

Epochenvergleiche von Präzisions-EDM-Messungen zur Untersuchung der Punktstabilität auf einer EDM-Basislinie

Rüdiger Lehmann, Antje Attrodt

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Fakultät Geoinformation

ZUSAMMENFASSUNG:

Auf der von der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden betriebene EDM-Basislinie im Großen Garten in Dresden werden regelmäßig die Sollstrecken überprüft. Die Ergebnisse deuten auf Punktbewegungen hin. Durch Vergleiche zweier Epochen wird versucht, solche Punktbewegungen statistisch nachzuweisen, sowohl mittels statistischer Hypothesentests, als auch mit einem Informationskriterium. Punktbewegungen von bis zu 0,25 mm/a wurden geschätzt. Über die Ursachen wird noch spekuliert.

ABSTRACT:

At the EDM baseline Großer Garten in Dresden, operated by the University of Applied Sciences Dresden, Faculty of Spatial Information, the true distances between marked points are regularly determined. The results indicate point displacements. By comparison of two epochs, it is tried to provide evidence of such displacements, both by hypothesis tests, as well as by an information criterion. Point displacements up to 0.25 mm/a are estimated. The causes are still speculated about.

1 Einführung

Die regelmäßige Überprüfung der verwendeten Messmittel sollte für jedes vermessungstechnische Unternehmen und jede Behörde selbstverständlich sein. Die Kalibrierung der Instrumente ist ein wesentlicher Baustein, die Qualität der Messerzeugnisse zu gewährleisten. Die Überprüfung elektronischer Distanzmesser (EDM) erfolgt hierbei in der Regel auf EDM-Basislinien (auch Kalibrier- oder Vergleichsstrecken genannt). Durch Messung der Strecken in allen Kombinationen zwischen mehreren in einer Flucht liegenden Punkten und dem Vergleich mit den Sollstrecken, können die individuellen Korrektionsparameter für das jeweilige Instrument abgeleitet werden. An die Sollstrecken werden dabei hohe Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit und Zuverlässigkeit gestellt. So sollten die Sollstrecken als übergeordnete Referenz die drei- bis zehnfache Genauigkeit des zu prüfenden Instrumentes aufweisen. Der zunehmende

Einsatz von EDM mit einer Streckenmessgenauigkeit von 1 mm und besser, verdeutlicht die hohen Ansprüche, die heutzutage an Vergleichsstrecken gestellt werden.

Eine wesentliche Grundlage, diesen Ansprüchen gerecht zu werden, ist die stabile Vermarkung der Messpunkte auf tiefgegründeten Pfeilern, um Bewegungen der Punkte und damit Änderungen in den Sollstrecken zu vermeiden. So wurden bei der Neuanlage der Kalibrierstrecke der UniBW München die Punkte auf 5-6 m tiefen Bohrpfeilern gegründet (Heister 2012).

Von ebenso großer Bedeutung ist die genaue und zuverlässige Bestimmung sowie regelmäßige Überprüfung der Sollstrecken. Bewährt hat sich hierbei die Messung der Sollstrecken mit dem Streckenmessgerät Mekometer ME5000 (Wasmeier 2012; Neuner und Pfaffenholz 2012). Da dieses Instrument jedoch schon seit Längerem nicht mehr hergestellt wird, wurden in jüngerer Zeit alternative Verfahren, zum Beispiel durch den Einsatz mobiler Lasertracker, erfolgreich getestet (Eschelbach u.a. 2015).

2 EDM-Basislinie Herkulesallee im Großen Garten von Dresden

Die von der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden betriebene EDM-Basislinie ist die einzige verbliebene Kalibrierstrecke in Sachsen. Sie wurde bereits 1980 angelegt und befindet sich auf der Herkulesallee im Großen Garten in Dresden. Von der ursprünglich 1880 m langen Strecke mit insgesamt 15 Punkten werden aktuell noch 8 Punkte auf einer Länge von 552 m für die EDM-Kalibrierung verwendet.



Abb. 1: Sichtbarer Teil der Vermarkung der Messpunkte

Aufgrund des denkmalschutzrechtlichen Status des Großen Gartens konnten die Punkte nicht wie üblich auf tiefgegründeten Pfeilern, sondern lediglich mit 1 m langen unterirdischen Pfeilern sowie einer darin eingelassenen Messingpinne vermarktet werden. Die bodengleiche Vermarkung hat zur Folge, dass bei der Kalibrierung die Punkte mittels Stativen signalisiert werden

müssen. Die daraus resultierenden unvermeidbaren Zentrierabweichungen können jedoch mittels eines speziellen Auswerteverfahrens gut abgeschätzt und bei der Auswertung entsprechend berücksichtigt werden (Lehmann 2000).

