

Geokinematik vs. Qualitätskontrolle auf EDM-Basislinien

Rüdiger Lehmann

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), Fachbereich
Vermessungswesen/Kartographie

ZUSAMMENFASSUNG :

Auf der EDM-Basislinie im Großen Garten Dresden werden seit 23 Jahren regelmäßig Sollstreckenbestimmungen durchgeführt. Ein Vergleich der 9 vorliegenden Messepochen deutet auf geringe zeitliche Änderungen von Sollstrecken hin. Ursachen für diese Änderungen werden diskutiert. Anhand eines Modells werden Restabweichungen des Maßstabs und Bewegungen von Punkten berechnet. Die Ergebnisse lassen statistisch hoch signifikante relative Punktbewegungen, jedoch kaum Maßstabsprobleme erkennen. Es werden Geschwindigkeiten von bis zu 0,5 mm/a erhalten. Die Ursachen sind nicht vollständig geklärt.

ABSTRACT:

At the EDM baseline Großer Garten Dresden we were doing determinations of distances between marked points since 1980. A comparison of 9 available measurement epochs indicates small temporal changes in the distances obtained. Reasons for changes are discussed. Based on a model we compute deviations of scale and movements of points. The results show statistically significant relative movements of points, but only minor scale problems. We obtain velocities up to 0.5 mm/a. The reasons are still partly open.

1 EDM-Kalibrierung auf Basislinien

Unter Kalibrieren versteht man das Bestimmen der Abweichung des Anzeigewerts eines Messgerätes vom tatsächlichen Wert der Messgröße (vgl. DIN 1319 Teil 1). Elektronische Distanzmesser (EDM) sind regelmäßig zu kalibrieren, um die hohe Qualität der Messungen, die mit modernen EDM möglich sind, zu sichern. Seit kurzer Zeit jedoch wird die Notwendigkeit der regelmäßigen Kalibrierung unter Fachleuten etwas unterschätzt. Das könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Technik der EDM, selbst die der reflektorlosen EDM, mittlerweile als sehr ausgereift und zuverlässig gilt. Dem muss zunächst entgegengehalten werden, dass die hohen Genauigkeitsangaben der Hersteller nur für sorgsam und korrekt kalibrierte EDM gültig und anzuwenden sind. Außerdem birgt ein hochkomplexer technischer Vorgang wie die heutige elektronische Distanzmessung sogar zunehmend die Gefahr von unbemerkten Fehlfunktionen oder Fehlbedienungen in sich. Wir glauben also, dass eine jährliche Kalibrierung von EDM weiterhin sinnvoll und notwendig ist.

Während die zuständigen Landesbehörden in einigen Bundesländern die regelmäßigen Kalibrierung von EDM durch in der Katastervermessung tätige Vermessungsbüros nicht mehr kontrollieren (z.B. Sachsen), werden in anderen Bundesländern mit öffentlichen Mitteln neue Kalibrier-Einrichtungen geschaffen (z.B. Berlin, siehe Senatsverwaltung für Stadtentwicklung 2004).

Der routinemäßige Prozess der EDM-Kalibrierung gliedert sich in eine Laborkalibrierung, bei der insbesondere der von einer Quarzschwingung abgeleitete Gerätemaßstab bestimmt wird, und in die Messung auf einer EDM-Basislinie (auch Kalibrier- oder Vergleichsstrecke genannt). Diese hat typischerweise eine Länge von ca. 500 m und besteht aus mindestens 7 Punkten, die in einer Flucht fest vermarktet sind. Durch Ausmessung der Abstände dieser Punkte in allen Kombinationen und Vergleich mit Sollwerten für diese Abstände ist es möglich, individuelle Korrekturen für das EDM abzuleiten und die Genauigkeit einer mit diesen Korrekturen zu berechnenden Distanz zu schätzen. Das Beispiel in Abbildung 1 liefert eine Additionskorrektur von $-0,2$ mm und eine Maßstabskorrektur von $-2,4 \cdot 10^{-6} = -2,4 \text{ ppm}^1$ (ggf. zusätzlich zur Frequenzkorrektur).

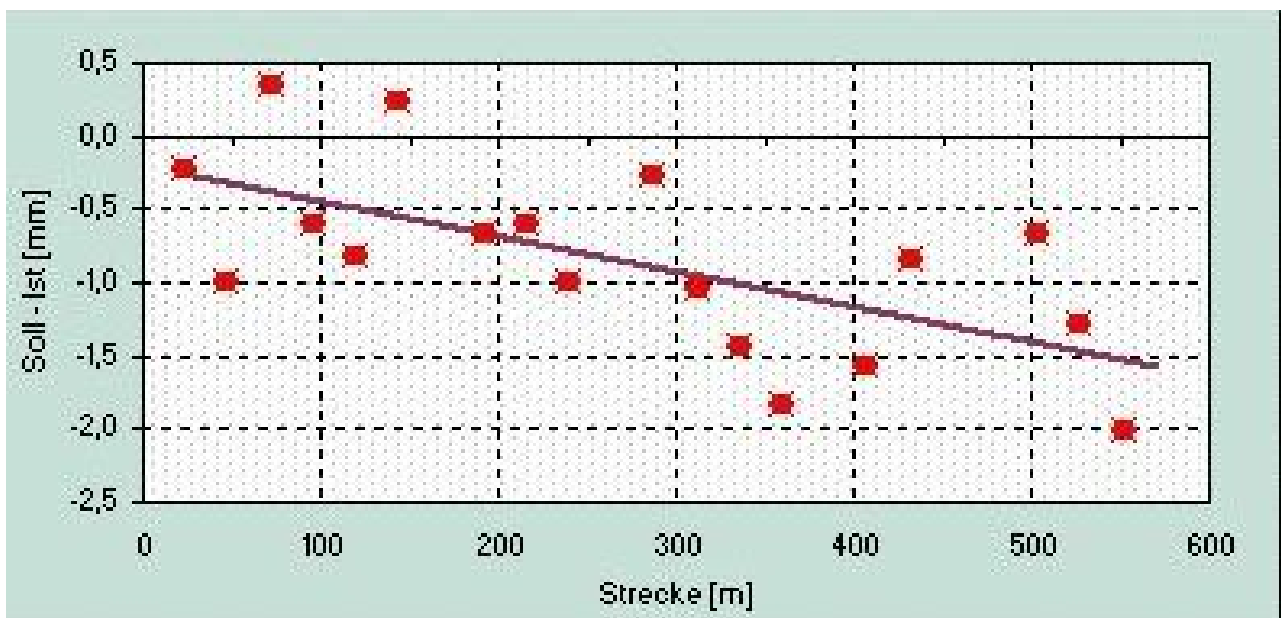


Abb.1 : Soll-Ist-Vergleich für ein typisches EDM mit ausgleichender Gerade, gemessen auf der Vergleichsstrecke Dresden

¹ ppm = parts per million

2 EDM-Basislinie Herkulesallee im Großen Garten von Dresden

Seit 25 Jahren werden im Großen Garten von Dresden Messungen zur EDM-Kalibrierung durchgeführt. Dazu wurden über eine Gesamtlänge von ca. 1880 m 15 Punkte auf der Mittelachse der Herkulesallee dauerhaft vermarktet (Abb. 2), und zwar in Form von Messingmarken mit Polygonkasten (Abb. 3). Es wurden bei EDM-Kalibrierungen allerdings nie alle 15 Punkte gleichzeitig genutzt, da der Aufwand zu groß gewesen wäre. Bis 1999 wurde die Gesamtlänge der Strecke genutzt, seither nur noch eine Länge von 552 m, da dies dem aktuellen Einsatzprofil von EDM im Vermessungswesen besser gerecht wird.

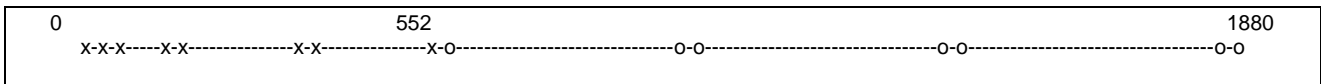


Abb.2 : Punktverteilung auf der EDM-Basislinie Dresden (x = heute noch genutzter Punkt)



Abb.3 : Polygonkasten mit Messingmarke

Üblicherweise sind Punkte auf EDM-Basislinien durch tief gegründete Messpfeiler realisiert. Diese wurden im Großen Garten aus Landschaftsschutzgründen jedoch nie eingerichtet, und ein anderes passendes Gelände stand nicht zur Verfügung. Gelder standen ebenfalls nie zur Verfügung, da das Land Sachsen in Leipzig eine Pfeilerstrecke betrieb, diese ist aber seit Jahren unbenutzbar. So ist die EDM-Basislinie Dresden z.Z. die einzige derartige Strecke in Sachsen. Sie wird durch die Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH) betrieben.

Die Notwendigkeit, auf Stativen über Bodenpunkten zu zentrieren, verursacht gewisse Probleme bei der Kalibrierung, denn es können Zentrierabweichungen auftreten. Durch ein besonderes Auswerteverfahren wurde dem allerdings Rechnung getragen (Lehmann 1999). Nach unseren Erfahrungen erreichen Zentrierabweichungen mit gewöhnlichen Tachymeterstativen höchstens Beträge von 0,5 mm.

3 Sollstreckenbestimmung – Ergebnisse aus neun Messepochen

Die Bestimmung der Sollwerte für die Abstände der vermarkten Punkte (Sollstrecken) erfolgte nach Fertigstellung der Strecke im Jahre 1980 durch mechanische Distanzmessung mit Invardrähten. Die erhaltenen Standardabweichungen wurden mit Werten von 0,3 mm für die kürzeste Teilstrecke (24 m) bis 2,8 mm für die längste Teilstrecke (1880 m) angegeben. Wiederholungsmessungen in den Jahren 1982 und 1986 ergaben etwas bessere Genauigkeiten mit Standardabweichungen unter 2 mm auch für die langen Teilstrecken (Nitsche, pers. Komm.).

Seit 1991 wurden alle zwei Jahre (außer 1995) Sollstreckenbestimmungen mit Mekometer ME5000 der ehem. Fa. Kern vorgenommen. Dieser elektronische Präzisionsdistanzmesser erlaubt Distanzmessungen mit einer Genauigkeit (im Sinne der Standardabweichung einer atmosphärisch korrigierten Einzelmessung) von ca. 0,2 mm + 0,2 ppm (Meier und Loser 1986, Copeland- Davis 1990). Die Messung erfolgte unter Zwangszentrierung in allen Kombinationen. Bei der Ausgleichung nach kleinsten Quadraten ergaben sich erwartungsgemäß Standardabweichungen für die ausgeglichenen Teilstrecken im Bereich von 0,1 bis 0,2 mm.



Abb.4 : Mekometer ME 5000 der ehem. Fa. Kern zur Sollstreckenbestimmung auf der EDM-Basislinie Berlin-Adlershof (aus Senatsverwaltung für Stadtentwicklung 2004)

Vergleicht man jedoch die Längen der ausgeglichenen Teilstrecken, so werden Änderungen von mehreren Millimetern deutlich. Die Gesamtstreckenlänge ergab z.B. im Jahre 1999 einen um 9 mm geringeren Wert als 1980. Dieses Phänomen soll zunächst näher untersucht werden.

Es handelt sich bei der EDM-Basislinie um ein eindimensionales freies Streckennetz. Der Beobachtungsplan wurde aber von Epoche zu Epoche mehrmals geändert, so dass die Ergebnisse nicht sofort vergleichbar sind. Insbesondere ist keine einfache Schwerpunktttransformation möglich, da teilweise andere Punkte besetzt wurden. Nach vollständiger Berücksichtigung dieser Sachverhalte, die hier nicht näher ausgeführt werden kann, ergibt sich folgendes Bild:

