Varianzkomponentenschätzung in ingenieurgeodätischen Netzen

Detlef Sieg und Milo Hirsch, Darmstadt

Teil 2: Anwendungen

Der Informationsgehalt geodätischer Beobachtungen wird – insbesondere bei heterogenem Material – häufig durch gewöhnliche Ausgleichungsansätze nicht ausgeschöpft, da im Allgemeinen neben den unbekannten Parametern des funktionalen Modells mit der Varianz der Gleichgewichtseinheit nur eine einzige globale Größe des stochastischen Modells geschätzt wird. Liegen jedoch a priori Kenntnisse der stochastischen Struktur der Beobachtungen vor, so wird die Schätzung von Varianz- und Kovarianzkomponenten möglich, die häufig zu einer Verbesserung der Ausgleichungsergebnisse führt; WELSCH (1984)

Nachdem in Teil 1 dieses Beitrages die interessierenden Varianzkomponentenmodelle vorgestellt und nummerisch effektiv auswertbare Beziehungen abgeleitet wurden, soll nun in zwei typischen ingenieurgeodätischen Netzen der Einsatz dieser stochastischen Modelle untersucht und mit verschiedenen Anwendungen motiviert werden.

Mit dem ersten Beispiel lassen sich Einsatzmöglichkeiten in einem hochredundanten Präzisionsnetz aufzeigen. Im zweiten Beispiel sind für die Anlage eines lokalen Netzes terrestrische und GPS-Messungen optimal miteinander zu kombinieren.

Bei all diesen Betrachtungen ist durch umfangreiche Untersuchungen sichergestellt, dass es keine Unzulänglichkeiten am funktionalen Modell (unzureichende Reduktion der Beobachtungen, Datums- und Konfigurationsdefekte etc.) und keine Probleme bei der stabilen nummerischen Auflösung der Gleichungssysteme gibt (vgl. SIEG (1999)).

5 Anwendungen in einem hochredundanten Präzisionsnetz

5.1 Netzbeschreibung

Das Präzisionsnetz dient der Bestimmung von etwa 150 Objektpunkten an einem Linearbeschleuniger im Messkeller des Instituts für Kernphysik an der TU Darmstadt. Der Beschleuniger setzt sich aus mehreren Magnetkomponenten zusammen, die miteinander durch Rohre verbunden sind, so dass der Teilchenstrahl in einem Feinvakuum geführt werden kann. Ein Teil der Magnete dient der Beschleunigung der Elementarteilchen. Diese erhalten bei einem Durchlauf durch die Beschleunigungsstrecke nicht die für die physikalischen Experimente benötigte Geschwindigkeit bzw. Energie. Deshalb wird der Teilchenstrahl über weitere Umlenkmagnete in einem geschlossenen Kreislauf gehalten und mehrfach durch die Beschleunigerstrecke geführt. Für die erfolgreiche Einrichtung des Strahles benötigt man die gegenseitige Lage der Magnete im Raum mit hoher Genauigkeit. Dazu befinden sich auf jedem Magneten zwei bis drei markierte Punkte, deren 3D-Koordinaten mit einer Genauigkeit von wenigen *1/10 mm* benötigt werden.

Der Beschleuniger hat eine Länge von etwa 25 Meter. Seine Magnete und der Strahlverlauf sind in der Abb. 1 angedeutet. Um eine gute Netzverknüpfung zu erreichen und die spätere zusätzliche Einmessung von einzelnen Experimentalplätzen mit Detektoren zu erleichtern, sind an der Raumdecke weitere 7 Punkte und an den Wandflächen etwa 50 Punkte signalisiert.

Die Messung zu Verknüpfungs- und Objektpunkten erfolgte von 10 Instrumentenstandpunkten mit dem Präzisionstheodolit Wild T2000. Die Standpunkte sind im Plan mit den Nummern 1 bis 10 eingezeichnet. Die nicht optimale direkte Verknüpfung der Stationen ergab sich durch extrem eingeschränkten Sichten und die auf drei begrenzte Anzahl der Industriestative. Letzteres ließ nur eine sequentielle Besetzung der Stationen zu. Auf den Punkten 2 und 5 musste das Instrument überdies zweimal in die Zwangszentrierung gesetzt werden, so dass dort mit zwei unterschiedlichen Orientierungsunbekannten Richtungen gemessen wurden. Jeder Magnetpunkt wurde von in der Regel drei verschiedenen Standpunkten aus aufgenommen, um eine hohe Zuverlässigkeit für die bestimmten Koordinaten zu erzielen.

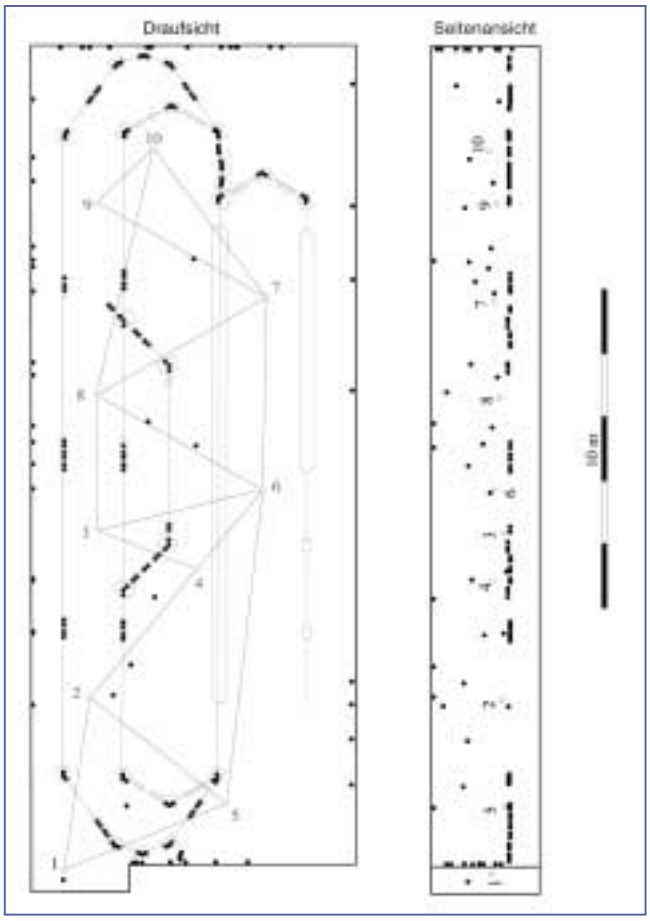

Abb. 1 Messpunkte am Teilchenbeschleuniger S-DALINAC

Zur Beschränkung des Messaufwandes erfolgte die Anzielung der Punkte in jeder der beiden Instrumentenlagen nur einmal.

Vom gesamten Netz sind in der Abb. 1 nur die zwischen den verschiedenen Instrumentenstandpunkten gemessenen Netzverbindungen (Richtungen, Zenitwinkel und Strecken) eingezeichnet. Die den Netzmaßstab bestimmenden Strecken sind indirekt aus Basislattenmessungen abgeleitet. Eine zusätzliche starke Verknüpfung des Netzes ergibt sich durch die Anzielung von drei bis sechs Decken und zehn bis zwanzig Wandpunkten von jedem Standpunkt aus. Insgesamt wurden so von jedem Standpunkt durchschnittlich 60 Richtungen und Zenitwinkel beobachtet und im Gesamtnetz somit über 700 Richtungen und Zenitwinkel. Bei insgesamt 603 Koordinatenunbekannten ergeben sich Redundanzanteile von etwa 280 für die Richtungen und 480 für die Zenitwinkel.

5.2 Voruntersuchungen mit dem Modell der Gruppenvarianzen

Grundsätzlich erfolgt die Aufspaltung der „gesamten" Varianz in mehrere Komponenten, um während der Netzausgleichung das stochastische Modell besser an das vorliegende Beobachtungsmaterial anzupassen und so den Informationsgehalt der Beobachtungen besser auszunutzen. Entsprechend der jeweiligen Zielsetzung sind verschiedene Aufspaltungen denkbar. Vor der Aufstellung des endgültigen Varianzkomponentenmodells wurden zunächst folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Bestimmung zielweitenabhängiger Varianzkomponenten (am Beispiel der Zenitwinkel)
- Test auf Gleichwertigkeit von Beobachtungen in Abhängigkeit von Ziel- bzw. Standpunkten

5.2.1 Bestimmung zielweitenabhängiger Varianzkomponenten

Für alle Zenitwinkel liegt in jeder Fernrohrlage jeweils nur ein Messwert aus der Anzielung mit dem Mittelfaden vor. Daher können a priori keine Aussagen zur Messgenauigkeit anhand der üblichen Auswertungen von Mehrfachmessungen gemacht werden. Die Messgenauigkeit lässt sich deshalb zunächst nur nach Erfahrungswerten oder Herstellerangaben festlegen.

Die Richtungsmessgenauigkeit ergibt sich nach der Untersuchung von GOTTWALD (1985) für eine mit dem T2000 in zwei Fernrohrlagen beobachtete Richtung zu *0,25 mgon*. Nach den technischen Angaben des Herstellers entsprechen sich die Messgenauigkeiten für Zenitwinkel und Richtungen (jeweils *0,15 mgon*). Ein sinnvoller Startwert für die Genauigkeit der Zenitwinkel ist daher *0,25 mgon*. Die von GOTTWALD durchgeführte Untersuchung bezieht sich jedoch auf Zielweiten von durchschnittlich *1000 m*. Bekanntermaßen sind vor allem bei kurzen Zielweiten Zentrier-, Horizontier- und Visurgenauigkeit entscheidende Einflussgrößen auf die angestrebte Genauigkeit.

Bei der Ausgleichung des vorliegenden Präzisionsnetzes entfällt das Zentrierproblem, weil nur die Zielpunkte dauerhaft markiert sind und die zu den Instrumentenstandpunkten gehörenden Bodenpunkte nicht bestimmt werden. Zur Steigerung der Horizontiergenauigkeit wurde der eingebaute Flüssigkeitskompensator statt der Röhrenlibelle genutzt, so dass sich die folgenden Untersuchungen auf die Visurgenauigkeit konzentrieren.

Die Visurgenauigkeit hängt von der Zielweite ab. Daher werden die Zenitwinkel nach ihrer Zielweite in Gruppen eingeteilt. Sollten weitere entfernungsabhängige Effekte auftreten, so werden diese durch eine solche Einteilung ebenfalls mit erfasst. Mit der Varianzkomponentenschätzung (VKS) kann dann das Varianzniveau für jede dieser Gruppen geschätzt werden.

Die Einteilung der Entfernungen wird so vorgenommen, dass in jeder Gruppe möglichst 50 Messwerte liegen. Für die Schätzung signifikanter Varianzkomponenten ist dann eine ausreichende Redundanz gegeben. Innerhalb der jeweiligen Gruppe wird eine einheitliche Genauigkeit für die Beobachtungen angesetzt. Der Näherungswert der Genauigkeit aller Zenitwinkel beträgt *0,25 mgon*.

Überdies gibt es noch jeweils eine weitere Varianzkomponente für die Strecken und Richtungen. Die Genauigkeiten der indirekt mit Basislatte bestimmten Strecken wird über eine Varianzfortpflanzung aus der Richtungsgenauigkeit und der Kalibriergenauigkeit bestimmt. Sie beträgt für eine abgeleitete *5-m*-Strecke *0,16 mm*.

