, Heidelberg, 2008.

Rüeger, J.M. (1996): Electronic Distance Measurement. Fourth Edition, Springer, Berlin, 1996.

Schwendener, H.R. (1971): Elektronische Distanzmesser für kurze Strecken, Genauigkeitsfragen und Prüfverfahren. In: Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik 69(1971)3, 59-67.

Wanninger, L. (2002): Möglichkeiten und Grenzen der relativen GPS-Antennen-Kalibrierung. In: Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV) 127(2002)1, 51-58.

Prof. (i.R.) Dr.-Ing. habil. Hansbert Heister

**UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN
 INSTITUT FÜR GEODÄSIE**

Werner-Heisenberg-Weg 39 | 85577 Neubiberg
 h.heister@unibw-muenchen.de



Manuskript eingereicht: 16.03.2012 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet