

Geometrischer Abgleich von Vektordaten auf Basis eines Gauss-Helmert-Modells

Joachim Boljen

Zusammenfassung

Durch den stetigen Ausbau der geographischen Informationssysteme erlangen die vektorbasierten Geodaten eine weiterhin steigende Bedeutung. Die Nutzung dieser Daten konzentriert sich zunehmend auf die Selektion und Kombination daraus abgeleiteter Teildatenbestände. Für diese Anwendungen ist eine präzise, zumindest konsistente Geometriefestlegung aller Geodaten unerlässlich. Im Folgenden wird ein mathematischer Algorithmus auf der Basis eines Gauss-Helmert-Modells vorgestellt, der als zentrales Modul eines allgemeinen Prozesses zum Abgleich von Vektordaten dienen könnte.

Summary

Entailed by the persistent development of geographic information systems vector based geodata attain an increased significance. The exploitation of these data is getting a growing importance concentrated on selection and combination of subcomponents derived from different datasets. For unrestricted applications a precise and at least consistent realisation of geometry is indispensable. In the following a mathematical algorithm based upon a Gauss-Helmert-Modell is recommended as a central module of a universal process which could be used for an alignment of vector based datasets.

1 Allgemeines

Die Entwicklung des amtlichen deutschen Vermessungswesens ist geprägt durch den Wandel von der analogen zur digitalen Aufgabenwahrnehmung und damit einhergehend durch die Zusammenführung der Bereiche Vermessung und Informatik zur Geoinformatik. Durch die im Aufbau befindliche Geodateninfrastruktur (GDI) werden die Geographischen Informationssysteme (GIS) zum unverzichtbaren Bestandteil einer umfassenden Informations- und Kommunikationsinfrastruktur.

Neben den Entwicklungen zur Erfassung und Verarbeitung von Geodaten gewinnen die Veränderungen der Produkt- und Verwendungsformen zunehmend an Bedeutung. Dabei geht es schon lange nicht mehr um den Wandel von der analogen Karte zur digitalen Darstellung (Betrachtung), sondern vielmehr um den Auf- und Ausbau der GIS-Systeme (Abfrage) einschließlich ihrer geometrischen und semantischen Integration. Aus den Vektordaten wird man auch wieder bildhafte Rasterdaten ableiten, die Nutzung dieser attribuierten Datenbestände wird sich jedoch verstärkt auf maschinelle Zugriffe und

rechnergestützte Bearbeitungsstrategien verlagern. Die Bedeutung der Modelle wird gegenüber der der Karten weiterhin zunehmen.

Das amtliche Vermessungswesen hat diese Entwicklung mit der Einrichtung des ALKIS®- und des ATKIS®-Datenbestandes berücksichtigt und im Rahmen dieser GIS-Systeme sowohl für das Liegenschaftskataster als auch für die topographische Landesaufnahme umfassende Vektordatenbestände aufgebaut. Dazu sind die vorhandenen Kartenwerke digitalisiert worden. Zur Fortführung werden digitale Orthophotos, Laserscan- und zunehmend Fernerkundungsdaten benutzt. Durch die neuen Informationsquellen werden an vielen Stellen geometrische Abweichungen der benutzten Digitalisierungsgrundlagen deutlich, die die Aktualisierung, Erweiterung und universelle Verwendung der Geobasisdaten stark erschweren.

Die Problematik der geometrischen Inkonsistenz von Vektordaten betrifft sowohl die Geobasis- als auch die Geofachdaten. Die Nutzung aller Geodaten wird sich immer stärker auf die Selektion und Kombination von Teildatenbeständen diverser GIS-Systeme konzentrieren. Die durch Vernetzung, Verschneidung und Zusammenfassung einzelner Objektbereiche gebildeten Präsentationen thematischer Sachverhalte werden an Bedeutung gewinnen. Die eigenständige Erfassung bzw. Georeferenzierung von Geofachdaten mittels GPS, Laserscan oder Digitalensoren wird die aufgezeigte Problematik verstärken. Die im Aufbau befindliche GDI wird den Prozess weiter beschleunigen.

Es geht in diesem Zusammenhang weniger um ein konkretes Präzisionsmaß für Geodaten, vielmehr muss im Interesse einer universellen Verwendung deren Konsistenz im Vordergrund stehen. An die Stelle statischer Standards müssen Prozesse zur dynamischen geometrischen Anpassung treten. Der Hinweis, dass die derzeitigen Festlegungen den speziellen Anforderungen des jeweiligen GIS-Systems formal genügen, kann vor dem Hintergrund der Kombination unterschiedlicher Datenbestände wenig überzeugen.

Durch die im Aufbau befindliche GDI und die Zunahme der GIS-Systeme hat die Extraktion von Objekten und Strukturen (Data Mining) und deren Integration im Sinne einer geometrischen und semantischen Harmonisierung (Matching) im Rahmen einer gekoppelten Datenhaltung (Federation Database) an Bedeutung gewonnen. Im Zentrum dieser Entwicklung stehen die Prozesse zur Abstimmung, Ergänzung und Aktualisierung der Geodaten. Der damit verbundene Gewinn muss vorrangig zur Anpassung der lokalen Datenbanken (Component Database, CDB) genutzt werden. Eine integrierte Datenbank (Inte-

gration Database, IDB) mit einer Zwischenspeicherung der Prozessergebnisse sollte nur als zeitlich und inhaltlich begrenzte Übergangslösung zum Einsatz kommen. An die Stelle der anwendungsbezogenen Integration heterogener Datenbestände muss die erstellungsorientierte Homogenisierung der Primärdaten treten. Die Optimierung möglicher Synergien bedingt die Konzentration der Maßnahmen auf den Beginn der Wertschöpfungskette (Grünreich 2005, Butenuth et al. 2007).

Bei dem Abgleich der Geodaten geht es um Verfahren zur Verknüpfung von Geometrien und Objektinformationen unterschiedlicher GIS-Systeme. Dazu werden in einem ersten Schritt die geometrischen und semantischen Zuordnungen hergestellt. Bezüglich der geometrischen Abstimmung haben sich die Ansätze nach dem geringsten Punktabstand (Interactive Closest Point, ICP) und der abschnittswise Anpassung (Dual Interval Alignment, DIA) etabliert. Die Attribute der korrespondierenden Vektordaten können angepasst werden, die Daten mit einer fehlenden Zuordnung, die eine Erweiterung bzw. Aktualisierung beinhalten, werden ergänzt. Die Klassifizierung bezüglich der Anpassungs- und Ergänzungsdaten erfolgt durch die Analyse der Transformationsparameter korrespondierender Punkte (ICP) bzw. durch die Berücksichtigung der Schwellwerte linearer Punktabstände (DIA) (Gösseln 2005).

Für den eigentlichen geometrischen Abgleich von Vektordaten werden oftmals »Rubber Sheeting«-Ansätze verwendet. Bei diesen Interpolationsverfahren geht es um die Konstruktion glatter Flächen aus verteilten Einzelwerten. Die dabei verwendeten mathematischen Funktionen basieren auf den stochastischen bzw. nachbarschaftlichen Verhältnissen der anzupassenden Ausgangsdaten. Anstelle der punktbezogenen Zuordnungen einfacher Anwendungen sind inzwischen erweiterte Verfahren getreten, die das Problem der unterschiedlichen Dichte korrespondierender Ausgangsinformationen überwinden (Bretterbauer 2005, Gielsdorf und Gründig 1997, Haunert 2005).

Insbesondere im Bereich des Liegenschaftskatasters und der sich darauf beziehenden Fachdatenbestände ist die aufgezeigte Problematik der Homogenisierung bereits intensiv behandelt worden. In diesen Fällen geht es vorrangig um die Überwindung unterschiedlicher Raumbezüge mithilfe der Transformation und die nachbarschaftsgerechte Verteilung von geometrischen Differenzen. Bei der Bearbeitung des Themas ist sowohl die Komplexität der Aufgabe als auch das Problem der Behandlung großer Datenmengen deutlich geworden. Inzwischen sind darauf ausgerichtete Softwarelösungen entwickelt worden, die bereits jetzt eine weite Verbreitung in der praktischen Anwendung gefunden haben (Kampshoff und Benning 2005, Benning und Scholz 2010).

Die aufgezeigten Lösungsansätze (Matching, Rubber Sheeting, Homogenisierung) der Datenintegration berück-

sichtigen, ähnlich denen der Datengeneralisierung, meist zusätzliche Bedingungen. Diese beschränken sich keineswegs auf geometrische Situationen (Rechtwinkligkeit, Geradlinigkeit, ...) und topologische Aspekte (Geschlossenheit von Linien, ...), sondern beziehen auch semantische Inhalte mit ein, um unverträgliche Bedeutungen (Fluss auf Bergspitze, ...) bei der Prozessierung zu vermeiden. Die zusätzlichen Bedingungen haben insbesondere bei einer begrenzten Verknüpfung der gegenübergestellten Geodaten einen wesentlichen Anteil an der Qualität der abgestimmten Lösung (Werder 2009).

Die Notwendigkeit einer geometrischen Anpassung führt zu weiteren Überlegungen bezüglich eines universellen Abgleichverfahrens. Damit könnte man nicht nur die vorhandenen Konflikte beseitigen, man wäre gleichzeitig gut aufgestellt, um der rasanten Entwicklung im Bereich der Geoinformatik folgen zu können. Die geometrische Kongruenz ist eine entscheidende Voraussetzung für die Aktualisierung, Erweiterung und Integration der amtlichen Geobasisdaten. Vor dem Hintergrund der begrenzten personellen Ressourcen wird dieses nur auf der Grundlage weitgehend automatisch ablaufender Prozesse möglich sein. Der hier vorgestellte Algorithmus versucht einen Lösungsansatz zur Diskussion zu stellen, der über die punktbezogene Zuordnung das Strukturproblem (Granulation) erneut aufgreift.

2 Geometrische Zusammenhänge

Um die generelle Anwendbarkeit des Ansatzes zur geometrischen Anpassung zu gewährleisten, wird lediglich vorausgesetzt, dass zwei abweichende Vektordatensätze vorhanden sind, die sich auf die jeweiligen Punkthaufen $\underline{x}_1$ und $\underline{x}_2$ beziehen, deren stochastische Verhältnisse $\underline{\Sigma}_{xx,1}$ bzw. $\underline{\Sigma}_{xx,2}$ zumindest modellhaft beschrieben werden können. Die Bearbeitung beschränkt sich darauf, den einen an den anderen Datensatz schrittweise anzupassen, wobei das jeweilige Start- und Zielsystem durch die Indizierung festgelegt wird. Will man beide Datensätze gegenseitig abgleichen, genügt es, den iterativen Prozess mit wechselnden Indizes auszuführen. Da über die Ursachen der Abweichungen nicht verfügt wird, können nicht nur erfassungs-, sondern auch bearbeitungsbedingte Effekte, wie z.B. die einer unterschiedlichen kartographischen Generalisierung, beseitigt werden.

Das wesentliche Merkmal des Algorithmus besteht darin, dass die für den Abgleich der einzelnen Punkte erforderlichen Ausgangsinformationen deren eindeutige Bestimmbarkeit nicht voraussetzen. Die Zwischenpunkte linienförmiger Objekte werden in der Regel nur soweit benutzt, wie es zur Festlegung ihres seitlichen Abstandes erforderlich ist, da eine konkrete punktbezogene Zuordnung schwach abknickender Linienzüge wegen unterschiedlicher Erfassungsprozesse in der Regel nicht zulässig ist (vgl. Abb. 1).

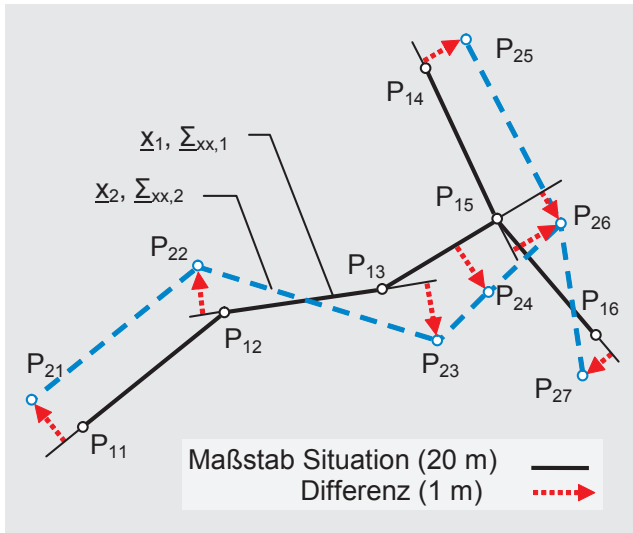


Abb. 1: Linienhafte Geometrien der Vektordatensätze $\underline{x}_1$ und $\underline{x}_2$

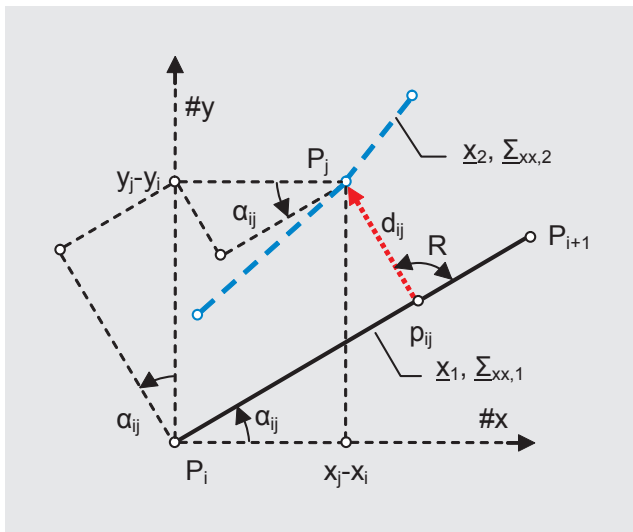


Abb. 2: Längs- und Querabweichung d_{ij} bzw. p_{ij}

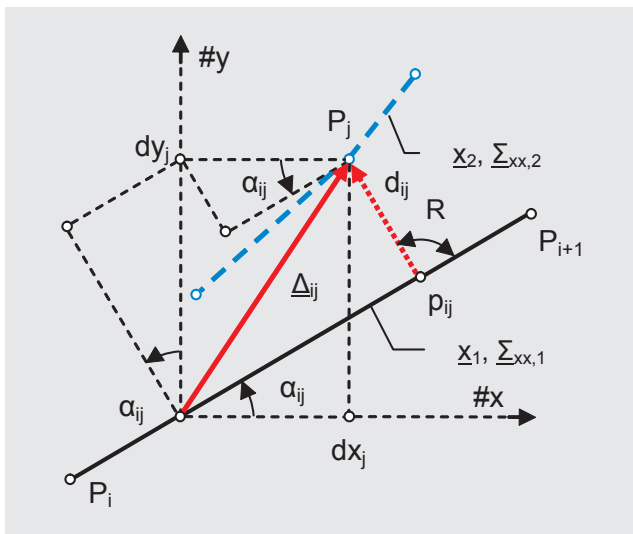


Abb. 3: Verschiebungsvektor Δ_{ij} und seine Projektion d_{ij}

Lediglich beim Zusammentreffen von drei und mehr Linien in den Knotenpunkten ist meistens eine zweifelsfreie Zuordnung der Punktlagen in beiden Datensätzen möglich. Dennoch stellt diese Situation keinen Sonderfall dar, da sie durch die Ermittlung des seitlichen Abstandes zu zwei angrenzenden, möglichst rechtwinklig zueinander verlaufenden Linienelementen auf den Standardfall zurückgeführt werden kann.

Natürlich sind auch andere als die in Abb. 1 dargestellten Zuordnungen der Linien- und Knotenpunkte denkbar. Die Auswahl der optimalen Werte erfolgt auf der Grundlage der unter (9) bis (11) behandelten Kriterien. Die an dieser Stelle aufgeführte Präsentation bezieht sich auf die dabei erzielten Ergebnisse.

Die in allen diesen Fällen zu berücksichtigenden Beziehungen reduzieren sich auf die Bestimmung des Abstandes d_{ij} eines Punktes P_j von einer Linie P_iP_{i+1} . Zur Beschreibung der mathematischen Verhältnisse sei auf Abb. 2 verwiesen. Dabei mögen die Punkte P_i und P_{i+1} zu dem Punkthaufen $\underline{x}_1$ gehören, der Punkt P_j entspricht einem Punkt dieser Linie im Datenbestand $\underline{x}_2$.

Für die Längs- und Querabweichung p_{ij} bzw. d_{ij} erhält man auf der Grundlage der Hesseschen Normalform der Geradengleichung die nachstehend aufgeführten Ausdrücke (Boljen 2009):

$$\begin{aligned} p_{ij} &= (y_j - y_i) \sin \alpha_{ij} + (x_j - x_i) \cos \alpha_{ij}, \\ d_{ij} &= (y_j - y_i) \cos \alpha_{ij} - (x_j - x_i) \sin \alpha_{ij}, \\ i &= 1, \dots, n_d, \quad j = 1, \dots, n_p. \end{aligned} \quad (1)$$

Die Variable α_{ij} ist dabei für das Azimut des Abschnittes P_iP_{i+1} verwendet worden. Da sie gleichzeitig die Richtung der Abweichung d_{ij} festlegt, erfolgt die Indizierung entsprechend. Für die Bestimmung von n_p Differenzvektoren stehen n_d Querabweichungen zur Verfügung.

Durch die mithilfe des Azimuts α_{ij} erreichte Orientierung des Abstandes d_{ij} kann die Beziehung zwischen den unbekannten dx_j, dy_j -Komponenten des Verschiebungsvektors Δ_{ij} zu seiner zum Linienvverlauf senkrechten Projektion d_{ij} wie folgt beschrieben werden:

$$\begin{aligned} d_{ij} &= dy_j \cos \alpha_{ij} - dx_j \sin \alpha_{ij}, \\ i &= 1, \dots, n_d, \quad j = 1, \dots, n_p. \end{aligned} \quad (2)$$

Zur Darstellung der analytischen Zusammenhänge wird auf Abb. 3 verwiesen.

Die aufgezeigten Abhängigkeiten können schließlich als funktionale Beziehung eines Gauss-Markov-Modells benutzt werden:

$$\begin{aligned} v_{d,ij} &= d\hat{x}_j \sin \alpha_{ij} - d\hat{y}_j \cos \alpha_{ij} - d_{ij}, \\ i &= 1, \dots, n_d, \quad j = 1, \dots, n_p. \end{aligned} \quad (3)$$

Die Richtung des Verschiebungsvektors Δ_{ij} nach (2) bzw. Abb. 3 geht von einer Anpassung des Datensatzes $\underline{x}_1$ an $\underline{x}_2$ aus. Da die konkreten Informationen sich jedoch auf

die Punkte P_j des Datensatzes $\underline{x}_2$ beziehen und somit einen Beitrag zu dessen Verbesserung liefern, ist im Folgenden die Richtung des Vektors $\underline{\Delta}_{ij}$ umzukehren. In (3) wird dieses dadurch berücksichtigt, dass die Vorzeichen der Koeffizienten $\partial d_{ij}/\partial x_j$ und $\partial d_{ij}/\partial y_j$ gegenüber (2) wechseln.

Um die stochastischen Verhältnisse der abgeleiteten Beobachtung d_{ij} beschreiben zu können, ist die durch (1) gegebene Festlegung nach den Koordinaten x_j, y_j, x_i, y_i und x_{i+1}, y_{i+1} abzuleiten:

$$\begin{aligned} dd_{ij} = & -dx_j \sin \alpha_{ij} + dy_j \cos \alpha_{ij} \\ & + dx_i \left(1 - \frac{p_{ij}}{s_{ij}}\right) \sin \alpha_{ij} - dy_i \left(1 - \frac{p_{ij}}{s_{ij}}\right) \cos \alpha_{ij} \\ & + dx_{i+1} \frac{p_{ij}}{s_{ij}} \sin \alpha_{ij} - dy_{i+1} \frac{p_{ij}}{s_{ij}} \cos \alpha_{ij}, \\ i = & 1, \dots, n_d, \quad j = 1, \dots, n_p. \end{aligned} \quad (4)$$

Fasst man die differenziellen Beziehungen nach (3) und (4) zu einem Ausgleichungsansatz zusammen, erhält man unter Berücksichtigung von

$$\underline{Q}_{ll,d} = \underline{F}_1 \underline{Q}_{xx,1} \underline{F}_1^T + \underline{F}_2 \underline{Q}_{xx,2} \underline{F}_2^T \quad (5)$$

das nachstehend aufgeführte Gauss-Markov-Modell:

$$\underline{v}_d = \underline{A}_d \hat{\underline{x}}_d - \underline{l}_d, \quad \underline{\Sigma}_{ll,d} = \sigma_o^2 \underline{Q}_{ll,d}. \quad (6)$$

In (6) stehen die Größen $\underline{v}_d$, $\hat{\underline{x}}_d$ und $\underline{l}_d$ für den Verbesserungs-, Unbekannten- und Beobachtungsvektor, $\underline{A}_d$ beschreibt gemäß (3) die Koeffizientenmatrix des funktionalen Modells.

Die Varianzmatrix $\underline{\Sigma}_{ll,d}$ legt das stochastische Modell fest. Dabei nehmen die in (5) eingeführten Matrizen $\underline{F}_1$ und $\underline{F}_2$ die durch (4) beschriebenen Ableitungskoeffizienten auf, die Kofaktormatrizen $\underline{Q}_{xx,1}$ und $\underline{Q}_{xx,2}$ beschreiben die Genauigkeitsverhältnisse der zu bearbeitenden Vektordatensätze. Da die konkreten Werte in der Regel nicht bekannt sind, wird man hierfür meist auf folgenden Modellansatz zurückgreifen:

$$q_{xx,i}(s) = q_{xx,i} \exp\left(-\ln 2 \frac{s^2}{s_{h,i}^2}\right), \quad i = 1, 2. \quad (7)$$

In (7) steht die Größe s für den konkreten Abstand der jeweiligen Punkte und die Variable $s_{h,i}$ für die Halbwertsbreite, dem fiktiven Punktabstand mit der Korrelation $\rho = 0,5$. Die Varianz wird für beide Koordinatenachsen mit $q_{xx,i}(s) = q_{yy,i}(s)$ als gleich und die Kovarianz mit $q_{xy,i}(s) = 0$ als nicht vorhanden angenommen. Zur Berücksichtigung konkreter Punktgenauigkeiten könnten die Scheitelwerte der durch (7) gegebenen Kovarianzfunktion mit $q_{xx,i} = 1$ festgelegt und die derart strukturierte Korrelationsmatrix zeilen- und spaltenweise mit der Standardabweichung der individuellen Punktwerte multipliziert werden.

Unabhängig von der Beschreibung der stochastischen Verhältnisse ist das durch (6) festgelegte Gauss-Markov-Modell nicht direkt auflösbar. Die Tatsache, dass für jeden Punkt zwei unbekannte Verschiebungskomponenten anfallen, obwohl meist nur eine Querabweichung als abgeleitete Beobachtung vorhanden ist, führt grundsätzlich zu einer singulären Normalgleichungsmatrix:

$$u/2 \leq n \leq u, \quad u = 2n_p, \quad n = n_d. \quad (8)$$

Das Problem der Unterbestimmung könnte man überwinden, indem man den durch (6) beschriebenen Ansatz auf eine Ausgleichung nach bedingten Beobachtungen umstellt. Dies würde jedoch bedeuten, dass sich die Verbesserungen auf die Koordinaten beziehen und die als Widersprüche aufgefassten Querabweichungen unmittelbar beseitigt werden. Damit wäre die universelle Zielsetzung eines gegenseitigen Abgleichs von Vektordaten nicht mehr möglich. Die eigentliche Überwindung des Rangdefekts erfolgt daher auf der Grundlage des im nachfolgenden Absatz dargestellten Gauss-Helmert-Modells.

Ungeachtet dessen ist im Bereich der geometrischen Zusammenhänge die Zuordnungsfrage zu bearbeiten. Dabei geht es um die prozessgesteuerte Zuweisung der einzelnen Punkte P_j zu den korrespondierenden Linienelementen $P_i P_{i+1}$, um damit den automatischen Aufbau des durch (6) formulierten Gleichungssystems festzulegen.

Dazu bildet man in einem ersten Schritt jeden Punkt P_j nach (1) auf alle benachbarten Linienelemente $P_i P_{i+1}$ ab. Um Überschneidungen mit Fremdgeometrien zu verhindern, sind die untersuchten Zuweisungen auf die semantisch abgestimmten Objekte zu beschränken. Zur Vermeidung unsinniger Kombinationen sind entfernte, außerhalb einer Auswahlfläche fallende Linienelemente von vornherein auszuschließen. Da bei einer optimalen Lösung der fragliche Punkt in unmittelbarer Nähe der zugehörigen Linie liegen muss, können die Ergebnisse, die der Bedingung

$$\begin{aligned} -p_c & \leq p_{ij} \leq s_{ij} + p_c, \\ -d_c & \leq d_{ij} \leq d_c \end{aligned} \quad (9)$$

nicht genügen, unberücksichtigt bleiben.

Bei Knotenpunkten, bei denen drei und mehr Linien zugeordnet werden können, sind in einem weiteren Rechenlauf die beiden Geometrien auszuwählen, die möglichst rechtwinklig zueinander verlaufen. Dazu ist die Beziehung

$$\max \left\{ \text{abs} \left[\sin(\alpha_{i,j} - \alpha_{i+1,j}) \right] \right\} \quad (10)$$

für den jeweiligen Punkt P_j in allen Kombinationen auszuwerten, sodass pro Knoten P_j allenfalls zwei Linienelemente $P_i P_{i+1}$ und $P_{i+1} P_{i+2}$ übrig bleiben.

Um ungünstige Schnittgeometrien auszuschließen, die insbesondere bei Linienpunkten auftreten können, bei denen die Rechtwinkligkeit um mindestens α_c verfehlt wird,

sind in einem weiteren Bearbeitungsschritt die für die einzelnen Punkte P_j verbleibenden Linienpaare zu überprüfen. Wird dabei die Bedingung

$$\text{abs}[\sin(\alpha_{i,j} - \alpha_{i+1,j})] \geq \cos \alpha_c, \quad 0 \leq \alpha_c \leq \pi/2 \quad (11)$$

nicht eingehalten, ist der Linienbezug mit dem größeren Abstand d_{ij} zu streichen. Diese Situationen treten nur auf, wenn der jeweilige Punkt P_j in der Nähe eines Punktes P_i liegt und ihm innerhalb der in (9) formulierten Toleranzschranke p_c zwei Linienelemente $P_i P_{i+1}$ bzw. $P_{i+1} P_{i+2}$ zugeordnet werden können. In diesen Fällen ergeben sich über die Verfügung der Größe α_c interessante Möglichkeiten zur Prozesssteuerung, denn mit $\alpha_c \rightarrow 0$ ist die Bedingung (11) nur noch für sich rechtwinklig schneidende Bestimmungsgrößen erfüllt, sodass die gesuchten Verschiebungskomponenten unterbestimmt bleiben (Queranpassung). Mit $\alpha_c \rightarrow \pi/2$ entfallen die Ausschlusskriterien vollständig, d.h. es erfolgt trotz ungünstiger Schnittbedingungen über die Berücksichtigung von jeweils zwei Querabweichungen eine zumindest numerisch eindeutige Festlegung der unbekannten Komponenten und damit eine eindeutige Abstimmung der Linienpunkte (Längs- und Queranpassung).

Dennoch behandeln die durch (9) bis (11) festgelegten Auswahlkriterien die Zuordnungsproblematik nicht abschließend, denn dadurch werden alle Geometrien abgeglichen, die der Beziehung (9) genügen. Mit (10) und (11) werden lediglich einzelne ungünstige Bestimmungselemente gestrichen, die Präzision der Abweichungen bleibt dabei unberücksichtigt. Um diesen Mangel zu beheben, können die ausgewählten Differenzen d_{ij} zusätzlich auf Signifikanz getestet werden. Auf der Grundlage der Nullhypothese

$$H_0 : E\{d_{ij}\} = 0, \quad (12)$$

der durch (5) berechneten Kovarianz $q_{dd,ij}$ und der Testgröße

$$y_{ij} = \frac{\text{abs}(d_{ij})}{\sigma_o \sqrt{q_{dd,ij}}} \quad (13)$$

werden die signifikanten Querabweichungen mithilfe der Testentscheidung

$$P\{y_{ij} \geq y_{1-\alpha} | H_0\} = \alpha \quad (14)$$

von dem weiteren Abgleichungsprozess ausgeschlossen, da die Größe d_{ij} mit der zugehörigen Standardabweichung nicht mehr erklärbar ist.

3 Gauss-Helmert-Modell

Um die Singularität des durch (6) beschriebenen Gauss-Markov-Modells zur geometrischen Anpassung der Vektordaten $\underline{x}_2$ an $\underline{x}_1$ beheben zu können, wird dieses Modell um die in $\underline{x}_2$ bzw. $\underline{Q}_{xx,2}$ enthaltene Ausgangsinformation ergänzt:

$$\begin{aligned} \underline{v}_x + \underline{x}_2 &= \hat{\underline{x}}_2, \quad \underline{\Sigma}_{xx,2} = \sigma_o^2 \underline{Q}_{xx,2}, \\ \underline{v}_d + \underline{l}_d &= \underline{A}_d \hat{\underline{x}}_2, \quad \underline{\Sigma}_{ll,d} = \sigma_o^2 \underline{Q}_{ll,d}. \end{aligned} \quad (15)$$

Sortiert man diese Ausdrücke nach den Residuen $\underline{v}_x$, $\underline{v}_d$, den Unbekannten $\hat{\underline{x}}_2$ und den Komponenten $\underline{x}_2$, $\underline{l}_d$ des Widerspruchsvektors $\underline{w}$, führt dies auf ein Gauss-Helmert-Modell (Pelzer 1985):

$$\begin{aligned} \underline{B}\underline{v} + \underline{A}\hat{\underline{x}} + \underline{w} &= \underline{0}, \quad \underline{\Sigma}_{ll} = \sigma_o^2 \underline{Q}_{ll} \\ \underline{B} &= \begin{bmatrix} \underline{I} & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{I} \end{bmatrix}, \quad \underline{v} = \begin{bmatrix} \underline{v}_x \\ \underline{v}_d \end{bmatrix}, \quad \underline{A} = -\begin{bmatrix} \underline{I} \\ \underline{A}_d \end{bmatrix}, \quad \underline{w} = \begin{bmatrix} \underline{x}_2 \\ \underline{l}_d \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (16)$$

Mithilfe der Ausgleichsforderung zur Gewährleistung einer minimalen Verbesserungsquadratsumme kann daraus das folgende Normalgleichungssystem abgeleitet werden:

$$\begin{bmatrix} \underline{B}\underline{Q}_{ll}\underline{B}^T & \underline{A} \begin{bmatrix} \underline{k} \\ \underline{0} \end{bmatrix} \\ \underline{A}^T & \underline{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\underline{x}} \\ \underline{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{w} \\ \underline{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{0} \\ \underline{0} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Eliminiert man die Korrelate $\underline{k}$, dann gilt für die gesuchten Unbekannten $\hat{\underline{x}}$ unter Berücksichtigung der in (16) festgelegten Submatrizen der folgende Bestimmungsansatz:

$$\begin{aligned} \hat{\underline{x}}_2 &= \underline{Q}_{\hat{\hat{x}}\hat{x},2} (\underline{Q}_{xx,2}^{-1} \underline{x}_2 + \underline{A}_d^T \underline{Q}_{ll,d}^{-1} \underline{l}_d), \\ \underline{Q}_{\hat{\hat{x}}\hat{x},2} &= (\underline{Q}_{xx,2}^{-1} + \underline{A}_d^T \underline{Q}_{ll,d}^{-1} \underline{A}_d)^{-1} \end{aligned} \quad (18)$$

Das gleiche Ergebnis erhält man, wenn man die in (15) aufgeführten Beziehungen als Teile eines hybriden Gauss-Markov-Modells auffasst, die zu diesen Subsystemen gehörenden Normalgleichungsanteile zusammenfasst und insgesamt auflöst.