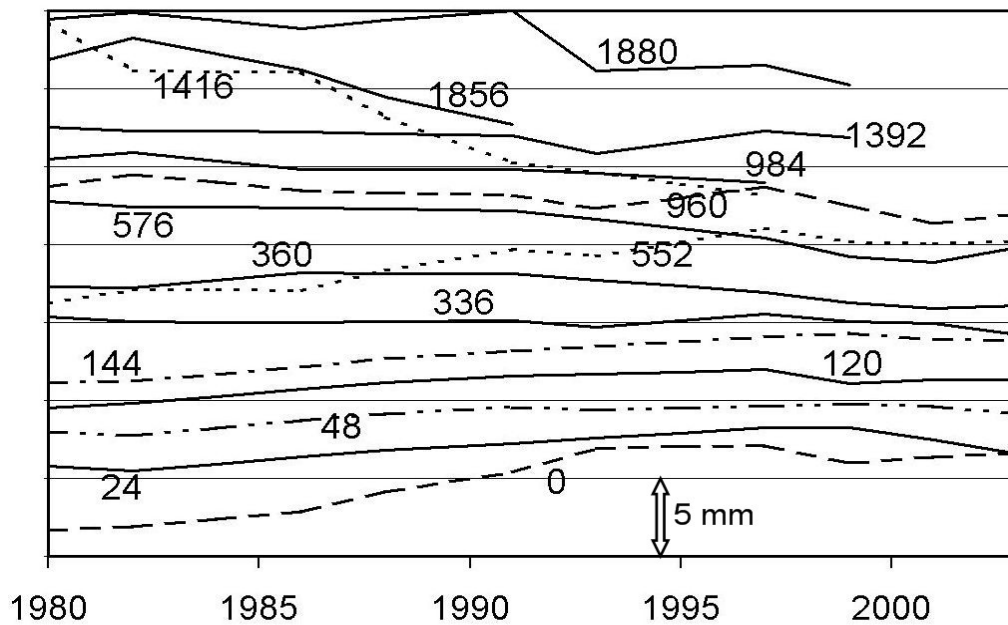


Abb.5 : Änderungen der 1D-Punktkoordinaten nach Datumstransformation bezogen auf das jeweilige Epochenmittel. Die Kurven sind bezeichnet mit lfd. Metern vom Anfangspunkt.

Man erkennt in Abb. 5 deutlich systematische Änderungen der Punktkoordinaten. Offenbar liegt im Wesentlichen eine Konvergenz der Punkte, d.h. eine tendenzielle Verkürzung der Sollstrecken vor. Es soll im Weiteren darum gehen, deren Ursachen zu erforschen.

4 Ursachen von Sollstreckenänderungen

Folgendes kann für die Änderungen von 1D-Punktkoordinaten nach Abb. 5 verantwortlich sein:

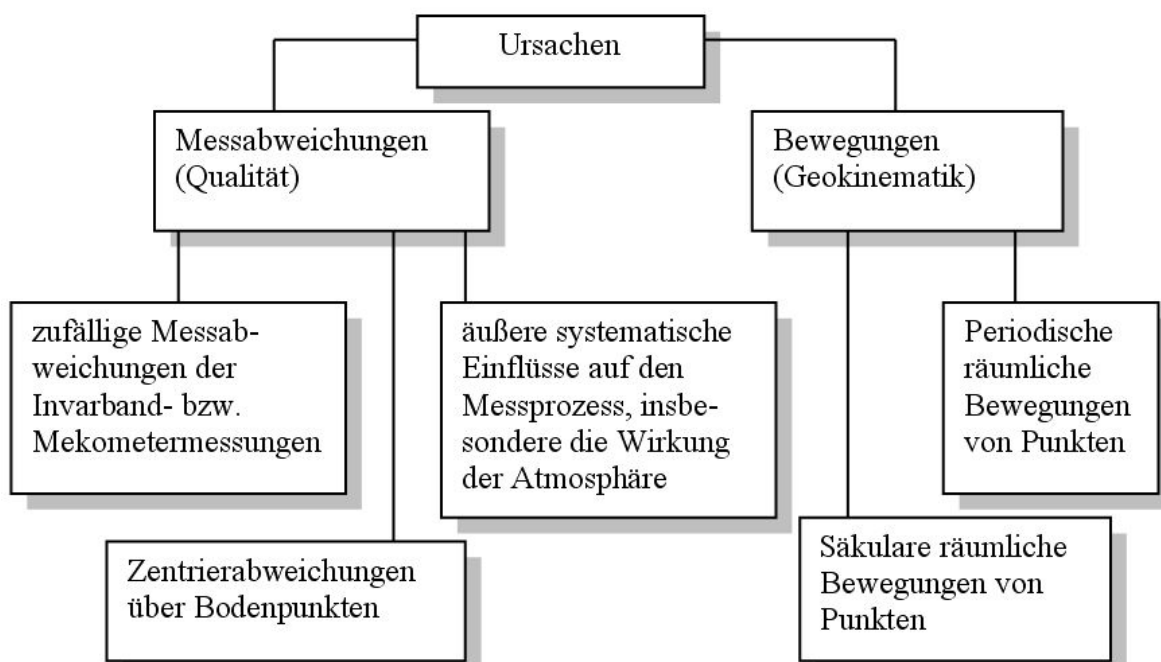


Abb.6 : Mögliche Ursachen für Sollstreckenänderungen

Es ist auch für die Kalibrierung von Belang, welche Ursachen für die Änderungen verantwortlich sind. Handelt es sich allein um Messabweichungen, so ist für die weitere Verwendung als Sollstrecken ein Mittelwert der Epochen zu bilden. Liegen nur Bewegungen vor, so sollte nur die letzte Epoche weiter verwendet werden. Tritt beides auf, so müsste ein gefiltertes Bewegungsmodell aufgestellt werden.