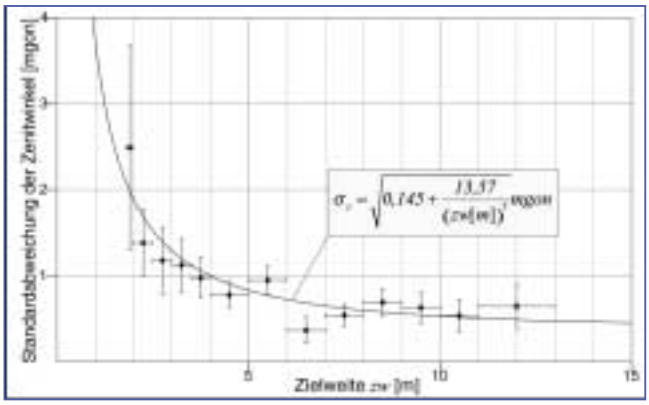

Abb. 2 Zielweitenabhängige Varianzkomponenten für die Zenitwinkel

Um den systematischen Einfluss nichtparalleler Lotlinien auf die untersuchten Zenitdistanzen zu eliminieren, wird die Netzausgleichung auf Basis des Kugelmodells durchgeführt. SCHWARZ (1995) berechnet für einen Standpunkt des Theodolits in einer Entfernung von *20 m* vom Bezugspunkt bei einer Zielung über *10 m* den Einfluss auf die Zenitwinkel zu maximal *0,2 mgon*, was einem Höhenfehler von *0,03 mm* entspricht.

Nach der Berechnung der Netzausgleichung mit VKS ergeben sich für die Gruppen unterschiedliche Genauigkeiten, die in Abhängigkeit von der Zielweite in Abb. 2 dargestellt sind. Die vertikalen Fehlerbalken repräsentieren die Ergebnisse der Genauigkeitsschätzungen für die Varianzkomponenten.

Die horizontalen Fehlerbalken entsprechen den Zielweiten der Zenitwinkel in der jeweiligen Gruppe, wie in der zweiten Zeile der Tab. 1 angegeben.

Tab. 1 Gruppeneinteilung für die gemessenen Zenitwinkel

Gruppe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Zielweiten [m]	1,8 – 2,0	2,0 – 2,5	2,5 – 3,0	3,0 – 3,5	3,5 – 4,0	4 – 5	5 – 6	6 – 7	7 – 8	8 – 9	9 – 10	10 – 11	11 – 12
Anzahl	20	80	60	50	70	110	80	40	60	50	35	28	15

Man sieht einen markanten Anstieg der Standardabweichungen bei den Gruppen mit kürzeren Zielweiten. Für den Verlauf des Anstieges kann eine Funktion der Form

$$\sigma_z = \sqrt{a + \frac{b}{zw^2}} \tag{26}$$

angesetzt und deren Parameter a und b bestimmt werden. Die Funktion verläuft durch fast alle Fehlerkreuze und ist daher gut dazu geeignet, die Abweichungen der gemessenen Zenitwinkel zu repräsentieren. Als Werte ergeben sich *0,145* für a und *13,57* für b. Die Formel entspricht der in Abschn. 4 erläuterten Aufspaltung der Standardabweichung in zwei Anteile. Die Visurgenauigkeit wird über einen Anzielfehler modelliert, wofür sich ein Wert von

$$\sqrt{13{,}57} \cdot \frac{\pi}{200\,gon} = 0{,}058\,mm \tag{27}$$

ergibt. Für die Instrumentenungenauigkeit erhält man

$$\sqrt{0{,}145} = 0{,}38\,mgon \tag{28}$$

Nach dem Ansatz (24) können diese beiden Fehlerkomponenten auch direkt in einer VKS modelliert werden, ohne den Umweg über eine Aufspaltung der Zenitwinkel in mehrere Gruppen zu gehen. Diese Möglichkeit wird auch bei der Aufstellung des endgültigen Varianzkomponentenmodells benutzt (vgl. Abschn. 5.3).

Als Ergebnis kann man festhalten, dass man mit der Varianzkomponentenschätzung die Möglichkeit besitzt, (bei ausreichender Redundanz) empirisch plausible Fehlermodelle (26) nummerisch zu verifizieren.

5.2.2 Test auf Gleichwertigkeit der Beobachtungen . . .

5.2.2.1 . . . bei unterschiedlichen Zielpunkten

Die Zielweite ist als ein die Genauigkeit wesentlich bestimmender Faktor nachgewiesen. Als Nächstes stellt sich die Frage, ob die Visuren zu verschiedenen Zielen eine unterschiedliche Genauigkeit aufweisen. Dazu kann man wieder das Modell für Gruppenvarianzen verwenden. Jetzt werden die Zenitwinkel in drei Gruppen eingeteilt, und zwar in jeweils eine Gruppe für Wandpunkte, Magnetpunkte und Zieltafelzielungen zu anderen Standpunkten. Nach der VKS ergeben sich für die drei Gruppen jedoch annähernd gleiche Varianzfaktoren, so dass eine Aufteilung der Varianz hinsichtlich des Zieles nicht erforderlich ist und das zielweitenabhängige Modell unverändert beibehalten werden kann.

5.2.2.2 . . . bei unterschiedlichen Standpunkten (Zenitwinkel)

Abschließend wird das stochastische Modell für die Zenitwinkel noch einmal durch eine weitere Berechnung von Gruppenvarianzen nach dem Modell (23) überprüft. Die Einteilung der Zenitwinkel erfolgt diesmal nach Beobachtungsstandpunkten. Insgesamt werden 14 verschiedene Varianzkomponenten angesetzt, nämlich eine für die Streckenmessungen, eine für die Richtungsbeobachtungen und 12 für die Zenitwinkelmessungen. Die Richtungsmessungen und Strecken werden wie in Abschn. 5.2.1 gewichtet. Bei den Zenitwinkeln werden unter Verwendung von (27) und (28) die einzelnen Genauigkeiten, die in die Matrix (23) eingehen, vorab nach der Formel

$$\sigma_z = \sqrt{(0{,}38\,mgon)^2 + \frac{(0{,}058\,mgon)^2}{s^2}\,\frac{(200\,gon)^2}{\pi^2}} \tag{29}$$

berechnet.

Man erwartet jetzt ein einheitliches Varianzniveau für die 12 angesetzten Zenitwinkelgruppen, da für alle Beobachtungen gleichwertige Bedingungen vorlagen.

Das Ergebnis für die Schätzung der Varianzkomponenten der Zenitwinkel, d. h. der Korrekturfaktor der Standardabweichungen (14), ist in Abb. 3 für alle 12 Standpunkte dargestellt.

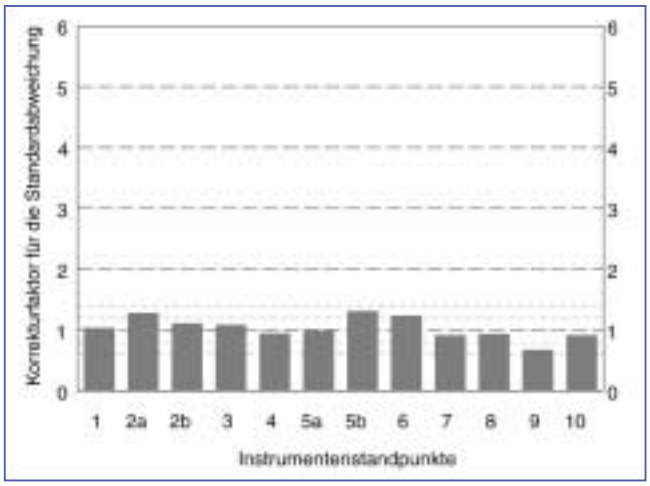

Abb. 3 Stpkt.weise Varianzkomponenten für die Zenitwinkel

Für eine Zenitwinkelmessung mit einer Zielweite von *10 m* vom Stpkt. 5a ergibt sich, bei Korrekturfaktor eins, direkt nach (29) eine Genauigkeit von

$$\sigma_z = \sqrt{(0{,}38\,mgon)^2 + \frac{(0{,}058\,mm)^2}{(10\,m)^2}\frac{(200\,gon)^2}{\pi^2}} = 0{,}53\,mgon\,.$$

Für einen entsprechenden Zenitwinkel vom Stpkt. 6 mit dem Korrekturfaktor *1,25* beträgt die geschätzte Genauigkeit *0,66 mgon*. Die einzelnen Varianzniveaus liegen dicht beieinander, so dass sich die Vermutung der gleichwertigen Messbedingungen bestätigt. Eine standpunktweise Aufteilung der Varianzkomponenten ist daher als nicht sinnvoll anzusehen.

5.2.2.3 . . . bei unterschiedlichen Standpunkten (Richtungen)

Eine weitere Netzberechnung mit VKS erfolgt auf ähnliche Weise. Diesmal werden allerdings für alle Zenitwinkel und Strecken nur jeweils eine einzelne Varianzkomponente und dafür bei den Richtungsbeobachtungen für jeden Standpunkt eine eigene Varianzkomponente angesetzt. Die Festlegung der Genauigkeiten der einzelnen Richtungen untereinander erfolgt mit

$$\sigma_z = \sqrt{(0{,}25\,mgon)^2 + \frac{(0{,}058\,mm)^2}{s^2}\frac{(200\,gon)^2}{\pi^2}}\,. \qquad (30)$$

Dabei wird die Annahme gemacht, dass der Anzielfehler bei den Richtungsmessungen die gleiche Rolle spielt

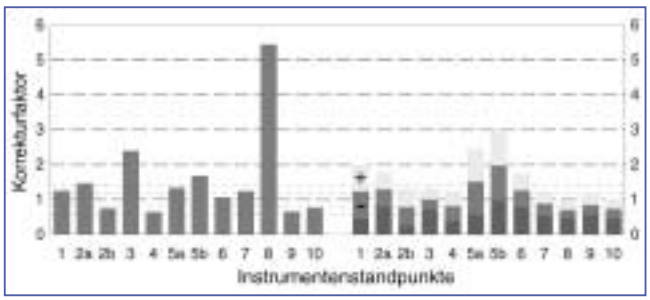

Abb. 4 Stpkt.weise Varianzkomponenten für Richtungen

wie bei den Zenitwinkeln; eine entsprechende Verifizierung ist in Abschn. 5.3 zu finden. Für die Genauigkeit der eigentlichen Richtungsmessung werden *0,25 mgon* angesetzt (vgl. Abschn. 5.2.1).

Als Ergebnisse der VKS sind wieder die Korrekturfaktoren dargestellt (vgl. Abb. 4, linke Seite).

Für Stpkt. 8 ergibt sich nach der VKS eine Abweichung im Genauigkeitsniveau um den *Faktor 5* gegenüber den meisten anderen Standpunkten. Dies widerspricht der Erwartung eines ähnlichen Ergebnisses wie in Abb. 3. Auch Stpkt. 3 weicht im Genauigkeitsniveau stark ab. Die Ursachen für die Abweichungen liegen jedoch in groben Fehlern, die während der Messung gemacht wurden. Bei beiden Standpunkten können die Abweichungen auf eine Stativ- bzw. Instrumentendrehung nach ungefähr der Hälfte der vorgenommenen Richtungsbeobachtungen zurückgeführt werden. Nach einer versuchsweisen Aufspaltung der Richtungssätze in zwei Sätze mit jeweils ca. 30 Beobachtungen und eigener Orientierungsunbekannten ergeben sich nach Wiederholung der VKS die in Abb. 4 auf der rechten Seite dargestellten Faktoren. Hier sind zusätzlich auch die errechneten Standardabweichungen der geschätzten Korrekturfaktoren durch die Unterteilung der Säulen in drei Abschnitte mit unterschiedlichen Grauwerten dargestellt. Der eigentliche Wert des Faktors ergibt sich aus der Säulenhöhe ohne die hellgraue Verlängerung. Die anderen Säulenabschnitte stellen die Unsicherheit des berechneten Faktors (+ bzw. –) dar. Jetzt weicht nur noch Stpkt. 5 recht stark nach oben ab. Dennoch kann man im Rahmen der angegebenen Standardabweichungen der Korrekturfaktoren wieder von einem einheitlichen Genauigkeitsniveau für alle Richtungssätze sprechen.

Durch die Modellierung der Stativverdrehungen, deren Größenordnung bei *1* bzw. *3 mgon* liegt, verringert sich die Standardabweichung für die Netzpunkte von durchschnittlich *0,3 mm* auf nahezu *0,1 mm*! Die Stellen, an denen die Richtungssätze aufzuteilen sind, lassen sich durch den Vergleich verschiedener Aufteilungsvarianten eindeutig identifizieren. Dieser findet anhand der Verbesserungsquadratsumme der Gruppe statt und ist dann erfolgreich, wenn das Minimum gefunden wird, bei dem zusätzlich keine groben Fehler mehr detektiert werden.

Die von Netzausgleichungsprogrammen in der Regel angewandten eindimensionalen Ausreißertests nach BAARDA (data-snooping) oder das Tau-Kriterium nach POPE sind nur für das Aufdecken von einigen wenigen groben Fehlern geeignet. Durch die Verdrehung in der Satzmitte werden wegen der gemeinsamen Orientierungsunbekannten für alle Richtungen des Satzes hier zwei komplette Sätze grob fehlerhaft. Dies führte zu einer einheitlichen Verschlechterung des gesamten Netzes und auch zur Detektion einiger grober Fehler, die sich jedoch auf alle gemessenen Sätze gleichmäßig verteilten. Nach der Berücksichtigung der beiden Verdrehungen erwiesen sich fast alle Detektionen von groben Fehlern als unzutreffend.

5.3 Das endgültige Varianzkomponentenmodell

Im endgültigen Varianzkomponentenmodell werden adaptive und Gruppenvarianzen kombiniert. Für die Strecken, Richtungen und Zenitdistanzen wird jeweils ein Varianzfaktor angesetzt. Bei den Richtungen und Zenitwinkeln ist dieser nach dem adaptiven Modell (24) weiter aufgespalten. Für beide Beobachtungsarten wird also die Visurgenauigkeit mit Hilfe eines Anzielfehlers modelliert. Als Startwerte werden jeweils *0,25 mgon* für die Messgenauigkeiten und *0,1 mm* für den Anzielfehler angenommen. Für den Anzielfehler erwartet man nach (27) zwar *0,05 mm*; es soll aber demonstriert werden, dass auch mit schlechteren Startwerten eine gute Konvergenz der iterativen VKS erzielt wird. Für die Strecken wird die bisherige Gewichtung beibehalten.

Als Ergebnisse für die stochastischen Modelle ergeben sich nach der VKS

a) für die **Zenitwinkel**

$$\sigma_z = \sqrt{((0{,}52 \pm 0{,}10)\,mgon)^2 + \frac{((0{,}047 \pm 0{,}012)\,mm)^2}{s^2} \cdot \rho^2}$$

b) für die **Richtungen**

$$\sigma_r = \sqrt{((0{,}18 \pm 0{,}04)\,mgon)^2 + \frac{((0{,}049 \pm 0{,}012)\,mm)^2}{s^2} \cdot \rho^2}$$

c) für die **Strecken**

$\sigma_s = (0{,}16 \pm 0{,}06)\ mm.$

(Mit ± sind immer die Standardabweichungen für die geschätzten Varianzkomponenten mit angegeben.)

Der Anzielfehler bei den Richtungen hat mit *0,049 mm* praktisch den gleichen Wert wie der bei den Zenitwinkeln *(0,047 mm)*. Der Anteil der Instrumentenmessgenauigkeit ist bei den Richtungen mit *0,18 mgon* jedoch deutlich besser als bei den Zenitwinkeln *(0,52 mgon)*. Dies lässt sich vielleicht mit dem geringeren Einfluss einer verbleibenden Stehachsschiefe auf die Horizontalrichtungen erklären.

In Abb. 5 wird das für die Zenitwinkel abgeleitete stochastische Modell der Gruppenvarianzen (vgl. (29) und Abb. 2) mit dem adaptiven Modell verglichen, das auf dem funktionalen Zusammenhang (24) beruht.

Die mit dem Ansatz des adaptiven Modells berechneten

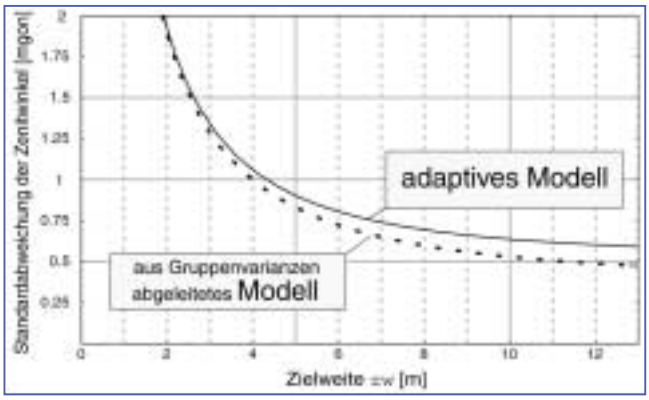

Abb. 5 Zielweitenabhängige Genauigkeit der Zenitwinkel

Fehleranteile für die Zenitwinkel (Messgenauigkeit: *0,52 mgon*, Anzielfehler: *0,047 mm*) stimmen gut mit denen nach (29) (*0,38 mgon* und *0,058 mm*) überein. Dies wird durch den Vergleich der beiden zugehörigen Funktionsverläufe deutlich.

5.4 Bewertung des Varianzkomponentenmodells

Zur Bewertung des abgeleiteten stochastischen Modells werden drei verschiedene Netzausgleichungsvarianten einander gegenübergestellt:

In der Netzvariante **ohne VKS** werden die Genauigkeiten der einzelnen Beobachtungsarten fest vorgegeben. Für die Richtungen wird wieder die Angabe der *0,25 mgon* von GOTTWALD (1985) verwendet. Der gleiche Wert soll auch für die Zenitwinkel gelten. Die Genauigkeiten der indirekt mit Basislatte bestimmten Strecken wird weiterhin durch die Varianzfortpflanzung aus der Richtungsgenauigkeit und der Kalibriergenauigkeit bestimmt (*0,16 mm* für eine *5-m-Strecke*).

In der zweiten Netzvariante mit **einfacher VKS** erfolgt die anfängliche Gewichtsfestlegung wie bei der Netzvariante ohne VKS; allerdings wird jetzt für jede der drei Beobachtungsgruppen eine Schätzung des Varianzniveaus durchgeführt.

Die dritte Netzvariante mit **erweiterter VKS** entspricht dem bereits erläuterten endgültigen stochastischen Modell des Präzisionsnetzes, bei dem die Varianzkomponenten für die Richtungen und Zenitwinkel nach dem adaptiven Modell weiter aufgespalten sind.

Der Vergleich der Varianten soll anhand folgender Kriterien erfolgen:

- Einfluss auf die Koordinatengenauigkeit,
- Einfluss auf Änderung in den Koordinaten,
- richtige Identifizierung grober Fehler
- Konvergenzverhalten.

5.4.1 Genauigkeit der Koordinaten

Zunächst sollen die erzielten Koordinatengenauigkeiten (Abb. 6, 7, 8) für die drei Netzvarianten gegenübergestellt werden. Dazu wollen wir die Verteilungsfunktionen für die Standardabweichungen in einfacher logarithmischer Darstellung benutzen.

Damit der besonders interessante Abschnitt mit den großen Standardabweichungen gut erkennbar wird, ist es erforderlich, die Differenz der Verteilungsfunktion zu 1 aufzutragen. Beispielsweise entnimmt man der Abb. 8, dass mit der erweiterten VKS (◆) nur etwa *5 %* der z-Koordinaten schlechter als *0,05 mm* sind, während bei den anderen Varianten dieser Wert etwa *10 %* beträgt.

Besonders deutlich wird der genauigkeitssteigernde Einfluss der erweiterten VKS an den vorkommenden Maximalwerten. Bei der z-Koordinate geht dieser von *0,085 mm* auf *0,06 mm* zurück (Abb. 8). Bei den Standardabweichungen der y-Koordinaten halbiert er sich sogar fast von *0,21 mm* auf *0,12 mm* (Abb. 7).

Während bei den x- bzw. y-Standardabweichungen be-

reits das einfache Varianzkomponentenmodell zu einer Homogenisierung des Genauigkeitsniveaus führt (die sich durch die erweiterte VKS aber nochmals deutlich verbessert), wird bei der z-Komponente erst durch das erweiterte Modell eine deutliche Verringerung der maximalen Standardabweichung erreicht.

Die wesentliche Verbesserung durch die VKS ist in der **Homogenisierung des Genauigkeitsniveaus** zu sehen. Betrachtet man dagegen nur die durchschnittlichen Genauigkeiten, die in Tab. 2 zusammengestellt sind, so ist nur noch eine deutliche Verbesserung der Koordinatengenauigkeit beim Vergleich der Varianten „ohne VKS“ und „einfache VKS“ zu sehen. Ansonsten scheint die VKS keine Verbesserung zu bringen.

Wir halten fest: Der **Durchschnittswert** ist als alleiniges

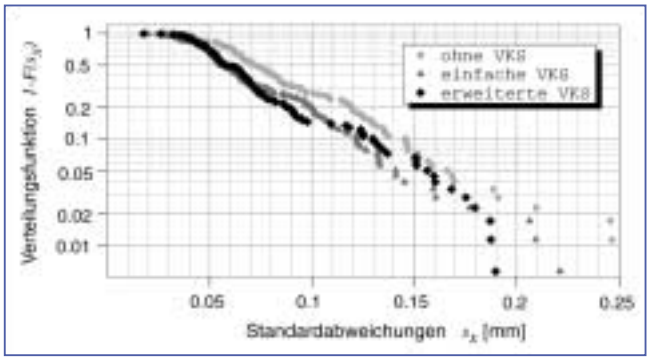

Abb. 6 Einfluss der VKS auf die Genauigkeit der x-Koordinate

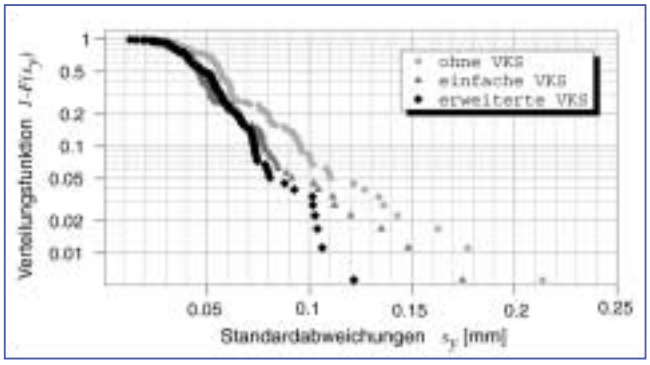

Abb. 7 Einfluss der VKS auf die Genauigkeit der y-Koordinate

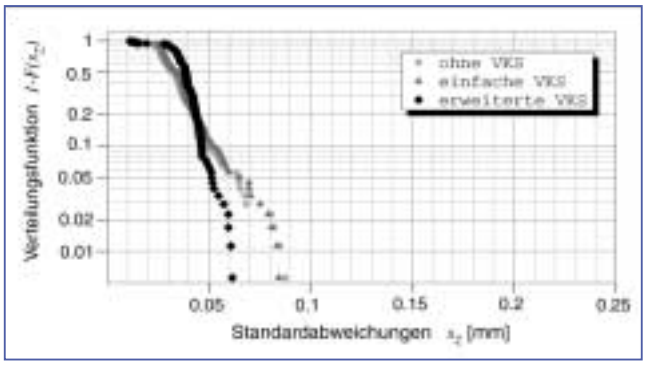

Abb. 8 Einfluss der VKS auf die Genauigkeit der z-Koordinate

Tab. 2 Durchschnittliche Koordinatengenauigkeit

Netzvariante	s_x [mm]	s_y [mm]	s_z [mm]
ohne VKS	0,09	0,06	0,03
einfache VKS	0,07	0,05	0,04
erweiterte VKS	0,07	0,05	0,04

Maß für die Genauigkeitsbeurteilung eines komplexen Netzes als Qualitätsmaß **nur bedingt geeignet.** Die möglichst gleiche Genauigkeit der *x-, y-, z*-Komponenten in der 3D-Punktbestimmung wird erst durch die erweiterte VKS erreicht.

Verbleibende Genauigkeitsunterschiede zwischen *x*- und *y*-Komponente können damit erklärt werden, dass die *x*-Achse annähernd parallel zur langen Seite des Raumes ist. Aufgrund der höheren Redundanz und des ebenen Verlaufs der Beschleunigeranlage ist die Höhenkomponente am besten bestimmt.

5.4.2 Änderung der Koordinaten

Anhand der Darstellung der Verteilungsfunktionen für die Koordinatenänderungen in den Abb. 9 und 10 wird ersichtlich, dass es durch die adaptive Aufspaltung der Varianzkomponenten zu Koordinatenänderungen kommt. Diese sind größer als die Koordinatenänderungen, die durch eine „einfache VKS“ (verglichen mit der Variante „ohne VKS“) auftreten. Die Größenordnung

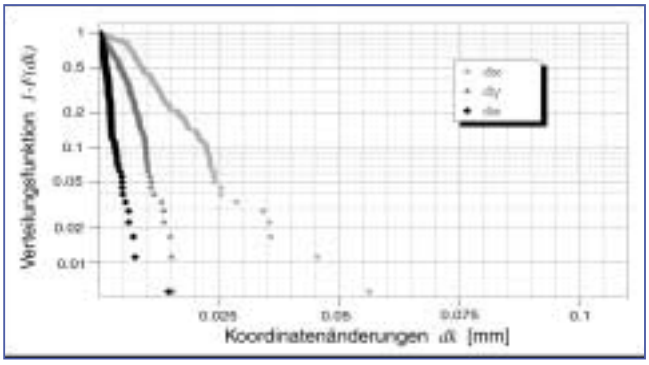

Abb. 9 Koord.vgl. zwischen „ohne“ und „einfacher VKS“

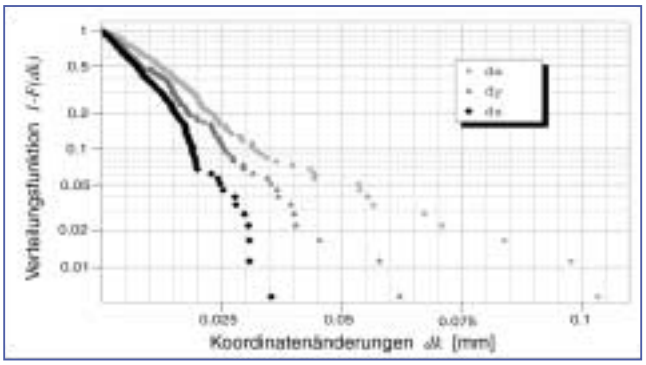

Abb. 10 Koord.vgl. zwischen „einfacher“ und „erweiterter VKS“

der Koordinatenänderungen bleibt jedoch stets im Bereich ihrer Standardabweichungen.

5.4.3 Detektion grober Fehler

Nach der Netzausgleichung mit dem erweiterten Varianzkomponentenmodell ergibt sich eine signifikante Änderung der Anzahl der detektierten groben Fehler. Die Hälfte der zuvor detektierten groben Fehler erwies sich als unzutreffend, so dass letztlich nur noch fünf grobe Fehler im ganzen Netz auszusortieren sind. Dies betrifft vor allem Zielungen mit kurzen Zielweiten. Bei diesen treten die größten Widersprüche auf. Nach dem verbesserten stochastischen Modell ist dies jedoch zu erwarten, so dass ein Großteil der zuvor als grob fehlerhaft detektierten Messungen bei einer entsprechend geringeren Gewichtszuweisung wieder in die Netzausgleichung mitaufgenommen werden kann, ohne zu einer Verschlechterung des Ergebnisses zu führen.

5.4.4 Konvergenzverhalten

Abschließend wird noch das Konvergenzverhalten der VKS für die Fälle „einfache VKS“ und „erweiterte VKS“ dargestellt. Entsprechend den Ausführungen bei Formel (11) ist das Ziel erreicht, wenn die Schätzung der Varianzkomponenten gegen 1 konvergiert, und sich die Varianzkomponenten der iterierten Schätzung (= Produkt aller Einzelschätzungen mit dem ursprünglichen Näherungswert) nicht mehr signifikant ändern.

Beim Ansatz von drei verschiedenen Gruppenvarianzen wird eine sehr schnelle Konvergenz erzielt.

Tab. 3 Konvergenzverlauf und Ergebnisse der einfachen VKS

	Varianzkomponente nach Iteration				Standardabweichungen	
	1	**2**	**3**	**4**	Näherung	Schätzung
Strecken	1,014	0,993	1,001	1,000	0,16 mm	0,16 mm
Richtungen	6,937	0,971	0,999	1,000	0,25 mgon	0,65 mgon
Zenitwinkel	11,411	1,008	1,001	1,000	0,25 mgon	0,85 mgon

Man errechnet beispielsweise für die Zenitwinkel eine Standardabweichung nach (12) und (14), wie folgt:

$$0{,}25\,mgon\sqrt{11{,}411 \cdot 1{,}008 \cdot 1{,}001} = 0{,}85\,mgon$$

Der Konvergenzverlauf verlangsamt sich dagegen bei dem Ansatz von adaptiven Varianzen (Abb. 11). Besonders bei den adaptiven Komponenten zu den Richtungsbeobachtungen wird zwar zunächst eine sehr schnelle Konvergenz in den Bereich von *1,02* erzielt. Danach verlangsamt sich der Konvergenzverlauf deutlich, wobei insbesondere die stochastische Modellierung der tatsächlichen Messgenauigkeit der Zenitwinkel (▲) einen gewissen nummerischen Aufwand erfordert.

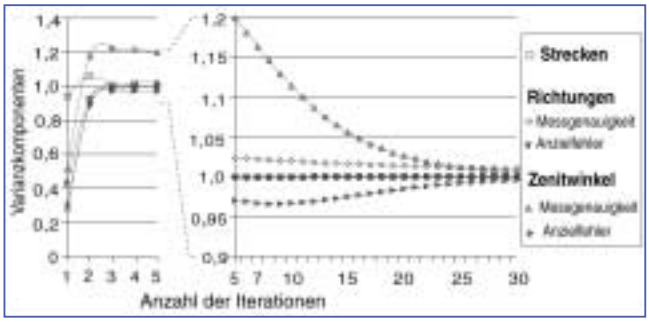

Abb. 11 Konvergenzverlauf für erweiterte VKS

5.5 Fazit

Über eine Einteilung der Messungen eines Beobachtungstyps in weitere Untergruppen ist es **möglich,** mit der VKS **stochastische Modelle für einzelne Beobachtungsarten zu verifizieren.**

Für das hochredundante Präzisionsnetz konnte mit der VKS ein adäquates stochastisches Modell aufgestellt und dadurch eine deutliche **Homogenisierung der Koordinatengenauigkeiten erreicht** werden. Die maximalen Standardabweichungen einzelner Koordinatenkomponenten konnten bei den ungenauesten Punkten dadurch auf nahezu die Hälfte reduziert werden.

Durch die kombinierte Anwendung von adaptiven und Gruppenvarianzen genügte der **Ansatz von nur 5 Komponenten,** um die besonders signifikanten Varianzniveaus zu ermitteln.

Es konnte im Weiteren gezeigt werden, dass mit einem zielweitenabhängigen stochastischen Modell eine **sinnvollere Identifikation grober Fehler möglich** ist. Nach der optimalen Anpassung wurden nur noch ganz vereinzelt grobe Fehler detektiert, und es ließen sich ungefähr zehn vorher aussortierte Messungen wieder in die Netzberechnung aufnehmen.

Als Nebeneffekt zeigen die Untersuchungen, dass es bei entsprechender Gruppeneinteilung mit der VKS gelingen kann, Gruppen von Beobachtungen mit vielen groben Fehlern (Stativverdrehung) von solchen mit keinen groben Fehlern zu unterscheiden.

Aus den Ergebnissen geht klar hervor, dass eine **einheitliche Gewichtsfestlegung** für alle Richtungen und Zenitwinkel bei Messungen **im Nahbereich als stochastisches Modell völlig unzureichend** ist. Gegenüber dem Ansatz von nur einer Varianzkomponente beispielsweise für die Zenitwinkel, bei dem sich eine Genauigkeit von *0,85 mgon* ergibt (Tab. 3), schwankt die Genauigkeit nach den Ergebnissen der adaptiven Aufspaltung (Abb. 5) von *1,9 mgon* bei einer *2-m-Zielung* bis unter *0,6 mgon* bei *13 m*. Wird dies nicht beachtet, sondern nur das durchschnittliche Varianzniveau von *0,85 mgon* für die Zenitwinkel ermittelt, dann werden kurze Zielungen bevorzugt als grob fehlerhaft detektiert, während die Untergewichtung der langen Zielungen dazu führt, dass nur über größere Zielweiten bestimmte Punkte als zu ungenau eingeschätzt werden.

Ferner ergab sich bei einer sinnvollen Einteilung der Gruppenvarianzen ein gutes Konvergenzverhalten der VKS. Dieses unterstreicht zusätzlich die richtige Aufstellung des stochastischen Modells.

Bei der Verwendung der adaptiven Varianzen ist die Konvergenz langsamer, weil neben der Abstimmung zwischen den verschiedenen Gruppen auch eine Abstimmung innerhalb der Gruppe selbst erfolgen muss. Wenn ein für die Beobachtungen adäquates **adaptives Modell** vorliegt, mit dem signifikante Varianzkomponenten geschätzt werden, sollte man dieses (trotz langsamerer Konvergenz) einer Einteilung in viele verschiedene Gruppenvarianzen **vorziehen,** da so einer Überparametrisierung des stochastischen Modells vorgebeugt wird.

6 Anwendungen bei der Kombination von terrestrischen mit GPS-Messungen

6.1 Vorbetrachtungen

In diesem Abschnitt wird der Einsatz der VKS zur optimalen Kombination von terrestrischen mit GPS-Messungen bei der Anlage eines lokalen Netzes beschrieben.

Zunächst erfolgt eine separate Ausgleichung von terrestrischen Netzmessungen und ausgewerteten GPS-Sessions.

Anschließend wird eine kombinierte Ausgleichung durchgeführt, auf deren Grundlage die Einflüsse unzureichender stochastischer Modelle bei GPS-Auswertesoftware diskutiert werden.

Schließlich kann gezeigt werden, dass auch bei einer Verknüpfung von terrestrischen Teilnetzen mit einzelnen unabhängigen GPS-Basislinien eine gute Integration gelingen kann.

6.2 Netzberechnungen mit terrestrischen Messelementen

Mit Abb. 12 soll zunächst die Netzkonfiguration veranschaulicht werden. Insgesamt besteht das Netz aus 24 Strecken (12 Netzverbindungen sind von beiden Seiten gemessen), 7 Richtungssätzen mit insgesamt 28 Richtungen und 52 Zenitwinkeln. Davon gehören 48 zu 24 Paaren gleichzeitig gegenseitig beobachteter Zenitwinkel.

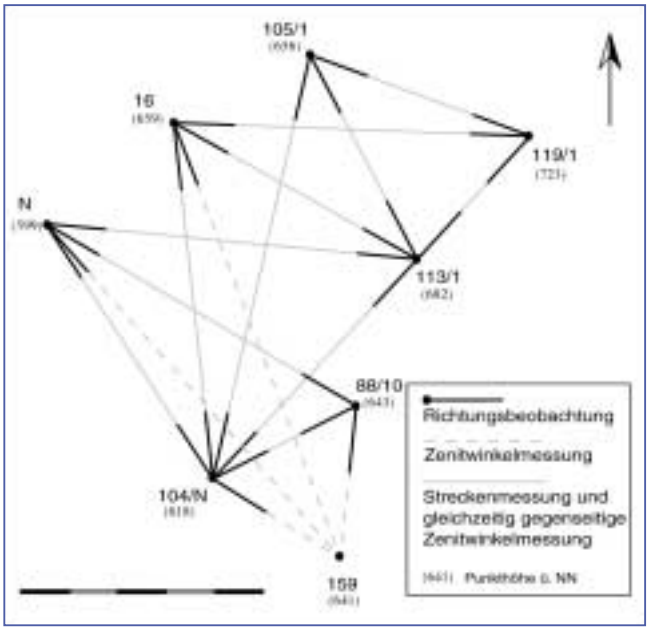

Abb. 12 Terrestrische Messelemente im lokalen Netz

Für jeden Beobachtungstyp wird eine Varianzkomponente angesetzt. Die Strecken untereinander werden nach der Genauigkeitsannahme *2 mm + 2 ppm* gewichtet. Innerhalb der anderen beiden Beobachtungsgruppen erfolgt eine einheitliche Gewichtung. Für eine Aufspaltung in streckenabhängige und unabhängige Anteile nach dem adaptiven Varianzkomponentenmodell ist die verfügbare Redundanz nicht ausreichend.

Die Ergebnisse der Netzausgleichung sind in Tab. 4 und die der VKS in Tab. 5 zusammengefasst.

Tab. 4 Durchschnittliche Standardabweichungen

s_x [mm]	s_y [mm]	s_z [mm]
2,2	2,0	3,3

Tab. 5 Ergebnisse der Varianzkomponentenschätzung

Typ der Beobachtung	Std.abweichg. nach VKS	Genauigkeit der geschätzten Standardabweichung		Redundanzanteil
		absolut	relativ	
Strecke (1 km)	3,5 mm	1,3 mm	39 %	14,3
Richtung	0,51 mgon	0,16 mgon	35 %	17,7
Zenitwinkel	0,72 mgon	0,20 mgon	33 %	19

Da im Verlauf der Netzmessung über vielen Punkten Stative mehrfach aufgebaut wurden und die Vermarkungsart der Punkte (z. B. Rohr) die Zentriergenauigkeit begrenzt, kann man das Ergebnis als sehr gut bezeichnen.

6.3 Netzberechnung mit GPS-Sessions

Unter einer GPS-Session versteht man normalerweise die gleichzeitige Besetzung von *e* Netzpunkten mit *e* Empfängern. Nach einer vorgegebenen Beobachtungszeit werden dann alle Empfänger umgebaut, um die nächste Session zu messen. Dieses Schema wurde bei der Netzmessung nicht eingehalten.

Der tatsächliche Besetzungsablauf an den beiden GPS-Messtagen ist in den Abb. 13, 14 dargestellt. Man sieht mehrere Empfängerumsetzungen, so dass auf jedem der sieben GPS-Punkte irgendwann einer von vier Empfängern stand, während der fünfte Empfänger fest auf einer Station (der Referenzstation) blieb. Der Besetzungsablauf lässt bei der Auswertung außer einer tageweisen Einteilung in zwei Sessions keine weitere sinnvolle Unterteilung der Messungen eines Tages in weitere (drei) Einzelsessions zu. Dadurch würde eine zu große Anzahl von unabhängigen Messungen vorgetäuscht, denn schließlich wurden immer nur zwei der fünf Empfänger zwischendurch umgesetzt.

Als beste Möglichkeit wird die Gesamtauswertung aller

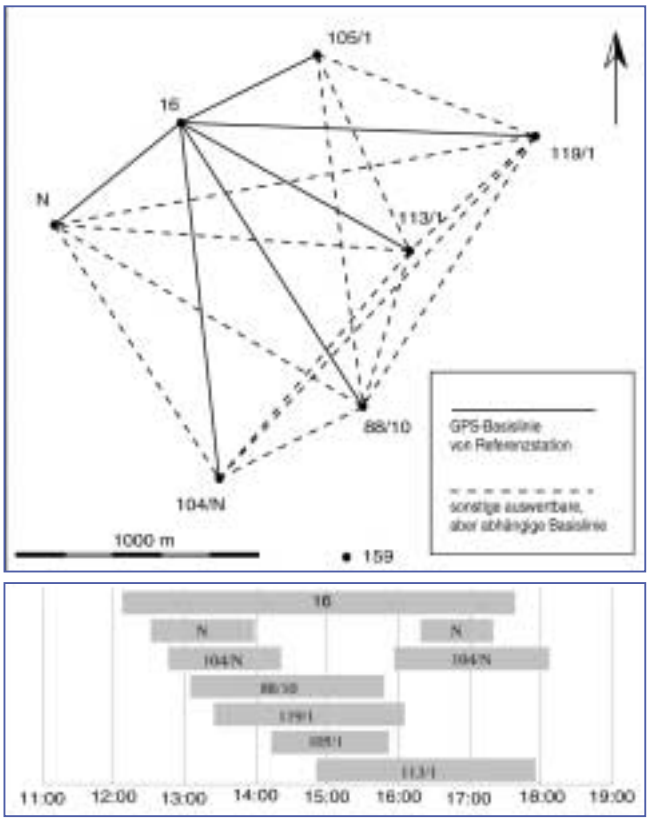

Abb. 13 Session 1

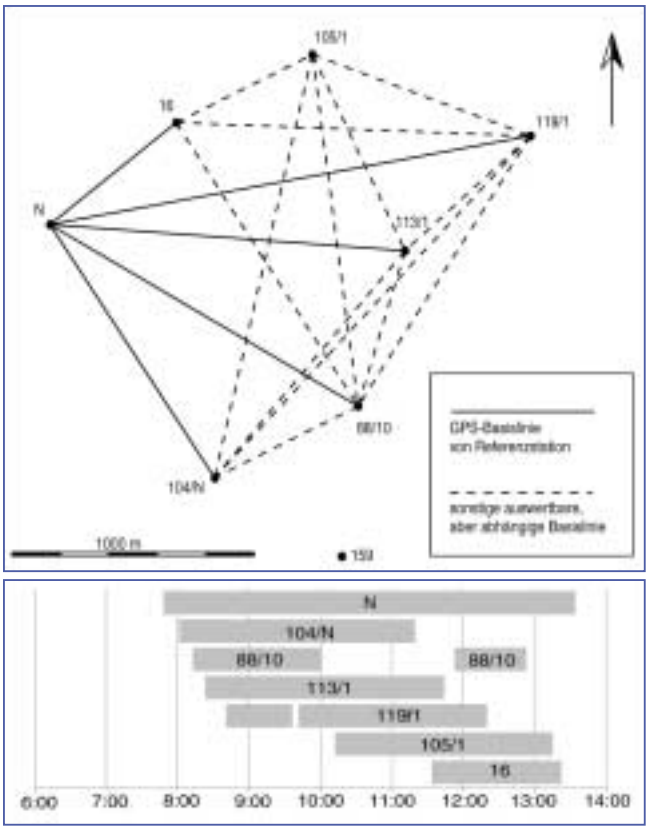

Abb. 14 Session 2

Phasenbeobachtungen des jeweiligen Tages in einer einzigen GPS-Auswertung angesehen. Auf diese Weise erhält man für jeden Tag einen Koordinatensatz, der hier weiterhin als Sessionauswertung bezeichnet wird. Das Ergebnis der Vorauswertung sind also zwei Sessionlösungen, die mit der BERNER SOFTWARE berechnet wurden.

Für die Berechnung gibt man einen der beteiligten Punkte als Referenzpunkt mit WGS-Koordinaten vor. Als Ergebnis der GPS-Auswertung erhält man dann Koordinaten für die übrigen sechs Punkte und eine vollbesetzte Matrix mit Kovarianzinformationen. Der Referenzpunkt dient der Datumsfestlegung der Translationsfreiheitsgrade.

Für die folgende Netzausgleichung wird diese Datumsinformation durch die Bildung von *6 x 3* Koordinatendifferenzen zwischen der Referenzstation und den übrigen Punkten wieder beseitigt. Die Kovarianzinformation ist über eine einfache Varianzfortpflanzung ebenfalls umzurechnen. Diese Umrechnung entfällt, wenn der Referenzpunkt bei der GPS-Auswertung als fehlerfrei angesehen wurde. Dann ist die Kovarianzinformation für den jeweiligen Endpunkt, auf den sich die Koordinatendifferenzen beziehen, mit der Kovarianzinformation der Koordinatendifferenzen identisch.

Anstelle der Berechnung von Koordinatendifferenzen oder Basislinien bezüglich des Referenzpunktes (durchgezogene Linien in den Abb. 13, 14) können allerdings auch sechs beliebige andere linear unabhängige Basislinien ausgewählt werden. Bei richtiger Umrechnung der Kovarianzinformation führen bei der späteren Netzausgleichung sämtliche Repräsentationsmöglichkeiten der beiden Session-Lösungen zum gleichen Endergebnis.

In den Abb. 13, 14 sind neben den 6 linear unabhängigen Basislinien, die von der Referenzstation ausgehen, noch alle weiteren Basislinien eingezeichnet, die Punkte verbinden, auf denen zeitgleich Empfänger standen. Alle diese Netzverbindungen kann man als direkt durch GPS verknüpft bezeichnen.

Beide so erzeugten Session-Lösungen können jetzt einer korrelierten Netzausgleichung unterzogen werden. Die Gewichtung der Basislinien/Koordinatendifferenzen erfolgt mit den sessionweise voll besetzten Kovarianzmatrizen.

Für die Netzausgleichung wird zunächst ein einheitlicher Varianzfaktor für beide GPS-Sessions angesetzt, so dass die hier durch die VKS berechnete Varianzkomponente der Schätzung der Varianz der Gewichtseinheit entspricht. Zusätzlich erhält man aber noch ein Genauigkeitsmaß für diese Schätzung.

Die Ergebnisse der Netzausgleichung sind in Tab. 6 und die der VKS in Tab. 7 zusammengefasst.

Die Genauigkeit der GPS-Sessions stellt sich als *22,6fach* überschätzt heraus (Tab. 7). Dies hängt mit den vielen Phasenmessungen zusammen, die für einen extrem hohen Redundanzwert von *mehreren 10 000* bei der GPS-Auswertung sorgen. Da die Korrelationen zwischen diesen Phasen von der GPS-Auswertesoftware nicht vollständig berücksichtigt werden, ergibt sich eine deutliche Überschätzung der GPS-Messgenauigkeit in der Vorausgleichung.

Tab. 6 Durchschnittliche Standardabweichungen

s_x [mm]	s_y [mm]	s_z [mm]
1,9	1,5	3,3

Tab. 7 Ergebnisse der Varianzkomponentenschätzung

Typ der Beobachtung	Std.abweichg. nach VKS	Genauigkeit der geschätzten Standardabweichung		Redundanz-anteil
		absolut	relativ	
GPS	22,6 x *)	7,5 x	33 %	18

*) Bei GPS ist der Faktor angegeben, mit dem die Genauigkeiten a priori zu multiplizieren sind, um die Genauigkeiten nach der VKS zu erhalten.

Die mit GPS erreichten Koordinatengenauigkeiten entsprechen denen der terrestrischen Lösung. Die durchschnittlichen Unterschiede in den Koordinaten zwischen der GPS-Lösung und der terrestrischen Lösung liegen für die *x*-, *y*- und *z*-Koordinate bei *1,5 mm, 1,9 mm* bzw. *4,1 mm*. Diese Abweichungen entsprechen den berechneten Standardabweichungen der Koordinaten und bestätigen damit die Schätzung des GPS-Varianzfaktors aus der Session-Kombination.

Da die beiden Netzlösungen sehr gut übereinstimmen, sind bei einer Kombination aller Beobachtungen in einer gemeinsamen Netzausgleichung an den Koordinaten keine großen Änderungen mehr zu erwarten.

6.4 Ergebnisse einer kombinierten Netzberechnung

Die Ergebnisse der gemeinsamen Netzberechnung mit allen Messungen sind in Tab. 8, 9 zusammengestellt.

Aus Tab. 8 wird ersichtlich, dass sich GPS- und terrestrische Lösung nur geringfügig unterscheiden, was überdies auch für die mitbestimmten Maßstabsunbekannten der gemessenen Strecken und die der GPS-Sessions gilt (Unterschied = *5 ppm*). Erwartungsgemäß bringt die Kombinationslösung entsprechend der Erhöhung der Gesamtredundanz eine Genauigkeitssteigerung für die Koordinaten, sie wird deshalb für weitere Untersuchungen als Referenzlösung verwendet.

Die Ergebnisse in Tab. 9 zeigen, dass sich die geschätzten Varianzkomponenten durch die Zusammenführung aller Messelemente gegenüber den beiden Einzelauswertungen (terrestrisch/GPS) nur noch marginal ändern.

Da die GPS-Sessions ein eigenes redundantes Netz bilden, kann die richtige Genauigkeitsfestlegung der GPS-Messungen auch schon in einer reinen GPS-Ausgleichung erfolgen, ohne dass ein Netzausgleichungsprogramm mit VKS benötigt wird.

Die Notwendigkeit einer richtigen Genauigkeitsfestlegung der GPS-Messungen zur optimalen Kombination mit terrestrischen Beobachtungen soll mit den Untersuchungen im folgenden Abschnitt gezeigt werden.

Tab. 8 Durchschnittliche Koordinatengenauigkeiten

Netzausgleichung	s_x [mm]	s_y [mm]	s_z [mm]
terrestrisch	2,2	2,0	3,3
GPS	1,9	1,5	3,2
Kombination	1,8	1,6	3,0
Koordinatendiff. terrestrisch und GPS	zum Vgl. 1,5	zum Vgl. 1,9	zum Vgl. 4,1

Tab. 9 Ergebnisse der Varianzkomponentenschätzung

Typ der Beobachtung	Std.abweichg. nach VKS	Genauigkeit der geschätzten Standardabweichung		Redundanz-anteil
		absolut	relativ	
Strecke (1 km)	3,4 mm	1,3 mm	36 %	17,7
Richtung	0,51 mgon	0,16 mgon	33 %	18,4
Zenitwinkel	0,71 mgon	0,20 mgon	33 %	20,4
GPS	22,1 x *)	6,4 x	29 %	26,4

*) Bei GPS ist der Faktor angegeben, mit dem die Genauigkeiten a priori zu multiplizieren sind, um die Genauigkeiten nach der VKS zu erhalten.

6.5 Bedeutung einer richtigen Gewichtung

Wir wollen uns nun eine Vorstellung von der zu erwartenden Größenordnung des Gewichtseinflusses bei GPS-Messungen machen; er soll anhand weiterer Ausgleichungsvarianten ohne VKS illustriert werden.

Wir geben dazu alle Gewichte fest vor und berechnen nur die Varianz der Gewichtseinheit: Für die terrestrischen Messelemente werden die „richtigen“ Gewichte aus der VKS übernommen. Die GPS-Kovarianzmatrizen dagegen führen wir so in die Ausgleichung ein, wie sie aus der GPS-Auswertesoftware erhalten wurden. Dies bedeutet eine *22fache* Überschätzung der Genauigkeit.

In einem weiteren Fall soll die Genauigkeit für GPS um den Faktor 2 vom realen Wert abweichen. Ein solcher Wert kann etwa angenommen werden, wenn ein Auswerter bereits viel Erfahrung mit GPS-Auswertungen hat und so ungefähr abschätzen kann, um wie viel die Genauigkeit verschlechtert werden muss. Der Verschlechterungsfaktor kann jedoch von der Beobachtungsdauer, der verwendeten Auswertesoftware, der Basislinienlänge, der Sonnenfleckenaktivität etc. abhängen, so dass es nicht leicht ist, ohne VKS das richtige Varianzniveau für die Messungen ausreichend genau zu bestimmen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 15 zusammengestellt. Auf der linken Seite sind die Änderungen der Punktkoordinaten gegenüber der Referenzlösung (kombinierte Netzausgleichung mit VKS) dargestellt. Die Koordinatenänderungen sind als prozentuales Verhältnis bezüglich ihrer Standardabweichungen angegeben.

Wie schon im vorigen Abschnitt angedeutet, kommt es bei den Koordinaten zu keinen größeren Änderungen mehr. Entsprechend der Stärke der Übergewichtung der GPS-Sessions tendiert die Lösung mehr oder weniger

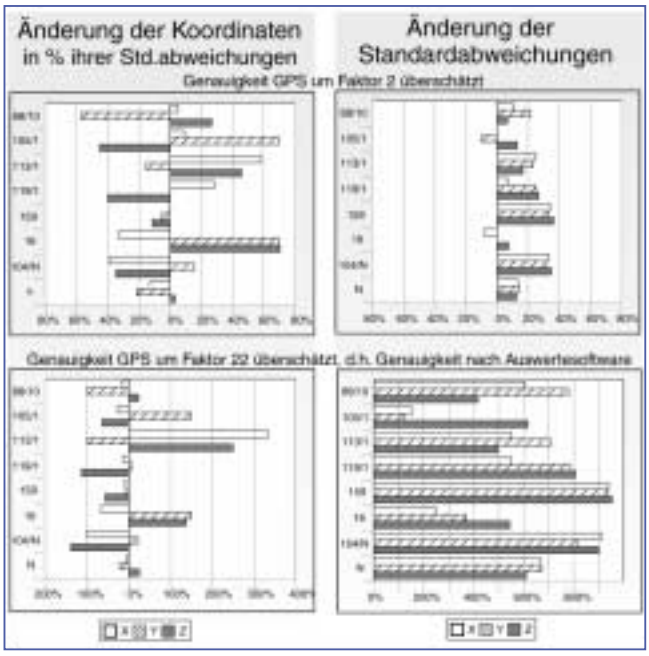

Abb. 15 Einfluss falscher Gewichtung von GPS-Messungen

zur GPS-Lösung. Die Schwankungsbreite wird hier durch die beiden sich wenig unterscheidenden Lösungen vorgegeben.

Wesentlich stärker ist der Einfluss einer falschen Gewichtung auf die Genauigkeitsangaben. Bei Verwendung der originalen GPS-Kovarianzinformation werden die Punktgenauigkeiten um ein Vielfaches zu schlecht geschätzt. Die Kombinationslösung erscheint dadurch absolut unbrauchbar.

Aber auch bei einer nur zweifachen Überschätzung der GPS-Genauigkeit werden um *20 %* schlechtere Koordinatengenauigkeiten geschätzt. Dies entspricht ungefähr dem Genauigkeitsgewinn, der durch die Hinzunahme der GPS-Beobachtungen bei der kombinierten Ausgleichung erzielt wurde!

Um bei der Kombinationsausgleichung einen Genauigkeitsgewinn zu erzielen, ist deshalb eine gute Schätzung des Varianzniveaus unbedingte Voraussetzung.

Ferner deuten die oberen Diagramme in Abb. 15 an, dass die Auswirkung auf die Koordinaten auch größer sein kann als die Auswirkung auf die Genauigkeitsmaße. Dies ist natürlich wesentlich gefährlicher, als wenn die Koordinaten tatsächlich noch sehr gut sind und nur die Fehlermaße zu pessimistisch berechnet werden. Allerdings bleiben die Koordinatenänderungen hier im Bereich der Standardabweichungen der Koordinaten (maximal 80 % der Standardabweichung), so dass hier keine reale Gefahr besteht.

6.6 Netzberechnung mit GPS-Basislinien

Wenn keine Software zur sessionweisen Auswertung von GPS-Messungen zur Verfügung steht, hat man nur die Möglichkeit, einzelne Basislinien auszuwerten. Dafür bieten sich prinzipiell zwei Möglichkeiten an:

Im **ersten Fall,** der im Folgenden als **Kettenauswertung** bezeichnet wird, berechnet man alle auswertbaren Basislinien. Dies sind die Basislinien zwischen all den Paaren von Netzpunkten, auf denen im Verlauf der Messungen gleichzeitig Empfänger standen. Im Auswerteprogramm SKI von LEICA kann dies durch eine automatische Kettenberechnung geschehen. Auf diese Weise erhält man für das Grundlagennetz 50 (!) Basislinien (alle gestrichelten und durchgezogenen Linien in den Abb. 13, 14; entsprechend der Umsetzung der Empfänger gibt es innerhalb einer Session einige Basislinien doppelt). Dieses Vorgehen führt allerdings dazu, dass eine erhöhte Redundanz vorgetäuscht wird.

In reinen GPS-Netzen ist es für die Zuverlässigkeit des Netzes erforderlich, jeden Punkt mindestens zweimal unabhängig voneinander zu besetzen. Dadurch können dann bei geeigneter Netzanlage in der Regel grobe Fehler bei der Messung der Antennenhöhe oder falsch berechnete Basislinien aufgedeckt werden.

Durch die Berechnung aller Basislinien werden dem weiterverarbeitenden Netzausgleichungsprogramm mehrfache Punktbesetzungen vorgetäuscht, die tatsächlich aber gar nicht stattgefunden haben. Dadurch erscheint auch ein nur einfach besetzter Punkt als zuverlässig bestimmt.

Durch die unabhängige Berechnung der einzelnen Basislinien kommt es bei geschlossenen Linienzügen, z. B. einem Dreieck, immer zu Widersprüchen, auch wenn alle Basislinien zu einer Session gehören.

Im **zweiten Fall, Referenzpunktauswertung** genannt, werden von einer Session nur die von der Referenzstation ausgehenden Basislinien (durchgezogene Linien in Abb. 13, 14) ausgewertet. Bei dieser Form der GPS-Auswertung werden keine mehrfachen Punktbesetzungen vorgetäuscht. Allerdings ist die Auswahl eines der an der Session beteiligten Empfängers als Referenzstation mit einer gewissen Willkür verbunden. Je nach Wahl des Referenzpunktes werden andere Basislinien in die spätere Netzausgleichung einbezogen. Da diese unabhängig voneinander berechnet werden, bleibt unberücksichtigt, dass vom Referenzpunkt immer wieder die gleichen originären Phasenmessungen in alle Basislinienberechnungen eingehen. Somit hängt das Endergebnis in jedem Fall von der Wahl des Referenzpunktes ab.

Für die „Kettenauswertung“ und für die „Referenzpunktauswertung“ können Varianzkomponenten in einer reinen GPS-Ausgleichung der Basislinien oder in einer Kombination mit den terrestrischen Werten geschätzt werden. Auch hier zeigt sich, dass in einer alleinigen GPS-Ausgleichung bereits das gleiche Varianzniveau geschätzt wird wie bei der Kombination mit der terrestrischen Auswertung. Die Widersprüche, die entsprechend der vorhandenen Redundanz den Basislinien selbst innewohnen, passen bezüglich der VKS gut zu den Widersprüchen, die bei einer Kombination zu den terrestrischen Beobachtungen auftreten.

Ein Vergleich mit der kombinierten Netzausgleichung bei Verwendung der GPS-Sessionlösung (vgl. Tab. 9)

zeigte praktisch identische Werte für die Varianzniveaus, wobei die Genauigkeitsangaben für die SKI-Basislinien ungefähr um den gleichen Faktor überschätzt werden wie die der Sessionlösungen der BERNER SOFTWARE.

Die geschätzten Koordinatengenauigkeiten der Netzausgleichung mit Basislinien und die Abweichung der berechneten Koordinaten von der Referenzlösung sind in Tab. 10 dargestellt.

Bei einem ersten Vergleich der Ergebnisse erkennt man, dass die durchschnittlichen Abweichungen zur Referenzlösung bei der Netzausgleichung mit den Basislinien der „Referenzpunktauswertung" verglichen mit der der „Kettenauswertung" mehr als das Doppelte betragen. Möchte man die bestmöglichen Koordinaten erhalten, ist die Kettenauswertung eindeutig vorzuziehen.

Grundsätzlich muss jedoch festgestellt werden, dass die Angaben zur erzielten Genauigkeit (sowohl die der „Kettenauswertung" als auch die der „Referenzpunktauswertung") in jedem Fall als zu optimistisch anzusehen sind. Insbesondere wenn man für einen fundierten Vergleich die Ergebnisse der Netzausgleichung mit der GPS-Session-Auswertung (Tab. 8) heranzieht. Hier passen die Koordinatenabweichungen zwischen terrestrischer und GPS-Lösung gut zu den angegebenen Genauigkeiten aus den einzelnen Netzausgleichungen. Die Genauigkeit der GPS-Sessions aus der BERNER SOFTWARE kann offensichtlich durch die VKS richtig beurteilt werden.

Dies ist bei der Verwendung von mit SKI ausgewerteten Basislinien anders. Der Vergleich in Tab. 10 zeigt, dass die Genauigkeitsangaben in beiden Fällen etwa um den Faktor zwei zu optimistisch sind. Wäre dies nur bei der Netzausgleichung mit den Basislinien der „Kettenauswertung" der Fall, so könnte man dies mit der dort künstlich erhöhten Redundanz erklären. Da der gleiche Widerspruch jedoch auch bei der Netzausgleichung mit den Basislinien der „Referenzpunktauswertung" auftritt, ist die Ursache wohl eher in dem unzureichenden Fehlermodell für die Basislinienauswertung zu vermuten.

Durch die teilweise Verwendung der gleichen Phasenbeobachtungen ohne Berücksichtigung der mathematischen Korrelationen passen die Basislinien untereinander wesentlich besser zueinander, als dies bei völlig unabhängig voneinander gemessenen Basislinien der Fall wäre. So kommt es zu einer Überschätzung der Genauigkeit.

Tab. 10 Durchschnittliche Koordinatengenauigkeiten

	Koordinatendifferenz zur Referenzlösung [mm]			Standardabweichung [mm]		
	d_x	d_y	d_z	s_x	s_y	s_z
„SKI-Kettenauswertung"	2,3	1,6	3,8	1,1	0,8	1,9
„SKI-Ref.pkt.-auswertung"	6,7	2,3	9,8	2,7	1,7	4,8
Referenzlösung				1,8	1,6	3,0

Auch die Basislinien der Referenzpunktauswertung sind durch die gemeinsame Benutzung der Phasenbeobachtungen des Referenzpunktes eigentlich stark miteinander korreliert. Dies kann man jedoch bei der Netzausgleichung nicht berücksichtigen, da von SKI nur Kovarianzinformation für jede Basislinie einzeln angegeben wird. Das Defizit des stochastischen Modells innerhalb der GPS-Basislinien kann dann durch den Ansatz einer Gruppenvarianz für alle GPS-Basislinien in der VKS nicht wettgemacht werden.

6.7 Test auf Gleichwertigkeit der Beobachtungen . . .

Entsprechend den Untersuchungen zum Präzisionsnetz soll jetzt auch für die GPS-Messungen analysiert werden, inwieweit ein einheitliches Genauigkeitsniveau der Messungen vorliegt und ob eine weitere Unterteilung der Gruppen möglich ist.

6.7.1 . . . bei unterschiedlichen GPS-Sessions

Entsprechend ZHONG (1997) unterscheiden sich unter Umständen bereits einzelne Sessions deutlich in ihrer Genauigkeit. Es bietet sich daher an, die kombinierte Netzberechnung zu wiederholen und dabei für jede der beiden GPS-Sessions eine eigene Varianzkomponente anzusetzen. Als Ergebnis erhält man die in Tab. 11 aufgeführten Werte.

Tab. 11 Ergebnisse der VKS mit zwei GPS-Sessions

Typ der Beobachtung	Std.abweichg. nach VKS	Genauigkeit der geschätzten Standardabweichung		Redundanzanteil
		absolut	relativ	
Strecke (1 km)	3,3 mm	1,1 mm	33 %	17,9
Richtung	0,53 mgon	0,18 mgon	33 %	18,5
Zenitwinkel	0,71 mgon	0,23 mgon	32 %	20,6
GPS-Session 1	27,0 x *)	10,8 x	40 %	13
GPS-Session 2	16,4 x *)	8,5 x	52 %	13

*) Bei GPS ist der Faktor angegeben, mit dem die Genauigkeiten a priori zu multiplizieren sind, um die Genauigkeiten nach der VKS zu erhalten.

Die beiden GPS-Sessions unterscheiden sich in ihrem Varianzniveau mit einer *16,4fachen* bzw. *27fachen* Verschlechterung im Verhältnis von 27:16, während das Verhältnis a priori bei 1:1 liegt. Wenn man sich jedoch die Genauigkeit ansieht, mit der sich die Varianzkomponenten einer einzelnen Session schätzen lassen, stellt man sofort fest, dass zwischen den beiden Sessions kein signifikanter Genauigkeitsunterschied nachgewiesen werden kann.

Eine entsprechende Aufteilung des stochastischen Modells sollte daher unterbleiben, um eine Überparametrisierung des stochastischen Modells zu vermeiden.

6.7.2 . . . nach unterschiedlichen Standpunkten

Ein weiterer Test verwendet SKI-Basislinien („Kettenauswertung") und versucht signifikante Genauigkeits-

unterschiede in GPS-Basislinien durch eine Gruppeneinteilung nach GPS-Eignung der beiden durch die Basislinie verbundenen Punkte nachzuweisen.

Ein schlecht geeigneter GPS-Punkt liegt vor, wenn die Sicht zum Satellitenhimmel eingeschränkt ist und Gegenstände in der näheren Umgebung des Punktes die Signalausbreitung negativ beeinflussen. Bei Punkt 113/1 des Netzes ist dies ein Waldrand mit hohen Bäumen. Es kommt zu Mehrwegeeffekten (multipath) und Signalverzerrungen, die sich an Problemen bei der Mehrdeutigkeitsauflösung im Rahmen der Basislinienberechnung zeigten. Die Berechnung gelang teilweise erst nach einer zeitlichen Einschränkung des Beobachtungsfensters.

Die Basislinien werden deshalb in zwei Gruppen eingeteilt. In der einen Gruppe befinden sich insgesamt 13 Basislinien, die den Punkt 113 mit anderen Netzpunkten verbinden. Alle übrigen 37 Basislinien befinden sich in der anderen Gruppe.

Die Ergebnisse der VKS sind in Tab. 12 zusammengestellt.

Tab. 12 Ergebnisse der VKS mit zwei GPS-Basisliniengruppen

Typ der Beobachtung	Std.abweichg. nach VKS	Genauigkeit der geschätzten Standardabweichung		Redundanzanteil
		absolut	relativ	
Strecke (1 km)	3,4 mm	1,1 mm	33 %	20
Richtung	0,52 mgon	0,17 mgon	33 %	18,7
Zenitwinkel	0,74 mgon	0,24 mgon	32 %	21,5
GPS-Gruppe 1	27,4 x *)	6,0 x	22 %	38,3
GPS-Gruppe 2	16,9 x *)	2,5 x	15 %	98,4

*) Bei GPS ist der Faktor angegeben, mit dem die Genauigkeiten a priori zu multiplizieren sind, um die Genauigkeiten nach der VKS zu erhalten

Es ergibt sich ein ähnlicher Genauigkeitsunterschied (Verhältnis 27:17) wie bei der Unterteilung nach Sessions. Die terrestrischen Gruppenvarianzen bleiben von der Aufteilung praktisch unbeeinflusst. Es kommt nur zu einer Genauigkeitsverschiebung innerhalb der GPS-Gruppe. Die geschätzten Varianzkomponenten scheinen sich hier signifikant voneinander zu unterscheiden. Dies liegt aber nur an der künstlichen Erhöhung der Redundanz durch die Kettenauswertung und der damit scheinbar sichereren Bestimmung der Varianzkomponente.

An den Punktkoordinaten und deren Genauigkeiten ergeben sich jedoch keine signifikanten Veränderungen.

Man kann demzufolge festhalten, dass in einem Netz dieser Größe eine weitere Aufteilung der GPS-Gruppenvarianz wenig Erfolg versprechend ist.

Nur in Netzen mit umfangreicheren unabhängigen GPS-Beobachtungen wären weitere Unterteilungen z. B. nach der Basislinienlänge oder nach der Beobachtungszeit denkbare Anwendungen für die VKS.

6.8 Netzberechnung mit einzelnen GPS-Basislinien

Die Motivation für die folgende Anwendung der VKS liegt darin, dass in der praktischen Anwendung terrestrische und GPS-Verfahren ergänzend benutzt werden, um einen besonders wirtschaftlichen Ablauf der Messung zu erreichen.

Dabei kann es sich anbieten, kleinere Teilnetze recht schnell und genau mit terrestrischen Beobachtungen aufzubauen. Oft muss ein Teil der Standpunkte sowieso mit einem Tachymeter besetzt werden, um GPS-untaugliche Punkte an Bauwerken zu bestimmen oder zu überwachen. Teilnetzübergreifend werden dann die längeren „Sichten“ nahezu ausschließlich durch GPS-Basislinien ersetzt. Dies bietet sich besonders dann an, wenn zwischen den Teilnetzen keine direkten Sichtverbindungen bestehen (z. B. bei Portalnetzen für Tunnelbauten oder Überwachungsnetzen von Pumpspeicherkraftwerken, bei dem sich ein Teil der Bauwerke auf dem Berg und ein anderer im Tal befindet).

Dieser Vorstellung entsprechend wird in der Netzvariante nach Abb. 16 ein Teilnetz zwischen den Punkten 16, 105/1, 119/1 und 113/1 und ein weiteres mit den Punkten N, 88/10, 159, 104/N gebildet.

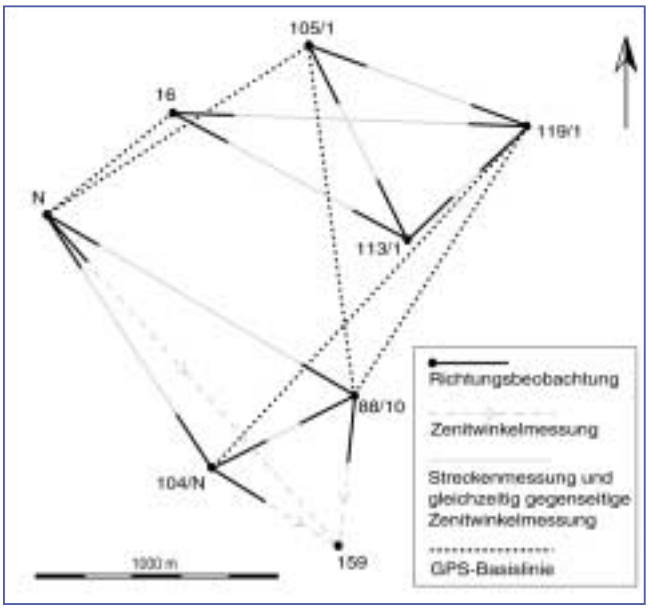

Abb. 16 Durch GPS-Basislinien verknüpfte terrestrische Teilnetze

Der Messaufwand wird für diese als **Teilnetzmessung** bezeichnete Variante gegenüber der Referenzlösung (Tab. 13) erheblich reduziert, vor allem wenn man zu-

Tab. 13 Vergleich des Beobachtungsaufwandes

Typ der Beobachtung	Anzahl der Messungen bei Variante	
	Teilnetz	Referenz
Strecken	16	24
Richtungen	19	28
Zenitwinkel	36	50
GPS	5 Basislinien (2 Empfänger)	2 umfangreiche Sessions (5 Empfänger)

Trimble

sätzlich bedenkt, dass gerade die aufwändigeren langen und schlechten Sichten durch GPS ersetzt werden können.