Mithilfe der Abkürzungen

$$\underline{d} = \underline{l}_d - \underline{A}_d \underline{x}_2, \quad \underline{Q}_{dd} = \underline{Q}_{ll,d} + \underline{A}_d \underline{Q}_{xx,2} \underline{A}_d^T \quad (19)$$

und der Identität von Schuhr-Frobenius kann die in (18) dargestellte Kofaktormatrix $\underline{Q}_{\hat{\hat{x}}\hat{x},2}$ wie folgt berechnet werden (Zurmühl und Falk 1984):

$$\underline{Q}_{\hat{\hat{x}}\hat{x},2} = \underline{Q}_{xx,2} - \underline{Q}_{xx,2} \underline{A}_d^T \underline{Q}_{dd}^{-1} \underline{A}_d \underline{Q}_{xx,2}. \quad (20)$$

Darüber hinaus kann der in (18) aufgeführte Ansatz zur Bestimmung der Unbekannten $\hat{\underline{x}}_2$ algebraisch umgeformt werden (Boljen 1993):

$$\hat{\underline{x}}_2 = \underline{x}_2 + \underline{Q}_{xx,2} \underline{A}_d^T \underline{Q}_{dd}^{-1} \underline{d}. \quad (21)$$

Während die in (18) gewählte Schreibweise einem Gauss-Helmert- bzw. hybriden Gauss-Markov-Modell zugeordnet werden kann, entspricht die in (20) und (21) gewählte Formulierung einem Kalman-Filter. In diesem Fall stehen die in (15) aufgeführten Beziehungen für das physikalische und geometrische Modell, wobei im physikalischen Anteil die Bewegungskomponenten unberücksichtigt bleiben. Unabhängig von den unterschiedlichen Begründungsmöglichkeiten wird an dieser Stelle den Berechnungsansätzen (20) und (21) der Vorzug geben, da deren numerische Operationen wegen des geringeren Inversionsaufwandes deutlich niedriger ausfallen.

Da es insgesamt um die Beseitigung geometrischer Konflikte und nicht um die Beurteilung der stochastischen Verhältnisse der Vektordatensätze geht, wird man auf die Berechnung der Kofaktormatrix $Q_{xx,2}$ in der Regel verzichten. Dies gilt auch für die Möglichkeit, mithilfe der Koordinatenlage $\hat{x}_2$ die Residuen $\underline{v}_x$ und $\underline{v}_d$ nach (15), die zugehörige Varianz der Gewichtseinheit σ^2_0 sowie die weiteren im Bereich der Ausgleichsrechnung üblichen Parameter bzw. die darauf aufbauenden Teststatistiken zu ermitteln und zu bewerten.

Damit konzentriert sich die geometrische Anpassung von Vektordatensätzen auf die Auswertung der Beziehung (21). Die so bestimmten Koordinaten $\hat{x}_2$ stellen eine optimale Schätzung im Rahmen der durch (15) festgelegten Modellbildung dar. Dabei ist zu beachten, dass dieses Ergebnis die geometrischen Konflikte nicht abschließend beseitigt. Auch wenn die Residuen $\underline{v}_d$ unberechnet bleiben, so ändert das nichts an ihrer Existenz, d.h. die Querabweichungen $\underline{l}_d$ werden nicht vollständig beseitigt. Dieser im ersten Moment als störend erscheinende Effekt eröffnet die Möglichkeit zwei Vektordatensätze gegenseitig anzupassen. Dazu würde man im Anschluss an die erste Berechnung auf Basis der Ausgangsdaten durch einfaches Tauschen der Indizes und Wiederholung des Ansatzes mit $\hat{x}_1$ eine Anpassung von $\underline{x}_1$ an $\underline{x}_2$ ermitteln. Der gesamte Vorgang ist iterativ so lange zu wiederholen, bis die zwischen den verbesserten Lösungen $\hat{x}_1$ und $\hat{x}_2$ verbleibenden Querabweichungen verschwinden. In den Situationen, in denen es um eine einseitige Anpassung von Vektordatensätzen geht, ist diese Iteration ohne Tauschen der betroffenen Datensätze durchzuführen.

Soweit keine vollständigen Datensätze zur Verfügung stehen oder diese nur teilweise auswertbar sind, können die für eine homogene Bearbeitung fehlenden Werte mithilfe eines allgemeinen Interpolationsansatzes berechnet werden.

Für den Sonderfall, dass einer der Datensätze lediglich aus einzelnen präzisen Zwangspunkten P_i besteht und insofern über keine Bezugsgeometrie $P_i P_{i+1}$ verfügt, wird dieser Datensatz abweichend von der allgemeinen Strategie mit $\underline{x}_2$ und der anzupassende Datensatz als Ausgangsbasis $\underline{x}_1$ angesetzt. Tauscht man außerdem die stochastischen Modelle, sodass $\Sigma_{xx,2}$ die Unsicherheit des

anzupassenden Vektordatensatzes und $\Sigma_{xx,1}$ die der präzisen Zwangspunkte beschreibt, können die nach (21) berechneten Verschiebungen $\hat{x}_2$ mit umgekehrten Vorzeichen dem zu verbessernden Vektordatensatz $\underline{x}_1$ zugeordnet werden. Die konkreten Werte für die Einzelpunkte dieses Datensatzes sind über eine standardmäßige Interpolation zu ermitteln. Damit kann die Aufgabe, einen Vektordatensatz an präzise Einzelpunkte anzupassen, auf den Algorithmus zum Abgleich von Vektordatensätzen zurückgeführt werden (Boljen 2009).

4 Strukturabgleich

Weisen die vorliegenden Datensätze einen unterschiedlichen Detaillierungsgrad auf, setzt sich beim Abgleich der geometrischen Konflikte die gröbere gegenüber der feineren Struktur durch.

Passt man z.B. den in Abb. 4 dargestellten Datensatz $\underline{x}_2$ einseitig an die feinere Struktur von $\underline{x}_1$ an, verschiebt

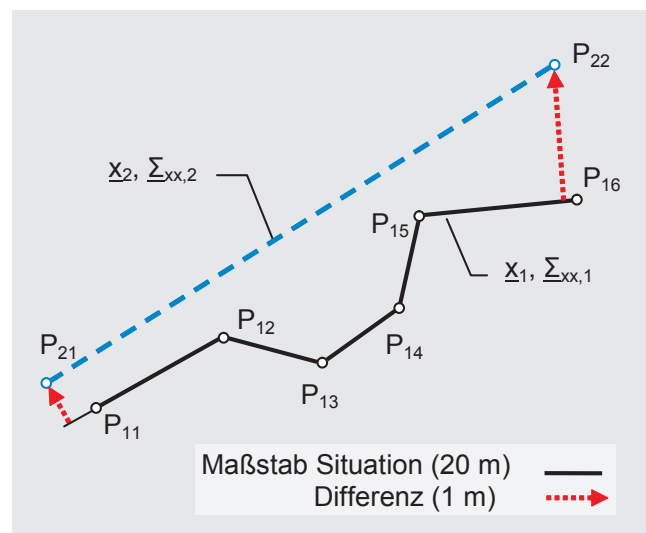


Abb. 4: Unterschiedliche Struktur der Vektordatensätze $\underline{x}_1$ und $\underline{x}_2$

man diese Linie durch die Fußpunkte der zugehörigen Lote und man erhält die untere in Abb. 5 dargestellte Lösung, die die Konflikte nur teilweise bereinigt.

Passt man umgekehrt den Datensatz $\underline{x}_1$ einseitig an $\underline{x}_2$ an, führt das auf die obere konfliktfreie Variante. Bei einem gegenseitigen Abgleich zwischen $\underline{x}_1$ und $\underline{x}_2$ bleibt die abgestimmte Form dieser zweiten Lösung erhalten, die Lage nimmt jedoch eine den Varianzverhältnissen $\Sigma_{xx,1}$ bzw. $\Sigma_{xx,2}$ entsprechende vermittelnde Position zwischen $\underline{x}_1$ und $\underline{x}_2$ ein. Der damit einhergehende Generalisierungseffekt kann durchaus gewollt sein, andererseits muss ein allgemeingültiger Ansatz auch die Forderung berücksichtigen, bei einem Abgleich den höheren Detaillierungsgrad erhalten zu können.

Diese Vorgabe kann durch die in Abb. 6 dargestellte Untergliederung der gröberen durch die Lotfußpunkte

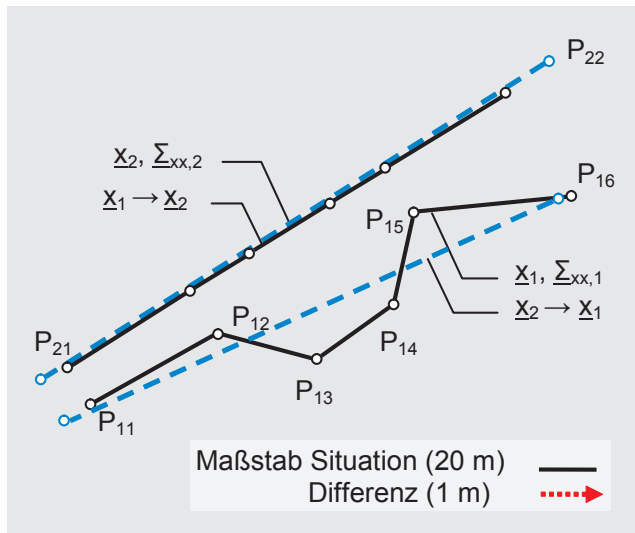


Abb. 5: Einseitig abgestimmte Geometrien der Vektordatensätze $\underline{x}_1$ und $\underline{x}_2$

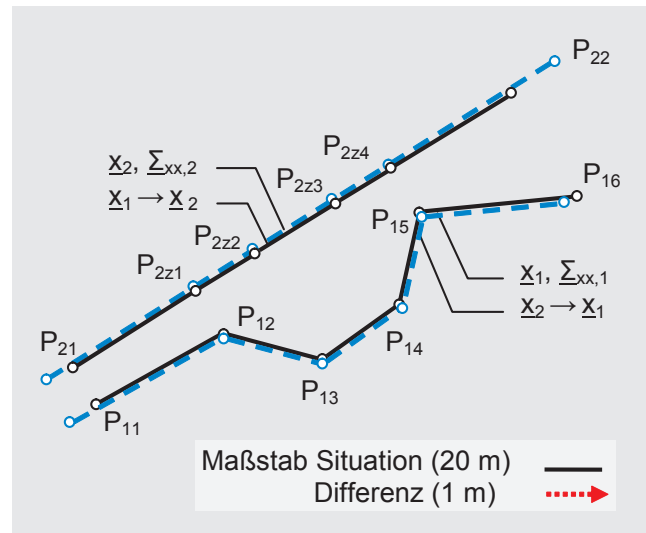


Abb. 7: Einseitig abgestimmte Geometrien der Vektordatensätze $\underline{x}_1$ und $\underline{x}_2$

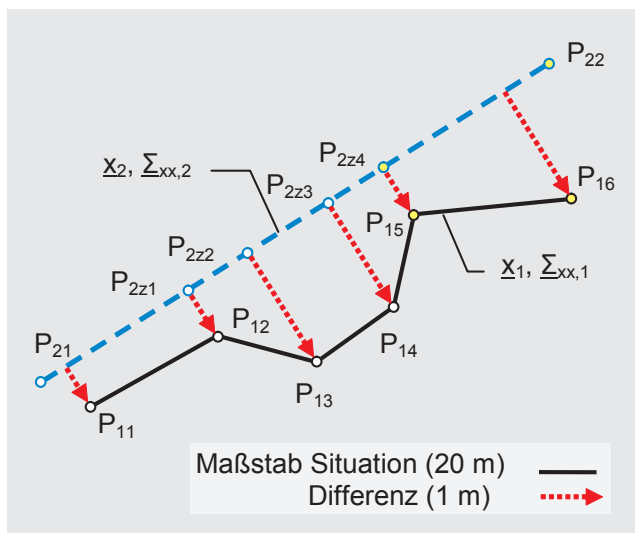


Abb. 6: Angepasste Struktur der Vektordatensätze $\underline{x}_1$ und $\underline{x}_2$

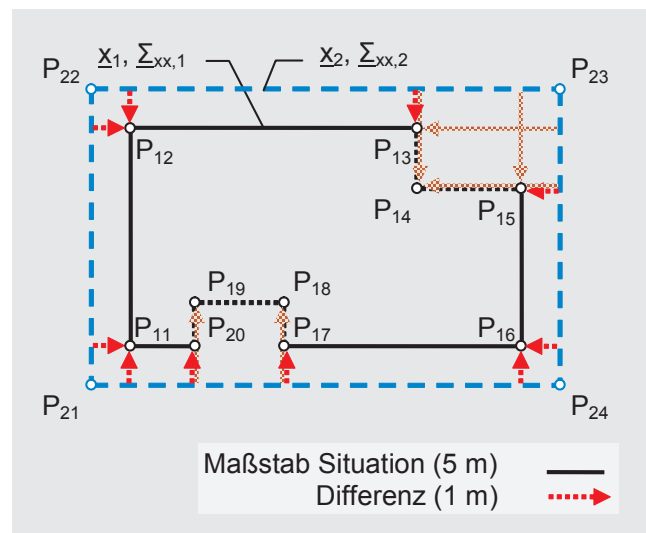


Abb. 8: Vektordatensätze bezüglich Mauerwerk $\underline{x}_1$ und Dachform $\underline{x}_2$

der feineren Struktur erfüllt werden. Erweitert man die durch (9) gegebene Selektion um

$$p_c < p_{ij} < s_{ij} - p_c, \quad (22)$$

können auf der Grundlage der so gefundenen Abschnitte p_{ij} weitere Zwischenpunkte P_{2zk} in die gröbere Datenstruktur eingefügt werden. Die darauf Bezug nehmenden einseitigen Abstimmungen ergeben sich gemäß Abb. 7. Beim gegenseitigen Abgleich bleibt bezüglich der Form die unten dargestellte detaillierte Struktur erhalten, die Lage nimmt wiederum eine vermittelnde Position ein.

Bei dieser Erweiterung ist zu beachten, dass man in das Modell des zugehörigen Datensatzes eingreifen muss, indem man die jeweilige Gerade vor der Anpassung automatisch durch mehrere Teilgeraden ersetzt. In den übrigen Fällen des Abgleichs bleibt die Modellierung des

GIS-Systems unverändert, da man lediglich die bisherigen gegen die angepassten Koordinaten austauscht.

Bei den Gebäuden ergibt sich insofern eine besondere Situation, als dass der eine Datensatz sich oftmals auf das Mauerwerk bezieht, während der andere die überstehende Dachabgrenzung festlegt. Diese in Abb. 8 dargestellte Situation kann durch eine Vorbehandlung berücksichtigt werden, bei der man unter Beachtung von (9) die feinere auf die gröbere Struktur bezieht und die dabei festgestellten Querabweichungen d_{ij} analysiert. Da ihr Durchschnittswert d_0 den Dachüberstand repräsentiert, können Rücksetzungen im Mauerwerk von der Abstimmung ausgeschlossen werden, indem man die deutlich größeren Abweichungen bei der Mittelbildung von d_{ij} schrittweise eliminiert.

Gleichzeitig kann die Geometrie der Dachform mithilfe des bereinigten Dachüberstandes d_0 an die des Mauerwerks angepasst werden. Die für eine homogene Bearbeitung des gesamten Mauerwerks fehlenden Werte können mithilfe eines Interpolationsansatzes berechnet werden.

5 Beispiel

Um die Wirkungsweise des Prozesses zu demonstrieren, kann die in Abb. 1 dargestellte Situation verwendet werden. Die dabei benutzten Koordinaten sind in Tab. 1 aufgeführt, die Iterationsstufe wird durch einen hochgestellten Index gekennzeichnet.

Tab. 1: Ausgangskordinaten der Vektordatensätze $\underline{x}_1^i$ und $\underline{x}_2^i$

$\underline{x}_1^i$ (m)			$\underline{x}_2^i$ (m)		
i	x_1^i	y_1^i	j	x_2^j	y_2^j
11	20,40	21,60	21	19,56	22,04
12	68,70	60,42	22	68,27	61,18
13	122,44	68,48	23	123,34	67,64
14	137,06	143,45	24	139,44	77,77
15	161,40	92,32	25	137,72	143,92
16	195,10	52,80	26	162,44	92,24
			27	194,88	52,14

Zur Festlegung der stochastischen Verhältnisse werden darüber hinaus folgende Annahmen getroffen: $\sigma_{xx,1}^2 = 0,50 \text{ m}^2$, $s_{h,1} = 50 \text{ m}$, $\sigma_{xx,2}^2 = 0,25 \text{ m}^2$, $s_{h,2} = 25 \text{ m}$.