Welche Möglichkeiten bestehen, um zu unterscheiden, welche Ursachen für die vorliegenden Änderungen tatsächlich verantwortlich sind? Um zwischen Bewegungen und zufälligen Messabweichungen zu unterscheiden, kennt die Geodäsie das Werkzeug des Kongruenztests (vgl. Niemeier 2002). Hierbei wird die Nullhypothese „Kongruenz der Netze“ statistisch getestet. Es ist jedoch klar, dass bei inneren Genauigkeiten der Mekometer-Epochen von 0,2 mm und besser und Punktänderungen von bis zu 1 mm zwischen aufeinanderfolgenden Epochen ein solcher Test bei entsprechender Irrtumswahrscheinlichkeit das Ergebnis „nicht kongruent“ liefern würde. Für diesen Test wirken jedoch Zentrierabweichungen wie Bewegungen, da in Zwangszentrierung gemessen wurde, weshalb ein solcher Test nicht zielführend ist.

5 Geokinematik vs. Qualitätskontrolle

Immerhin kann aber versucht werden, säkulare Bewegungen von Zentrierabweichungen und sonstigen (z.B. periodischen) Bewegungen zu unterscheiden. Erstere würden als linearer Trend in den Punktänderungen sichtbar werden. Dazu stellen wir folgendes Modell auf:

$$l_{ij} + v_{ij} = [(x_i - x_0) + (v_i - v_0) \cdot \Delta t_j] (1 + \mu_j), \quad i=1 \dots 15, j=1 \dots 9$$

l_{ij} : Abstand des Streckenpunktes P_i vom Anfangspunkt P_0 zur Epoche j

v_{ij} : Verbesserung von l_{ij}

x_i : 1D-Koordinate des Streckenpunktes P_i zur Anfangsepoche 1980

μ_j : systematische Restabweichung des Maßstabes zur Epoche j
(durch unkorrigierte atmosphärische Resteinflüsse)

v_i : Geschwindigkeit des Streckenpunktes P_i

Δt_j : Zeitdifferenz zur Anfangsepoche 1980

Verbesserungen im Sinne dieses Modells sind also verursacht durch Zentrierabweichungen, zufällige Messabweichungen und nicht säkulare (z.B. periodische) Punktbewegungen.

Es wurden nicht in allen Messepochen alle Punkte bestimmt, sondern es liegen nur 105 Messwerte l_{ij} vor. In diesem Modell sind als Unbekannte zu bestimmen: 15 Koordinaten x_i und Geschwindigkeiten v_i sowie 9 Restabweichung des Maßstabes μ_j .

In der linearisierten Form lauten die Verbesserungsgleichungen

$$l_{ij} - X_i + v_{ij} = \delta x_i - \delta x_0 + (v_i - v_0) \cdot \Delta t_j + X_i \mu_j, \quad i=1 \dots 14, j=1 \dots 9$$

mit Näherungswerten X_i für die Koordinaten x_i , die aus der Epoche 1980 übernommen werden, wo außerdem $X_0=0$ ist. Die Näherungswerte für v_i und μ_j können zu Null angesetzt werden.

Die Messwerte l_{ij} werden als unkorreliert angenommen und entsprechend der Genauigkeit des Messverfahrens gewichtet: Invardrahtmessungen erhalten Gewichte $p_{ij}=1/(X_i \cdot 1\text{ppm})^2$, und bei Mekometermessungen setzen wir $p_{ij}=1/(0,2\text{mm}+X_i \cdot 0,2\text{ppm})^2$.

Das gewählte stochastische Modell ist insofern unkorrekt, da die Messwerte l_{ij} eigentlich Ergebnisse der epochenweisen Ausgleichungen sind, also mathematische Korrelationen aufweisen.