Im Gegensatz zu allen bisherigen Anwendungen ist hier aber für den Beobachtungstyp GPS kein redundantes Beobachtungsmaterial vorhanden, da mit keinem Teil der Basislinien ein geschlossener Linienzug gebildet werden kann (vgl. Abb. 16). Es ist demzufolge unmöglich, deren Varianzniveau in einer GPS-Vorausgleichung zu bestimmen. Erst durch die Kombination mit den terrestrischen Messelementen ergeben sich dann auch für die einzelnen Basislinien Redundanzanteile, so dass eine VKS möglich wird. Die geschätzten stochastischen Parameter für die Teilnetz-Variante sind in Tab. 14 zusammengestellt.

Tab. 14 Ergebnisse der VKS in der Teilnetz-Variante

Typ der Beobachtung	Std.abweichg. nach VKS	Genauigkeit der geschätzten Standardabweichung		Redundanz-anteil
		absolut	relativ	
Strecke (1 km)	3,9 mm	1,8 mm	46 %	10,4
Richtung	0,44 mgon	0,21 mgon	48 %	9,1
Zenitwinkel	0,49 mgon	0,20 mgon	42 %	13,85
GPS	20,8 x *)	14,4 x	67 %	5,1

*) Bei GPS ist der Faktor angegeben, mit dem die Genauigkeiten a priori zu multiplizieren sind, um die Genauigkeiten nach der VKS zu erhalten.

Ein GPS-Korrekturfaktor von *20,8* und eine Richtungsmessgenauigkeit *0,4 mgon* stehen im Einklang mit allen bisherigen Ergebnissen. Die Zenitwinkel werden dagegen als etwas genauer eingeschätzt. Dies kann an der durchschnittlich kürzeren Zielweite liegen, aber auch nur entsprechend der Genauigkeitsangabe für die Varianzkomponenten zufallsbedingt sein. Natürlich werden hinsichtlich der Signifikanz der geschätzten Varianzkomponenten Einschränkungen deutlich (geschätzte Standardabweichungen von *ca. 50 %*, Redundanzanteile von *ca. 10*).

Mit einem ersten Blick auf Tab. 15 wird deutlich, dass sich auch bei deutlich reduziertem Beobachtungsaufwand noch gute Koordinatengenauigkeiten erreichen lassen. Analysiert man die Koordinatendifferenzen zur Referenzlösung für die Varianten mit/ohne VKS, so ist auch ein signifikanter Einfluss der VKS auf die Änderungen in den Koordinaten erkennbar, d. h. die Differenzen zur Referenzlösung sind kleiner.

Für beide Lösungen (mit/ohne VKS) gilt zudem, dass die Koordinatenunsicherheiten mit den geschätzten Standardabweichungen richtig beurteilt werden können, falls man nur unabhängige (mit SKI ausgewertete) Basislinien in die Ausgleichung einführt.

Hier liegt der wesentliche Unterschied zu den Ergebnissen von Abschn. 6.6, wo – aufgrund fehlender Kovarianzinformation zwischen abhängigen Basislinien – die Defizite im stochastischen Modell der GPS-Basislinien selbst durch den Einsatz der VKS nicht kompensiert

Tab. 15 Durchschnittliche Koordinatengenauigkeiten

	Koordinatendifferenz zur Referenzlösung [mm]			Standardabweichung [mm]		
	d_x	d_y	d_z	s_x	s_y	s_z
ohne VKS	3,6	3,3	6,2	3,6	3,2	6,4
mit VKS	1,3	1,6	5,3	2,5	2,0	5,9
Referenzlösung				1,8	1,6	3,8
„SKI-Ketten-auswertung“	2,3	1,6	3,8	1,1	0,8	1,9

werden konnten. Letzteres zeigt sich vor allem darin, dass die Koordinatenunsicherheiten durch die dort geschätzten Standardabweichungen nicht richtig beschrieben werden (zum Vgl. nochmals in Tab. 15 unten aufgeführt).

6.9 Fazit

Für eine **optimale Integration** von GPS-Sessions mit terrestrischen Beobachtungen ist neben einer **geeigneten GPS-Auswertesoftware** eine ausreichende **Schätzung des Varianzniveaus** der GPS-Messungen nötig.

Damit es in der kombinierten Ausgleichung zu einer Genauigkeitssteigerung für die Koordinaten kommt, muss das stochastische Modell innerhalb der jeweiligen Gruppe zutreffend sein, was für die GPS-Messungen nur mit Session-Auswertung der BERNER SOFTWARE gelingt. Erst dann kann die Genauigkeit der GPS-Sessions mit einer VKS richtig beurteilt werden.

Ist nur eine Auswertung einzelner GPS-Basislinien möglich, dann entstehen Defizite im stochastischen Modell, die insbesondere durch die Auswertemethoden von SKI induziert und nicht mit einer VKS kompensiert werden können. Sichtbar werden diese Defizite in nicht zutreffenden Genauigkeitsschätzungen für die Koordinaten (vgl. Tab. 10).

Alternativ empfiehlt es sich dann, den Messaufwand zu senken und mit nur zwei Empfängern unabhängige Basislinien zu messen. Dass dies mit einer VKS zu guten Ergebnissen führen kann, zeigt die in Abschn. 6.8 beschriebene Verknüpfung von terrestrischen Teilnetzen mit einzelnen GPS-Basislinien.

Hier wurde demonstriert, dass eine VKS auch für eine Gruppe von Messungen ohne eigene Redundanz möglich ist. Die Redundanz innerhalb dieser Gruppe entsteht erst durch Kombination mit anderen Messungen.

Auch eine weitere Unterteilung der GPS-Messungen in Gruppen wurde diskutiert und es zeigte sich, dass zwischen diesen Gruppen Genauigkeitsunterschiede auftreten können. Die Signifikanz der geschätzten Varianzkomponenten ist aufgrund der geringen Redundanz aber nicht ausreichend. Versuche, adaptive Varianzkomponenten zu berechnen, scheiterten, d. h. es konnte keine Konvergenz in der iterativen Berechnung erzielt werden.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Diese Arbeit versucht vielfältige Anregungen für den sinnvollen Einsatz der VKS in ingenieurgeodätischen Netzen zu geben.

Die VKS kann sowohl die Koordinatengenauigkeit als auch die Detektion grober Fehler verbessern.

Überdies erhält der Anwender zuverlässige Information über die mit dem eingesetzten Instrumentarium erzielten Genauigkeiten. In hochredundanten Netzen ist es sogar möglich, durch die Bildung vieler Gruppen für einzelne Beobachtungstypen Fehlermodelle abzuleiten; vielleicht ein Schritt bei der Suche nach geeigneten Feldprüfverfahren für elektronische Tachymeter (vgl. FISCHER (1998)).

Allerdings kann dem Benutzer die sinnvolle Vorgabe der Beobachtungsgruppen vom Programm nicht vollständig abgenommen werden. Da sich immer nur einzelne Blöcke der Kovarianzmatrix gegeneinander abstimmen lassen, ist eine vollständige automatische Aufstellung des stochastischen Modells durch ein Programm nicht möglich. Es wurden aber einige sinnvolle adaptive Modelle mit ihren stochastischen Teilstrukturen erläutert, die vom Anwender zusammen mit der Berechnung von Gruppenvarianzen flexibel genutzt werden können. Damit eine richtige Auswahl für die Gruppeneinteilung oder die Nutzung eines adaptiven Modelles getroffen wird, ist vor allem die Angabe von Genauigkeiten für alle geschätzten Varianzkomponenten wichtig. Dadurch wird verhindert, dass es zu einer Überparametrisierung des stochastischen Modells kommt.

Dank

Für die fachgerechte Auswertung der GPS-Sessions mit der BERNER SOFTWARE sei DR. STEFAN LEINEN vom Institut für Physikalische Geodäsie der TU Darmstadt an dieser Stelle gedankt.

Literatur

FISCHER, E. N. (1998): Prüfung elektronischer Sensorsysteme bei elektronischen Tachymetern, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 105:374–378, Karlsruhe.

GOTTWALD, R. (1985): Vergleichende Untersuchung der elektronischen Präzisionstheodolite Kern E2 und Wild Theomat T2000, Vermessungswesen und Raumordnung, 47:403–412, Bonn.

SCHWARZ, W. (1995): Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau. Konrad Wittwer, Stuttgart.

SIEG, D. (1999): Varianzkomponentenschätzung in ingenieurgeodätischen Netzen. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Geodätisches Institut, TU Darmstadt.

WELSCH, W. (1984): Grundlagen, Gebrauchsformeln und Anwendungsbeispiele der Schätzung von Varianz- und Kovarianzkomponenten. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 82:296–301, Baden-Dättwil (CH).

ZHONG, D. (1997): Datumsprobleme und stochastische Aspekte beim GPS-Nivellement für lokale Ingenieurnetze. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 58, Neubiberg.

Anschrift der Verfasser:
DETLEF SIEG, An der Schleifmühle 29, 64289 Darmstadt
MILO HIRSCH, Geodätisches Institut, TU Darmstadt, Petersenstraße 13, 64287 Darmstadt

Geodäsie und Kartographie Rußlands zur Jahrtausendwende

Die Bedeutung von Geodäsie und Kartographie nahm in letzter Zeit in Rußland beträchtlich zu. Kleine Fehler auf ihrem Gebiet können zu Tragödien führen, wie der militärische Konflikt in Jugoslawien zeigt. Wegen der Verwendung veralteter Karten (nach Meinung der USA) wurde die chinesische Botschaft in Belgrad in Mitleidenschaft gezogen.

Nach Untersuchungen der UNO bringt die Verwendung topographischer Karten und geodätischer Daten einen siebenmal größeren Effekt, als Mittel für sie aufgewendet werden. In Rußland wurden diese Mittel jedoch seit 1992 auf ein Siebentel gekürzt. Für die Geodäsie und Kartographie entstand dadurch eine schwierige Lage, zumal zwei Drittel der staatlichen topographischen Karten – darunter die von wichtigen Gebieten – zu erneuern sind. Die Kürzung der Mittel für Geodäsie und Kartographie führte zu Informationsverlusten und technologischem Rückstand sowie schließlich zur Vergrößerung des Aufwandes im Maßstab des Landes.

Von 8 Milliarden Rubel, die in Rußland für alle Arten geodätischer und kartographischer Arbeiten aufgewendet werden, entfallen im Jahr 2000 weniger als 400 Millionen auf „Roskartografija“, das staatliche Vermessungs- und Kartenwesen. In Rußland wird der Nachkriegsversuch Großbritanniens in ähnlicher Weise wiederholt, wo wegen der schwierigen wirtschaftlichen Lage die Erneuerung topographischer Karten auf unbestimmte Zeit verschoben wurde. Das jedoch führte zu einem erheblichen Mehraufwand wegen der dann später erforderlich werdenden topographischen Neuaufnahmen aller Teile.

Eine der wichtigsten Aufgaben von Roskartografija ist die Modernisierung und Entwicklung der staatlichen geodätischen Lage- und Höhennetze – es gibt rund 300 000 geodätische Punkte und etwa ebenso viele Nivellementspunkte. Die weitere Verwendung traditioneller Methoden der Wiederherstellung und Erhaltung der geodätischen Grundlage ist jedoch durch die Finanzierung begrenzt. Daher wird Kurs auf die Koordinatenbestimmung mittels globaler Satellitensysteme (GLONASS und GPS) genommen, was erheblich billiger ist. Als erforderlich wird dazu die Anlage eines Netzes ständiger Punkte sowie digitaler Karten für die Navigation erachtet.

Auf Initiative von Roskartografija entstand durch verschiedene Einrichtungen eine Konzeption für einen Nationalatlas von Rußland, dessen erster Band 1999 fertig wurde.

Aus: O merach po povyšeniju effektivnosti geodezičeskogo upravlenija v sfere geodizii i kartografii. Von Dražnjuk, A. A. – Geodez. i Kartogr., Moskva (1999) 8, S. 1–5

Deumlich