Um in einem ersten Schritt eine Anpassung von $\underline{x}_2^i$ an $\underline{x}_1^i$ zu erreichen, werden die in Abb. 1 dargestellten Querabweichungen d_{ij}^i berechnet. Dazu wird jeder Punkt des Datensatzes $\underline{x}_2^i$ allen Linien von $\underline{x}_1^i$ zugeordnet; die automatische Selektion der gesuchten Kombinationen erfolgt auf der Basis der durch (9) bis (11) gegebenen Kriterien und Kenngrößen: $p_c = 3 \text{ m}$, $d_c = 3 \text{ m}$, $\alpha_c = \pi/4$.

Auf Grundlage von (21) wird der bestehende Koordinatensatz $\underline{x}_2^i$ anschließend in die verbesserte Situation $\underline{x}_2^{i+1}$ überführt. Berechnet man die zugehörigen Querabweichungen d_{ij}^{i+1} auf der Basis dieser Ergebnisse neu, ergibt sich eine Reduktion gegenüber den Ausgangswerten um etwa 25%.

Führt man unabhängig von diesem ersten Schritt in einem zweiten Durchgang eine Anpassung von $\underline{x}_1^i$ an $\underline{x}_2^i$ durch, was durch einfaches Tauschen der Indizes möglich ist, ergibt sich eine Reduktion der Querabweichungen d_{ij} zwischen der Ausgangs- und der verbesserten Situation $\underline{x}_1^{i+1}$ gegenüber $\underline{x}_1^i$ von etwa 40%. Vor dem Hintergrund der angesetzten Varianzen ($\sigma_{xx,2}^2 = 0,25 \text{ m}^2$, $\sigma_{xx,1}^2 = 0,50 \text{ m}^2$) erscheint die erreichte Aufteilung der Verschiebungskomponenten ($\underline{x}_2^{i+1}$: 25%, $\underline{x}_1^{i+1}$: 40%) plausibel.

Dieses Ergebnis zeigt, dass in dem hier gewählten Beispiel etwa 65% der Konflikte im ersten Bearbeitungsschritt beseitigt werden können. Durch eine iterative Wiederholung konvergieren die restlichen Abweichungen sehr schnell gegen Null. Da sich die geometrischen Verhältnisse nur geringfügig ändern, müssen dazu die in (21) benutzten Matrizen nicht neu aufgestellt werden.

Berechnet man die in Abb. 1 dargestellten Querabweichungen d_{ij} auf der Grundlage der bis zur zweifachen Iteration korrigierten Koordinaten, ergeben sich die in Tab. 2 aufgeführten Ergebnisse.

Betrachtet man darüber hinaus die unberücksichtigt gebliebenen Längsabweichungen p_{ij} , sind die in Tab. 3 dargestellten Werte zu diskutieren, wobei sich die mit *

Tab. 2: Querabweichungen d_{ij} während der Koordinatenanpassung

j	i	I+1	d_{ij}^i (m)	d_{ij}^{i+1} (m)	d_{ij}^{i+2} (m)
21	11	12	0,87	0,31	0,11
22	12	13	0,82	0,29	0,10
23	12	13	-0,96	-0,33	-0,11
24	13	15	-0,95	-0,35	-0,12
25	14	15	0,80	0,29	0,11
26	13	15	-0,61	-0,23	-0,09
26	14	15	0,90	0,33	0,13
27	15	16	-0,60	-0,20	-0,07

Tab. 3: Längsabweichungen p_{ij} während der Koordinatenanpassung

j	i	i+1	p_{ij}^i (m)	p_{ij}^{i+1} (m)	p_{ij}^{i+2} (m)
21	11	12	-0,38	-0,46	-0,49
22	12	13	-0,31	-0,11	-0,31
23	12	13	0,77*	0,51*	0,41*
24	13	15	-	-	-
25	14	15	-0,14	0,36	-0,24
26	13	15	0,85*	0,30*	0,11*
26	14	15	0,52*	0,20*	0,06*
27	15	16	0,36*	0,23*	0,18*

gekennzeichneten Größen auf den Endpunkt der Linie beziehen und somit um deren Länge s_{ij} reduziert worden sind.

Die konkreten Werte p_{ij} belegen, dass bis auf den Knotenpunkt P_{26} keine Verbesserungen festzustellen sind. Dies bestätigt die Zielsetzung, generell nicht zwei Punkthaufen aufeinander abzustimmen, sondern diese nur insoweit abzugleichen, dass die dadurch festgelegten Linienelemente keine störenden Querabweichungen d_{ij} aufweisen. Dieser Effekt kann durch die Modifikation der Größe α_c verändert werden, denn mit $\alpha_c = \pi/2$ kann die in den Knotenpunkten erreichte punktbezogene Abstimmung auf die Linienpunkte übertragen werden.

Das diskutierte numerische Ergebnis findet durch Abb. 9 seine graphische Bestätigung.

Der Maßstab der Differenzen ist dabei gegenüber Abb. 1 unverändert geblieben. Auf die Wiedergabe der gemäß

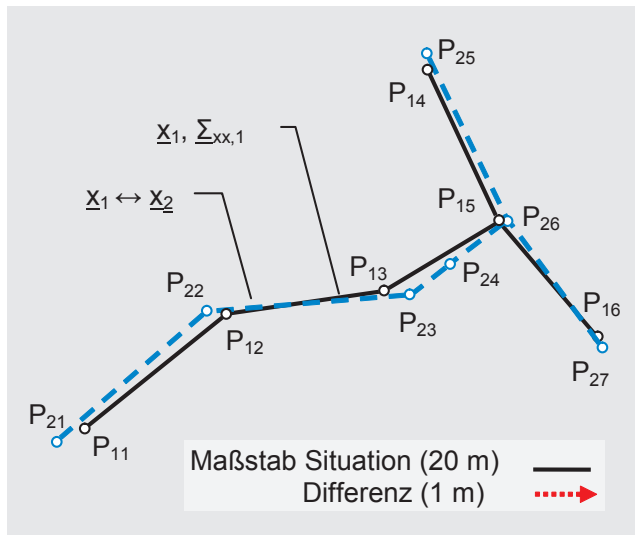


Abb. 9: Abgestimmte Geometrien der Vektordatensätze $\underline{x}_1$ und $\underline{x}_2$

Tab. 2 verbleibenden Querabweichungen d_{ij}^{i+2} wurde aus Platzgründen verzichtet.

Insgesamt wird deutlich, dass durch weitere Iterationsstufen die Querabweichungen vollständig beseitigt werden können und dass die Längsabweichungen in den Fällen einer unvollständigen Punktidentifikation, dessen Bestimmtheitsgrad durch den Schnittwinkel bzw. durch die Größe α_c modulierbar ist, unberücksichtigt bleiben. Das Beispiel bestätigt die generelle Anwendbarkeit eines Gauss-Helmert-Modells zum geometrischen Abgleich von Vektordaten.

6 Ausblick

Die Schnittmenge der Geobasis- und Geofachdaten wird durch ihre Geometrie gebildet, die Konsistenz dieser gemeinsamen Grundinformation wird zum entscheidenden Qualitätsmerkmal aller Geodaten. Um den Zugang und die Zuständigkeit einer dezentralen Datenhaltung innerhalb einer vernetzten GDI nicht einzuschränken, bleibt die originäre Bereinigung der geometrischen Konflikte auf der Ebene der lokalen Datenbanken eine zentrale Aufgabe des amtlichen Vermessungswesens.

Der hier vorgestellte mathematische Ansatz ist geeignet, die geometrische Qualität der Geodaten zu verbessern. Dabei muss es in den ersten Schritten darum gehen, die Geometrien der Geobasisdaten (ALKIS®, ATKIS®) zu harmonisieren. Die mit einer weitergehenden Integration des AAA-Modells angestrebten Synergien hängen entscheidend vom Fortschritt dieser Arbeiten ab. Bis zur redundanzfreien vollständigen Synthese dieser Teilmodelle sind sicherlich noch umfangreiche Arbeiten zu erledigen. Der nicht unerhebliche Zeitraum sollte Anlass genug sein, bereits jetzt mit der schrittweisen Realisierung zu beginnen.