3 Sollstreckenbestimmungen

Seit Bestehen der EDM-Basislinie wurden in unregelmäßigen Abständen 11 Sollstreckenbestimmungen vorgenommen (Lehmann 2005). In den Jahren 1980, 1982 und 1986 wurde noch mechanisch mit Invardrähten gemessen. Von 1991 bis 2005 wurden alle zwei Jahre (außer 1995) und danach erst wieder im Jahr 2015 Sollstreckenbestimmungen mit dem Mekometer ME5000 der ehem. Fa. Kern vorgenommen. Dieser Präzisionsdistanzmesser erlaubt Messungen mit einer Genauigkeit (im Sinne der Standardabweichung einer atmosphärisch korrigierten Einzelmessung) von ca. $0,2 \text{ mm} + 0,2 \text{ ppm}$ (Meier und Loser 1986). Ganzoni und Köchle (1991) erreichen einschließlich Zentrierabweichung im Nahbereich sogar eine Standardabweichung von $0,05 \text{ mm}$.

Die Messungen im Großen Garten erfolgten unter Zwangszentrierung in allen Kombinationen. Jedoch wurden in den letzten Jahren entsprechend des Einsatzbereiches von EDM in der Vermessung nur noch die Punkte bis lfd. Meter 552 gemessen.

Die EDM-Basislinie kann als geodätisches Netz in einer Dimension angesehen werden. Weil bei der Koordinatenberechnung keine Anschlusspunkte zur Verfügung stehen, wurden die 1D-Netze frei mit Gesamtpurminimierung ausgeglichen. Dabei ergaben sich erwartungsgemäß Standardabweichungen für die ausgeglichenen Teilstrecken von kleiner als $0,2 \text{ mm}$. Bei der letzten Messung im Jahr 2015 wurde eine Standardabweichungen von $0,08 \text{ mm}$ erhalten. Die extreme studentisierte Verbesserung betrug $2,1$. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% kann daher von einem Ergebnis frei von groben Fehlern ausgegangen werden (kritischer Wert $2,5$). Die Auswertung erfolgte mit der geodätischen Cloud-Computing-Software IN DUBIO PRO GEO (www.in-dubio-pro-geo.de).



Abb. 2: Mekometer ME5000 (ehem. Fa. Kern)

4 Sollstreckenänderungen

Unübersehbar treten deutliche Veränderungen der erhaltenen ausgeglichenen Teilstreckenlängen auf. In Abb. 3 finden Sie die Änderungen der 120m- und der 552m-Teilstrecke. Diese betragen $-0,2 \dots -0,1$ mm/Jahr. Diese jährlichen Verkürzungen liegen zwar im Bereich der Messgenauigkeit, jedoch kann aufgrund ihrer zeitlichen Konstanz eine Punktbeziehung nicht ausgeschlossen werden.

Im Übrigen haben sich alle ausgeglichenen Teilstrecken tendenziell verkürzt, was aber allein durch die Bewegung des Nullpunktes erklärbar sein könnte. Für welchen Punkt eine Bewegung anzunehmen ist und in welcher Größe, muss mit einer geodätischen Deformationsanalyse geklärt werden.

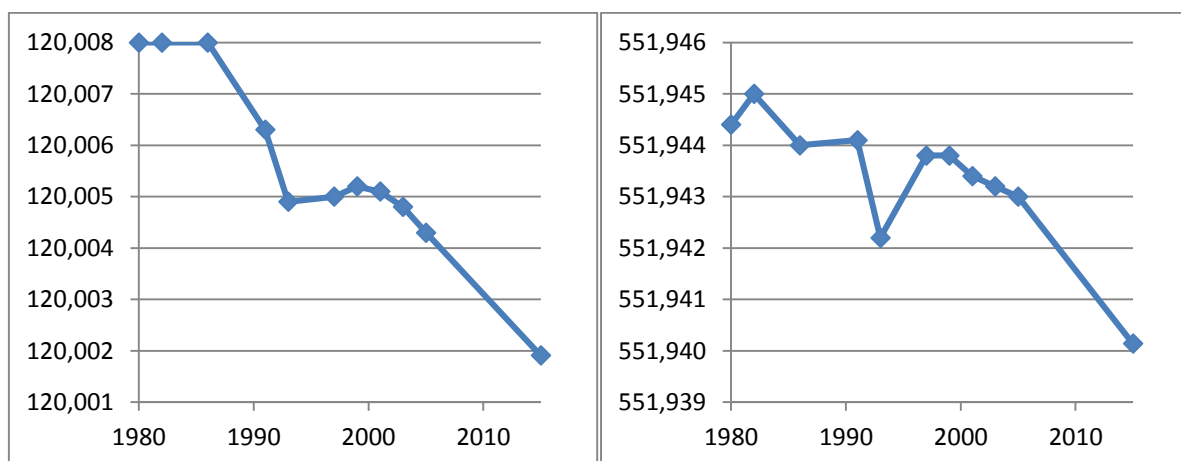


Abb. 3: Änderung der ausgeglichenen Länge zweier ausgewählter Teilstrecken (120m und 552m)

5 Epochenvergleich – einfacher Likelihood-Quotiententest

Das moderne Verständnis der Geodäsie erfordert

- 1) eine adäquate Problemformulierung und Modellbildung und
- 2) eine rechnerisch präzise und numerisch effiziente Problemlösung.

Für die geodätische Deformationsanalyse finden wir dieses Verständnis am besten durch Velsink (2015) zum Ausdruck gebracht. Die Grundlage ist eine Verbindungsausgleichung (connection adjustment) der Epochen, in der die Transformationsparameter der Epochenreferenzsysteme als Parameter enthalten sind und schließlich auf Signifikanz getestet werden. Das können beliebig viele Epochen sein. Wir greifen hier auf die Messwerte zweier Epochen zurück, nämlich 2003 und 2015, und dabei nur auf die 8 Punkte, die in beiden Epochen gemessen wurden.

Im Fall der EDM-Basislinie, in dem wir jedem Punkt einen Verschiebungsparameter (hier schlicht Koordinatendifferenz) zuordnen, ist die Verbindungsausgleichung nichts weiter als ein gewöhnlicher Lagepunktvergleich. Die Statistik des herkömmlichen Likelihood-Quotiententests lautet

$$T = d^T (\Sigma_1 + \Sigma_2)^+ d \quad (1)$$

mit dem Koordinatendifferenzvektor d (vgl. Tabelle 1) und den Kovarianzmatrizen Σ_1, Σ_2 der Epochenausgleichungen. Weil ein Datumdefekt vorliegt (freie Netze, s.o.), muss die Inverse als Pseudoinverse berechnet werden. Der Hypothesentest

$$\begin{aligned} H_0: d &= 0 \\ H_A: d &\neq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

führt auf folgende Testverteilung:

$$T|H_0 \sim \chi^2(7) \quad (3)$$

Beachten Sie, dass wegen des Datumdefekts ein Freiheitsgrad weniger vorliegt.

Für die Epochen 2003 und 2015 ergibt sich $T=1281$. Der kritische Wert für diesen Test für die Irrtumswahrscheinlichkeit 5% beträgt 14 und wird damit deutlich übertroffen. Die Nullhypothese H_0 ist somit abzulehnen: Es sind Punktbewegungen anzunehmen.

Tab. 1: Koordinatendifferenzen 2015-2003

lfd. Meter	0	24	48	120	144	336	360	552
d [mm]	2,7	0,8	-1,7	-0,3	1,0	-1,4	-0,9	-0,3

6 Epochenvergleich – multipler Likelihood-Quotiententests

Im nächsten Schritt soll gefragt werden, welche Punkte sich bewegt haben können. Der Hypothesentest lautet nun

$$H_0: d = 0 \quad (4)$$

$$H_{A1}: d_1 \neq 0, d_2 = 0, \dots, d_8 = 0$$

$$H_{A2}: d_1 = 0, d_2 \neq 0, d_3 = 0, \dots, d_8 = 0$$

$$\vdots$$

$$H_{A8}: d_1 = 0, \dots, d_7 = 0, d_8 \neq 0$$

$$H_{A9}: d_1 \neq 0, d_2 \neq 0, d_3 = 0, \dots, d_8 = 0$$

$$\vdots$$

$$H_{A254}: d_1 \neq 0, \dots, d_7 \neq 0, d_8 = 0$$

Der Nullhypothese H_0 stehen $2^8-2=254$ Alternativhypothesen H_{Ai} gegenüber. (Die Alternativhypothese $H_{A255}: d_1 \neq 0, \dots, d_8 \neq 0$ kann nicht getestet werden, weil eine gleichmäßige Verschiebung aller Punkte in den Messwerten nicht erkennbar ist.) Wir haben es mit einem multiplen Test zu tun. Die 254 Statistiken des multiplen Likelihood-Quotiententests lauten

$$T_i = d_i^T (\Sigma_{i1} + \Sigma_{i2})^+ d_i \quad (5)$$

wobei in jedem Vektor d_i nur die Elemente von d enthalten sind, die in dieser Alternativhypothese H_{Ai} auf nicht-null getestet werden. Entsprechend sind Σ_{i1}, Σ_{i2} die zugehörigen Kovarianzmatrizen.