Die Größe dieser Korrelationen ist z.Z. jedoch nicht bekannt, da die benutzte Auswertesoftware diese Daten nicht liefert. Vorläufig werden solche Korrelationen also vernachlässigt. Wenigstens die Standardabweichungen können jedoch eingeführt werden.

Die Ausgleichung erfolgt nach kleinsten Quadraten $\sum p_{ij} v_{ij}^2 \rightarrow \text{Min.}$ Folgende Datumsdefekte müssen vorher durch Zusatzbedingungen behoben werden:

1. für Koordinaten: $\sum \delta x = 0$ (Das freie Netz hat keinen definierten Ursprung.)
2. für Geschwindigkeiten: $\sum v = 0$ (Es sind höchstens Relativbewegungen feststellbar.)
3. für Restabweichungen des Maßstabes: $\sum \mu = 0$ (Es sind höchstens relative Abweichungen feststellbar.)
4. für eine säkulare Änderung der Restabweichungen des Maßstabes: $\sum \mu \Delta t = 0$ (Eine solche Änderung ist nicht von einer säkularen Bewegung der Punkte aufeinander zu bzw. voneinander weg zu unterscheiden.)

Es wird der Formalismus der Behandlung geodätischer singulärer Ausgleichungsmodelle angewendet, wie er z.B. in (Niemeier 2002) nachgelesen werden kann.

6 Ergebnisse

Tab.1 : Geschwindigkeiten der 15 Punkte mit zugehörigen Standardabweichungen und Signifikanz (Irrtumswahrscheinlichkeit α)

Lfd. Meter	Geschwindigkeit [mm/a]	Standardabweichung [mm/a]	Prüfgröße für T-Test und $\alpha=0,01$ [mm/a]	Prüfgröße für T-Test und $\alpha=0,05$ [mm/a]
0	0,31	0,04	0,11 \Rightarrow hoch signif.	0,08
24	0,18	0,04	0,11 \Rightarrow hoch signif.	0,08
28	0,16	0,04	0,11 \Rightarrow hoch signif.	0,09
120	0,15	0,04	0,12 \Rightarrow hoch signif.	0,09
144	0,21	0,05	0,12 \Rightarrow hoch signif.	0,09
336	0,06	0,05	0,14	0,11 \Rightarrow nicht signif.
360	0,00	0,06	0,15	0,11 \Rightarrow nicht signif.
552	0,25	0,07	0,18 \Rightarrow hoch signif.	0,13
576	-0,09	0,07	0,18	0,14 \Rightarrow nicht signif.
960	-0,03	0,09	0,24	0,18 \Rightarrow nicht signif.
984	-0,06	0,14	0,38	0,28 \Rightarrow nicht signif.
1392	0,06	0,15	0,41	0,31 \Rightarrow nicht signif.
1416	-0,51	0,19	0,51 \Rightarrow hoch signif.	0,38
1856	-0,40	0,41	1,10	0,82 \Rightarrow nicht signif.
1880	-0,28	0,20	0,53	0,40 \Rightarrow nicht signif.

Die erhaltenen Geschwindigkeiten liegen im Bereich bis maximal 0,5 mm/a, meistens über 0,1 mm/a. Bei 7 Punkten wurde statistisch eine hoch signifikante relative Bewegung nachgewiesen. Das sind vor allem die Punkte am Anfang der EDM-Basislinie, der heute noch genutzt wird. Grund ist, dass diese Punkte in den meisten Mekometer-Messeperioden einbezogen wurden. Demgegenüber war z.B. der Punkt 1856 nur in einer solchen Epoche beteiligt, so dass eine Bewegung nicht signifikant nachweisbar ist.

In Abb. 7 erkennt man, dass die Bewegungen tatsächlich in der Hauptsache eine Verkürzung der Strecken bewirken.