Innerhalb der AAA-Problematik bietet es sich vorerst an, eine Beschränkung auf einfache und unmittelbar vergleichbare Objekte (Graben, Knick, ...) vorzusehen. Bei Unterschieden zwischen der eigentumsrechtlichen und der tatsächlichen Situation (Grenze verläuft nicht in der topographischen Mitte der Grenzeinrichtung) kann dies in der Regel durch Zu- und Abschläge an den Querabweichungen berücksichtigt werden. Aber auch bei unterschiedlich modellierten Objekten, wie z.B. bei Verkehrsflächen, kann man durch den Bezug der ALKIS®-Geometrien auf die äußeren Fahrbahnbegrenzungen der ATKIS®-Objekte eventuelle Verschneidungen zwischen diesen Datenbeständen beseitigen. Dazu müsste man lediglich die Querabweichungen d_{ij} der auf die Mittelachse bezogenen flächenhaften Geometrien, die kleiner als die halbe Trassenbreite ausfallen, mit dem entsprechenden Differenzbetrag in den Auswerteprozess mit aufnehmen.

Schließlich könnte man daran denken, die ALKIS®-Geometrien einschließlich ihrer Flächen F_g unter Berücksichtigung der Gaußschen Flächenformel an die buchmäßigen Flächen F_b der Flurstücke anzupassen. Die zugehörigen Ableitungsquotienten $\partial F_g / \partial x_j$ bzw. $\partial F_g / \partial y_j$ würden dabei in die Koeffizientenmatrix $\underline{A}_d$ und die Flächendifferenzen $\Delta F = F_b - F_g$ in den Beobachtungsvektor $\underline{l}_d$ einfließen. Über die Kofaktormatrix $\underline{Q}_{ll,d}$ könnte man den Einfluss kritischer Größen, wie z.B. graphisch ermittelte Buchflächen, einschränken. Es geht bei diesem Flächenabgleich weniger um Präzisionsgewinne, die wegen der niedrigen Redundanz ohnehin gering ausfallen, sondern ausschließlich um ein konsistenzbezogenes Qualitätsmanagement.

Mit der hier vorgestellten Strategie können nicht nur verschiedene Vektordatensätze eines Gebietes angepasst werden, sondern auch die einander entsprechenden Datensätze angrenzender Gebiete. Neben der Möglichkeit, die ATKIS®- und ALKIS®-Daten innerhalb eines Landes abzustimmen, könnte man auch jeden einzelnen dieser Datensätze zwischen zwei benachbarten Ländern bzw. Organisationseinheiten abgleichen und damit die bundesweite bzw. regionale Homogenität der Geobasisdaten deutlich verbessern.

Die einzelnen Anwendungsbereiche zur Integration der Geobasisdaten (ALKIS®, ATKIS®) konzentrieren sich auf die zugehörige Aufstellung des durch (6) gegebenen Ansatzes. Die modular aufgebauten Teilaspekte können nach den Unbekannten sortiert, zusammengefasst und als geschlossenes geometrisches Modell des durch (15) formulierten Gauss-Helmert-Modells weiter bearbeitet werden. Der Ansatz ist jedoch auch für eine sequenzielle Abarbeitung einzelner Objektbereiche geeignet. Wegen der fehlenden unmittelbaren Beeinflussung der einzelnen Abschnitte müsste man dabei jedoch iterativ vorgehen.

Durch die Verwendung von digitalen Orthophotos und den Einsatz von Laserscan-Verfahren (ATKIS®-DOP20C, ATKIS®-DGM) stehen Ausgangsdaten bereit, deren geometrische Qualität den derzeitigen digitalisierten Geobasisdaten überlegen ist. Insbesondere durch die Laserscan-

Verfahren und die digitale Photogrammetrie ist es mithilfe automatisch ablaufender Formerkennungsverfahren möglich, präzise Vektordaten (Gebäude, Böschungskanten, ...) abzuleiten. Sie bilden eine gute Basis für eine geometrische Qualitätsverbesserung der Geobasisdaten auf der Grundlage des vorgestellten Ansatzes. Derartige Algorithmen werden für eine effektive Integration zukünftiger Fortführungs- und Ergänzungsdaten unverzichtbar. Die Berücksichtigung von Fernerkundungsdaten und deren geometrische Einpassung werden weiter an Bedeutung zunehmen.

Die Landesvermessungsämter betreiben zurzeit die Umstellung der Amtlichen Topographischen Karten (ATKIS®-DTK) und deren weitgehend automatische Ableitung aus dem digitalen Landschaftsmodell (ATKIS®-Basis-DLM). Damit verbunden ist nicht nur eine neue Kartengraphik, sondern auch eine veränderte Geometrie. Da eine Vielzahl von Geofachdaten auf der bisherigen geometrischen Grundlage festgelegt worden sind, entsteht mit der Umstellung der Geobasisdaten das Problem der Nachführung der zugehörigen Fachdatenbestände. Mit dem vorgestellten Ansatz wird ein generelles Verfahren aufgezeigt, diese Differenzen zu beseitigen.

Durch die Möglichkeit des Selektierens und Kombinierens der über die Geoinformationssysteme (GIS) vorgehaltenen Geobasis- und Geofachdaten, durch die Integration aktueller Fortführungsdaten, die Ergänzung weiterer Inhalte und durch den Ausbau der Geodateninfrastrukturen (GDI) werden die Anforderungen an eine abgestimmte und präzise Geometrie zunehmen. Das vorgestellte Gauss-Helmert-Modell und die Selektionskriterien zur automatischen Bearbeitung werden das bestehende Problem der geometrischen Konflikte der vorhandenen Geodaten sicherlich nicht abschließend lösen. Sie erfüllen jedoch die Ansprüche einer Machbarkeitsstudie und versuchen darüber hinaus einen weiteren Lösungsansatz zu skizzieren. Die zunehmende Bedeutung der Modelle gegenüber der der Karten und die damit verbundene Möglichkeit der universellen und modularen Nutzung der Geodaten unterstreicht die Dringlichkeit ihres geometrischen Abgleichs.

Literatur

- Benning, W.; Scholz, T. (2010). Zum Lagebezugswechsel ETRS89/UTM mittels Homogenisierung. *zfv*, 135, S. 10–15.
- Boljen, J. (1993). Das amtliche Höhenetz unter dem Aspekt des allgemeinen Nutzeranspruchs, Ausgewählte Kapitel der Landes- und Ingenieurvermessung. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, 189, Hannover.
- Boljen, J. (2009). Verbesserung der ALKIS®-Geometrie durch digitale Orthophotos. *zfv*, 134, S. 45–52.
- Bretterbauer, K. (2005). Zur Konstruktion von Verzerrungslinien mittels der multiquadratischen Methode von Hardy. *Kartographische Nachrichten*, 55, S. 83–85.
- Butenuth, M.; Gösseln, G. v.; Heipke, C.; Lipeck, U.; Sester, M.; Tiedge, M. (2007). Integration of heterogeneous geospatial data in a federated database. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62, vol. 5, S. 328–346.
- Gielsdorf, F.; Gründig, L. (1997). Nachbarschaftstreue Anpassung auf der Basis des Membranmodells. *zfv*, 122, S. 208–218.
- Gösseln, G. v. (2005). A matching approach for the integration, change detection and adaptation of heterogeneous vector data sets. *Proceedings of 22nd International Cartographic Conference*, A Coruna.
- Grünreich, D. (2005). Die Rolle der Kartographie bei Aufbau und Nutzung von Geodateninfrastrukturen. *Kartographische Nachrichten*, 55, S. 291–296.
- Haunert, J.-H. (2005). Link based conflation of geographic datasets. *Proceedings of the 8th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*, A Coruna.
- Kampshoff, S.; Benning, W. (2005). Homogenisierung von Messdaten im Kontext von Geodaten-Infrastrukturen. *zfv*, 130, S. 133–145.
- Pelzer, H. (1985). Statische, Kinematische und Dynamische Punktfelder. *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II*, Pelzer, H. (ed), Wittwer Verlag, Stuttgart.
- Werder, S. (2009). Formalization of spatial constraints. *Proceedings of 12th AGILE Conference on GIScience*, Hannover.
- Zurmühl, R.; Falk, S. (1984). *Matrizen und ihre Anwendungen*. Springer Verlag, Berlin.

Anschrift des Autors

Prof. Dr.-Ing. habil. Joachim Boljen
Direktor des Landesvermessungsamts Schleswig-Holstein
Mercatorstraße 1, 24106 Kiel
joachim.boljen@LVermA-SH.landsh.de