Es gilt wiederum

$$T_i | H_0 \sim \chi^2(k) \quad (6)$$

wobei k die Anzahl der Elemente von d_i ist. (Alle Kovarianzmatrizen Σ_{i1}, Σ_{i2} sind nun regulär.)

Es stellt sich heraus, dass außer bei H_{A4} und H_{A8} fast alle Teststatistiken T_i weit über ihrem bei vernünftiger Irrtumswahrscheinlichkeit anzunehmendem kritischen Wert liegen, so dass keine der restlichen Alternativhypothesen favorisiert werden kann. Die p-Wert-Methode von Lehmann und Lösler (2016) stößt auf das Problem, dass der p-Wert für fast alle Teststatistiken numerisch gleich Null ist (arithmetischer Unterlauf). Der Test ist auf diese Weise unentscheidbar.

Das Problem besteht darin, dass immer nur H_0 gegen H_{Ai} getestet wird und nicht H_{Ai} gegen H_{Aj} , was im Konzept des klassischen Hypothesentests nicht möglich ist, denn die Verteilung von $T_i | H_{Ai}$ ist nicht vollständig bekannt. Deshalb schlagen wir eine andere Methode vor, die schon verschiedentlich erfolgreich zur Lösung geodätischer Entscheidungsprobleme eingesetzt wurde, z.B. durch Lehmann und Lösler (2016).

7 Epochenvergleich – Informationskriterium von Akaike

Das Problem der Identifikation von Punktbewegungen kann als Problem der Modellidentifikation, heute oft auch Modellselektion genannt, begriffen werden. Als Entscheidungskriterium in der Modellselektion dient seit Jahrzehnten vielerorts ein sogenanntes Informationskriterium, allerdings bisher noch nicht so häufig in der Geodäsie. Wir konzentrieren uns hier auf das Informationskriterium von Akaike (1974), korrigierte Version:

$$AICc = 2k - 2 \log(L) + \frac{2k(k+1)}{n-k-1} \quad (7)$$

n ist die Anzahl der Beobachtungen, k ist die Anzahl der Modellparameter, zuzüglich möglicher zu schätzender Varianzkomponenten und abzüglich möglicher Bedingungsgleichungen für Parameter, und L ist das Maximum der Modell-Likelihood-Funktion. Die Vorgehensweise ist denkbar einfach: Man berechnet für jedes Modell den zugehörigen AICc-Wert nach der oben angegebenen Formel und wählt das Modell mit dem kleinsten AICc-Wert aus, sollte dieses Minimum eindeutig sein.

Wir haben 256 Modelle zur Auswahl, jeweils mit anderen als bewegt angenommenen Punkten. Die Anzahl der Modellparameter k variiert von $8-1=7$ (kein Punkt bewegte sich) bis zu $2 \cdot 8-2=14$ (alle Punkte bewegten sich). Der Fall „alle Punkte bewegten sich“ ist im Konzept des AICc nun auch genauso leicht zu behandeln. Es ist das einzige Modell mit Rangdefekt 2, was durch zwei Bedingungsgleichungen regularisiert wird.

Im Ergebnis erhält man den kleinsten AICc-Wert für das Modell, in dem sich der Punkt 120 und der Punkt 552 nicht bewegt haben, aber alle anderen. Jedoch haben andere Modelle, insbesondere jenes, bei dem sich alle Punkte bewegt haben, kaum größere AICc-Werte. Deshalb sind letzte Zweifel dahingehend, ob überhaupt Punkte als stabil angesehen werden können, berechtigt.

Tab. 2: Geschätzte Verschiebungen 2003 → 2015 für das nach dem AICc-Kriterium selektierte Modell.

lfd. Meter	0	24	48	120	144	336	360	552
Verschiebung [mm]	3,0	1,0	-1,4	stabil	1,3	-1,1	-0,6	stabil

8 Schlussfolgerungen

Durch den zunehmenden Einsatz hochgenauer EDM sowie der Notwendigkeit, diese regelmäßig zu überprüfen, sind die Ansprüche an EDM-Basislinien hinsichtlich der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Sollstrecken gestiegen.

Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, sollten die Sollstrecken der EDM-Basislinie der HTW Dresden regelmäßig, möglichst jährlich, überprüft werden, damit der Einfluss der Punktbewegungen auf die Sollstrecken möglichst gering gehalten wird. Außerdem ist darüber nachzudenken, ob die Vergleichsstrecke in ihrer jetzigen Form überhaupt noch den gestiegenen An-

sprüchen genügen kann, oder ob es nicht besser wäre, eine neue EDM-Basislinie mit einer stabilen Pfeilervermarkung zu errichten. Hier sind die behördlichen Vermessungsinstitutionen gefordert.

Durch einen Vergleich zweier 12 Jahre auseinander liegender Messepochen konnte nachgewiesen werden, dass sich die Mehrzahl der Punkte auf der EDM-Basislinie im Dresdner Großen Garten nachweisbar bewegt hat, wenn nicht gar alle. Punktbewegungen von bis zu 0,25 mm/a wurden geschätzt. Die Modellselektion mit einem Informationskriterium, hier AICc, ist in der Geodäsie noch eine relativ unbekannt, aber einfache und erfolgreich anwendbare Methode der Lösung von Entscheidungsproblemen.

Die wichtigste Frage, die sich anschließt, welche geologischen Ursachen die nachgewiesenen relativen Punktbewegungen haben, müssen wir leider offen lassen, da bisher keine Fachperson gefunden wurde, die eine Aussage dazu treffen wollte. Immerhin sind die Bewegungen sehr gering und nur durch den besonderen Aufwand überhaupt nachweisbar. Es könnte sein, dass es sich um Bewegungen handelt, die allerorten auftreten und nicht geologisch bemerkenswert sind, z.B. durch Grundwasserströmungen. Dagegen spricht jedoch, dass auf anderen EDM-Basislinien, die ähnlich gründlich untersucht wurden, solche Phänomene nach Aussagen kontaktierter Betreiber nicht gefunden wurden. Andererseits sind heute auf fast allen EDM-Basislinien die Punkte durch tief gegründete Messpfeiler realisiert, die gegenüber der leichten Vermarkung, wie sie im Großen Garten immer noch anzutreffen ist, stabiler sind.

LITERATUR

Akaike H.: A new look at the statistical model identification/ IEEE Trans. Autom. Control, Volume AC-19, p. 716-723, 1974

Eschelbach C., Heckmann B., Lösler M.: Hochgenaue Sollstreckenbestimmung mit einem mobilen Lasertracker an der Kalibrierbasis Neu-Isenburg/ Allgemeine Vermessungsnachrichten (avn), 122 (2015) 3, 95 – 101, 2015

Ganzoni R., Köchle R.: Das Mekometer ME5000 von Kern als hochpräziser Kurzstanzmesser/ Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie: Bericht 186, 1991

Heister H.: Die neue Kalibrierbasis der UniBw München/ Allgemeine Vermessungsnachrichten (avn), 119 (2012) 10, 336 – 343, 2012

Lehmann R.: Ein erweitertes Auswertemodell für die Kalibrierung elektronischer Distanzmesser auf Vergleichsstrecken/ Vermessungswesen und Raumordnung, 62, 263-269, 2000

Lehmann R.: Geokinematik vs. Qualitätskontrolle auf EDM-Basislinien/ A. Sroka, R. Wittenburg (Hrsg.): 6. Geokinematischer Tag. Verlag Glückauf GmbH Essen, 2005

Lehmann R., Lösler M.: Multiple outlier detection: hypothesis tests versus model selection by information criteria/ Journal of Surveying Engineering. DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000189, 2016

Meier D., Loser R.: The Mekometer ME 5000 - A new precision distance meter/ Allgemeine Vermessungsnachrichten (avn) 5/1986, 1986

Neuner H., Paffenholz J.A.: Bestimmung der Kalibrierbasis der UniBw München mit dem Mekometer ME5000 – Beitrag des Geodätischen Institutes der LU Hannover/ Allgemeine Vermessungsnachrichten (avn), 119 (2012) 10, 344 – 346, 2012

Velsink H.: On the deformation analysis of point fields/ Journal of Geodesy, Volume 89, Issue 11, pp 1071-1087, 2015

Wasmeier P.: Bestimmung der Kalibrierbasis der UniBw München - Messungen mit dem Mekometer ME5000 des Lehrstuhls für Geodäsie der Technischen Universität München/ Allgemeine Vermessungsnachrichten (avn), 119 (2012) 8/9, 305 – 308, 2012