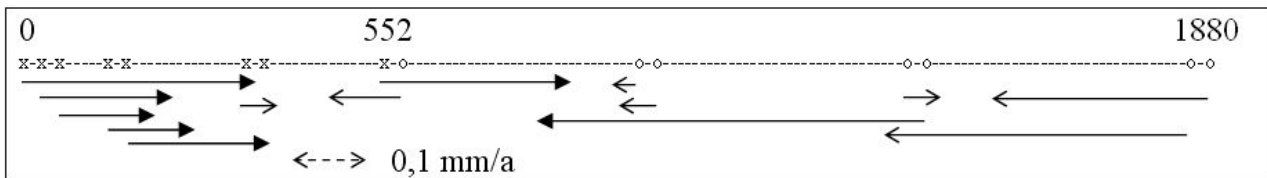


Abb.7 : Bewegungsvektoren (hoch signifikante Bewegungen mit ausgefüllten Pfeilspitzen)

Aufschlussreich ist noch ein Blick auf die erhaltenen systematischen Restabweichungen des Maßstabes μ_{ij} . Nur in zwei Epochen ergibt sich eine statistisch signifikante Abweichung, die in der Epoche 1993 wohl auf atmosphärische Einflüsse zurückzuführen ist.

Tab.2 : Restabweichungen des Maßstabes der 9 Epochen mit zugehörigen Standardabweichungen und Signifikanz (Irrtumswahrscheinlichkeit α)

Epoche	Restabweichung [ppm]	Standardabweichung [ppm]	Prüfgröße für T-Test und $\alpha=0,01$ [ppm]	Prüfgröße für T-Test und $\alpha=0,05$ [ppm]
1980	0,1	0,6	1,7	1,3 \Rightarrow nicht signif.
1982	-0,6	0,7	1,8	1,4 \Rightarrow nicht signif.
1986	2,7	0,8	2,0 \Rightarrow hoch signif.	1,5
1991	-0,5	0,5	1,3	1,0 \Rightarrow nicht signif.
1993	-2,7	0,6	1,6 \Rightarrow hoch signif.	1,2
1997	-0,7	0,5	1,4	1,0 \Rightarrow nicht signif.
1999	0,3	0,6	1,5	1,1 \Rightarrow nicht signif.
2001	0,2	0,7	1,8	1,3 \Rightarrow nicht signif.
2003	1,1	0,7	1,7	1,3 \Rightarrow nicht signif.

Die Standardabweichung der Gewichtseinheit beträgt etwa 3. Das bedeutet, dass Zentrierabweichungen und nicht säkulare Punktbewegungen etwa doppelt so groß sind, wie die erwarteten zufälligen Messabweichungen. In den Mekometerepochen ergeben alle drei Einflüsse zusammen etwa eine Standardabweichung von 0,6 bis 1,2 mm.

7 Diskussion

Die wichtigste Frage, die sich anschließt, welche geologischen Ursachen die nachgewiesenen relativen Punktbewegungen haben, müssen wir leider offen lassen, da bisher kein Fachmann gefunden wurde, der 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.

Für die HTW Dresden ergibt sich somit die Schlussfolgerung, die regelmäßigen Sollstreckenbestimmungen fortzusetzen. Nach der nächsten Epoche im Herbst dieses Jahres ist auch eine vollständige Gesamtauswertung aller Originalmessdaten geplant, so dass nicht wie bisher Korrelationen vernachlässigt werden müssen. Gleichzeitig bietet sich eine komplette Deformationsanalyse an, allerdings nicht nach dem klassischen Schema, da dieses bekanntlich in einem mehrstufigen statistischen Test besteht. Zwar können jeder einzelnen Stufe Irrtumswahrscheinlichkeiten zugeordnet werden, nicht jedoch dem Endresultat. Dies ist ein Umstand, auf den bisher in der geodätischen Fachliteratur zu wenig hingewiesen wurde (jedoch z.B. in Neitzel 2004).

Literatur

Copeland- Davis T.W. (1990): Can the Kern ME5000 Mekometer replace invar measurements? Proc. 1st Int. Workshop on Accelerator Alignment, Stanford California 1989. http://www-group.slac.stanford.edu/met/IWAA/TOC_S/Papers/TCope89.pdf

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

Meier, D. and Loser, R. (1986): The Mekometer ME 5000 - A new precision distance meter. Allg. Verm. Nachr. 5/1986

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (2004): Kalibrierung elektrooptischer Distanzmessgeräte – Landeskaliereinrichtung Berlin-Adlershof
<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/bezugssysteme/download/kalib-flyer.pdf>

Niemeier, W. (2002): Ausgleichsrechnung. Walter de Gruyter Berlin New York

Neitzel, F. (2004): Identifizierung konsistenter Datengruppen am Beispiel der Kongruenzuntersuchung geodätischer Netze. Schriftenreihe der Deutschen Geodätischen Kommission Heft C 565, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften München