

Auswertung der 1984-Alaska-GPS-Kampagne

Autor(en): **Beutler, G. / Rothacher, M.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK =
Mensuration, photogrammétrie, génie rural**

Band (Jahr): **84 (1986)**

Heft 6

PDF erstellt am: **18.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-233041>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

legungen, wie die Mitwirkung der Grundeigentümer am Verfahren intensiviert werden kann. Nach dem bayerischen Genossenschaftsprinzip werden in der Flurbereinigung alle wichtigen Entscheidungen vor Ort vom Vorstand der Teilnehmergemeinschaft getroffen, der mit Ausnahme des Vorsitzenden von den Teilnehmern gewählt wird. Zur Vertiefung der demokratischen Durchführung der Flurbereinigung werden seit mehreren Jahren die Vorstandsmitglieder gemeinsam von Flurbereinigungsverwaltung und Bauernverband auf ihr Amt vorbereitet; durch Fortbildungsveranstaltungen wird das Wissen ständig aktualisiert.

Fast noch wichtiger ist aber die ständige Information der Beteiligten über Ziele und Massnahmen in ihrem eigenen Flurbereinigungsverfahren. In allen Stadien des Verfahrensablaufes fordern wir deshalb Aufklärungs- und Informationsveranstaltungen; mindestens eine pro Jahr haben wir obligatorisch vorgeschrieben.

Das ist harte Arbeit, fordert Zeit und Kos-

ten, fordert auch eine bessere Schulung unseres Personals in Didaktik und Rhetorik. Flurbereinigungstechnisches Know-how allein genügt nicht. Eine transparente Darstellung den Teilnehmern gegenüber ist Voraussetzung für ein gutes Gelingen. Ein weites Feld, das jeder Flurbereinigungsingenieur sich letztendlich selbst erschliessen muss.

2.10. «Landordnung» – ein neuer Begriff statt «Flurbereinigung»

Nun gibt es auch Stimmen, die sagen, Flurbereinigung sei besser als ihr Ruf. Und andere meinen, sie wäre noch besser, wenn man statt «Flurbereinigung» eine vernünftige Bezeichnung wählen würde. Uns bayerischen Flurbereinigern fällt es ein bisschen schwer, sich von dem alten Begriff zu lösen. Er wurde schliesslich in Bayern kreiert und in einem bayerischen Gesetz 1886 erstmals verankert. Selbst das Bundesgesetz hat den bayerischen Terminus 1953 übernommen.

Und trotzdem kam aus Bayern der Vor-

schlag «Flurbereinigung» durch «Landordnung» zu ersetzen. In Niedersachsen wurde diese Überlegung aufgegriffen, jedoch in «Landneuordnung» modifiziert. Entscheidungen sind noch nicht getroffen. Vielleicht aber kommt von der Schweiz her ein neuer Vorschlag.

Anmerkung:

Der Stand und die Entwicklung Bayerischer Flurbereinigung ist umfassend dokumentiert in: Berichte aus der Flurbereinigung, Nr. 54/1985. Herausgegeben vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Abteilung Ländliche Neuordnung durch Flurbereinigung. Die Karten sind dieser Dokumentation entnommen.

Adresse des Verfassers:

Günther Strössner, Ministerialdirigent
Leiter der Bayerischen
Flurbereinigungsverwaltung
Ludwigstrasse 2
D-8000 München 22

Auswertung der 1984-Alaska-GPS-Kampagne

G. Beutler, M. Rothacher

Im Sommer 1984 wurden fünf TI-4100 GPS Empfänger zum Ausmessen eines Netzes in Alaska und in Kanada eingesetzt. In diesem Netz treten Basislinien von 300 km bis 2700 km Länge auf. Es wurde vorgängig mit mobilen und permanenten VLBI Stationen beobachtet, so dass ein sehr genaues Vergleichsnetz zur Verfügung stand.

Die GPS Messungen wurden dem Astronomischen Institut der Universität Bern zur Auswertung vom U.S. National Geodetic Survey zur Verfügung gestellt. Die Beobachtungen mehrerer aufeinanderfolgender Tage wurden in einem Programm durchlauf verarbeitet, wobei Bahnverbesserungstechniken zur Anwendung kamen. Der Vergleich der GPS Lösung mit dem VLBI-Netz zeigt eine Übereinstimmung der beiden Lösungen von der Grössenordnung 10^{-7} .

En été 1984 cinq récepteurs GPS (TI-4100) furent utilisés pour mesurer un réseau en Alaska et au Canada dont les lignes de base mesurent de 300 à 2700 km. Ce même réseau fut observé avec des stations VLBI (Very Long Baseline Interferometry) mobiles et fixes, ce qui nous donnait une base de comparaison de haute précision. Les mesures GPS furent mises à la disposition de l'Institut d'Astronomie de l'Université de Berne par le U.S. National Geodetic Survey. Les observations de plusieurs jours consécutifs furent combinées pour produire une solution pour laquelle furent aussi estimés des paramètres orbitaux pour chaque satellite et chaque arc. La comparaison de la solution GPS avec la solution VLBI donne un accord de l'ordre de 10^{-7} .

1. Einleitung

Ein erster Zwischenbericht über die Auswertung der Alaska-Kampagne wurde von uns an der Tagung der Amerikanischen Geophysikalischen Union (AGU) im Dezember 1985 in San Franzisko gegeben (Gurtner, 1985). Eine sehr informative Beschreibung der Zielsetzungen und der Organisation der 1984 VLBI- und GPS- Beobachtungskampagnen in Alaska findet der

interessierte Leser in (Mader et al., 1985). Im Laufe dieses Jahres wird im weiteren ein Abschlussbericht über das 1984-Alaska-GPS-Experiment als gemeinsame Publikation unseres Institutes und des U.S. National Geodetic Survey erscheinen. Im vorliegenden Artikel wird versucht, das in den beiden erwähnten Referenzen vorhandene Material in konsistenter Form zu präsentieren.

Im Sommer 1984 hat der NGS (U.S. National Geodetic Survey) und das JPL (Jet Propulsion Laboratory, Pasadena) mobile VLBI-Systeme (Very Long Baseline Interferometry) in Alaska und in Kanada im Rahmen des sogenannten «Crustal Dynamics Project» der NASA (National Aeronautics and Space Administration) eingesetzt. In Anbetracht der hohen Kosten und der komplexen Logistik des Einsatzes von mobilen VLBI Systemen in solch entlegenen Gebieten entschied der NGS, dieselben Basislinien mit GPS zu messen. Dies in der Hoffnung, dass in Zukunft, wenn GPS Technologie und Techniken reifer werden, die aufwendigen VLBI Messungen durch GPS ersetzt werden können.

Es standen fünf GPS Empfänger zur Verfügung. Ursprünglich war geplant, in Nome, Fairbanks, Sourdough, Yakataga und Whitehorse (siehe Abb. 1, genäherte Distanzen zwischen den Stationen siehe Tab. 1) während zwei aufeinanderfolgenden Tagen zu beobachten und anschliessend in Nome, Fairbanks, Sandpoint, Kodiak und Yellowknife auch während zwei Tagen zu messen. Der erste Teil des Plans war ein voller Erfolg, der zweite musste tiefgreifend modifiziert werden, da wegen Empfänger-Problemen während zwei Wochen anstatt zwei Tagen beobachtet wurde.

Da 1984 erst eine Testkonfiguration von GPS zur Verfügung stand, konnten pro Tag nur zwei Sessionen beobachtet werden. Dabei wurde die erste Session in zwei sogenannte Szenarien unterteilt: Das erste Szenario begann in den frühen Nachmittagsstunden und dauerte ungefähr drei Stunden. Beobachtet wurden die Satelliten mit den Nummern 6, 8, 9 und 11. Das

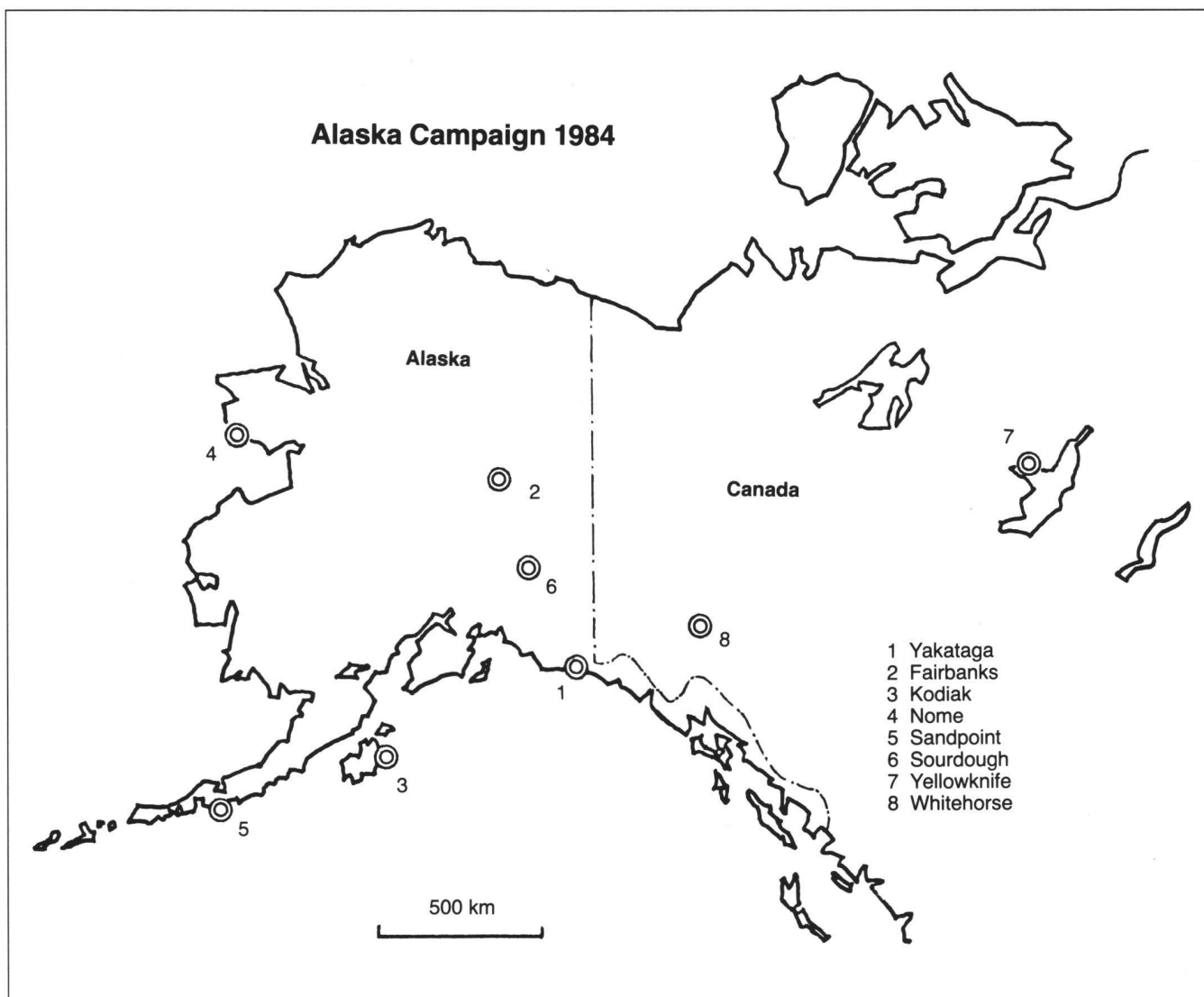


Abb. 1: The 1984-Alaska-GPS-Campaign

Station	Kodiak	Nome	Sand	Sour	White	Yaka	Yellow
Fair	849	848	1285	276	789	603	1631
Kodiak		1025	557	671	1044	632	2135
Nome			1006	1004	1591	1276	2460
Sand				1179	1598	1188	2681
Sour					591	329	1575
White						414	1105
Yaka							1510

Fair: Fairbanks Sour: Sourdough Yaka: Yakataga
 Sand: Sandpoint White: Whitehorse Yellow: Yellowknife

Tab. 1: Genäherte Distanzen in Kilometern zwischen den Stationen

zweite Szenario folgte unmittelbar auf das erste und dauerte etwa eine Stunde. Beobachtet wurden die Satelliten 4, 9, 11 und 13. Zur Verfügung standen also insgesamt 6 aktive Satelliten.

Die zweite Session war gegenüber der ersten um 12 Stunden verschoben, wobei nur zwei bis drei Satelliten beobachtet werden konnten. Diese zweite Session war angesetzt worden, da bei der ersten die Satellitenüberdeckung gegen Westen sehr schlecht war.

2. Auswertung der Kampagne

2.1 Vorarbeiten (Preprocessing)

Bei der Verarbeitung einer GPS-Beobachtungskampagne mit unserem Programmsystem müssen einige Vorarbeiten («pre-processing steps») geleistet werden, bevor die den Geodäten interessierenden Resultate produziert werden können. Zu nennen sind insbesondere:

- Erzeugen von Standard-Bahnen
- Code Auswertung (falls ein Code (C/A oder P-Code) gemessen wurde

– Elimination von sogenannten «cycle slips» in den Phasenbeobachtungen

2.1.1 Standard Bahnen

Die Bahninformation kann dem Benutzer in verschiedener Form zur Verfügung gestellt werden. Zur Auswertung des Alaska-Materials konnten wir wahlweise die sogenannten «broadcast ephemerides» (B.E.) mit einer Genauigkeit von ungefähr 20 m bis 50 m (Ausnahme Satellite 4, der Bahnfehler von bis zu 150 m aufwies) oder die sogenannten «precise ephemerides» (P.E.) mit einer Genauigkeit von 5 m bis 10 m verwenden.

Die Broadcast-Bahninformation ist dem Satellitensignal aufmoduliert und wird vom TI-4100 Instrument decodiert. Diese Bahninformation stand uns also von Anfang an zur Verfügung. Die vom U.S. DoD (Department of Defence) produzierten P.E. wurden uns erst Monate später zur Verfügung gestellt.

Schon wegen der verschiedenen Bahnquellen und der damit verbundenen verschiedenen Formate ist es angezeigt, die

verschiedenen Bahnen in eine Standard-Darstellung überzuführen. Es gibt dafür aber noch einen wichtigeren Grund: Die Qualität der a priori Bahnen (für das Alaska-Experiment im günstigsten Fall 10 m – 20 m bei Verwendung von P.E.) macht es nötig, mit den Stationskoordinaten (und weiteren Parametern) auch die Satellitenbahnen zu bestimmen resp. zu verbessern (siehe dazu Kapitel 2.2). Eine Satellitenbahn bestimmen heisst aber nichts anderes, als die Anfangswerte (Ort und Geschwindigkeit) eines Differentialgleichungssystems (der Bewegungsgleichungen für den Satelliten) zu bestimmen. Man muss also dafür sorgen, dass die a priori Bahn tatsächlich Lösung eines wohldefinierten Differentialgleichungssystems ist (nur dann kann sinnvollerweise von Bahnbestimmung resp. -verbesserung gesprochen werden).

Die Standard-Bahnen werden von unserem Programm ORBSET erzeugt: Dieses Programm interpretiert die aus P.E. oder aus B.E. abgeleiteten Satellitenpositionen als Pseudobeobachtungen und führt mit diesen eine Bahnbestimmung durch. Als Resultat erhält man eine a priori-Bahn, die Lösung eines Differentialgleichungssystems ist, und die zugleich die mit P.E. oder mit B.E. berechneten Satellitenpositionen bestmöglich (im Sinne der Methode der kleinsten Quadrate) approximiert.

Zu diesem Vorgehen noch einige technische Bemerkungen:

- Im Programm ORBSET wird das auf den Satelliten wirkende Kräftefeld wie folgt approximiert:
 - Das Erdpotential wird komplett bis zu Termen von Grad und Ordnung 8 berücksichtigt
 - Gravitationswirkungen von Sonne und Mond werden eingeschlossen
 - Der von der Sonne auf den Satelliten ausgeübte Strahlungsdruck wird mit einem einfachen Modell erfasst.
- Die Satellitenbahnen werden in ORBSET mit der Technik der numerischen Integration erzeugt (siehe dazu Beutler, 1982). Es ist – gerade wegen der Modellierung von Kräften wie dem Strahlungsdruck – sehr umständlich und aufwendig, GPS Bahnen analytisch zu beschreiben.
- Mit der momentanen Version von ORBSET sind wir – rein von der Modellqualität her gesehen – in der Lage, GPS-Bahnen im Zeitintervall von zwei Tagen mit einer Genauigkeit von ungefähr 1 m zu berechnen. Mehr Information zum Thema Bahndarstellung findet der Leser in (Beutler et al., 1985).

2.1.2 Code-Auswertung

Die in Alaska eingesetzten GPS Empfänger haben neben den Phasen auch den P-Code (siehe Gurtner, 1986) registriert. Diese Code Messungen sind hervorragend

geeignet, die Synchronisationsfehler der Empfängeruhren gegenüber GPS-Zeit zu bestimmen.

Das Programm CODSP (CODE-Auswertung Single Point Positioning) verarbeitet alle Messungen einer Station und einer Session, und liefert als Resultat die Koordinaten des Empfängers sowie den Synchronisationsfehler des Empfängers gegenüber GPS-Zeit als Polynom in der Zeit. Die Genauigkeit, mit der die Synchronisationsfehler im Zeitintervall der Session geschätzt werden können, beträgt einige wenige Nanosekunden (die geschätzten Stationskoordinaten weisen einen mittleren Fehler von einigen Metern auf).

Da wir bei der Verarbeitung von Phasenbeobachtungen im «double difference»-Modus (siehe Gurtner, 1986) die Empfängeruhrfehler lediglich mit einer Genauigkeit von Mikrosekunden benötigen, dürfen wir die mit dem Code geschätzten Uhrfehler für die nachfolgende Phasenauswertung übernehmen und dort als bekannt betrachten.

Die Code-Auswertung erwies sich als ein einfacher, wenig Zeit in Anspruch nehmender Vorverarbeitungsschritt. Dieser Teil des Programmsystems war Teil einer Lizentiatsarbeit und wird im Laufe des Jahres publiziert werden (Schildknecht, 1986).

2.1.3 Elimination von Phasensprüngen

GPS-Empfänger messen nicht nur den Bruchteil der Trägerphase seit dem letzten Nulldurchgang, sie registrieren auch die Zahl der eingetroffenen Wellen seit einer Anfangszeit. Messgrösse ist die Summe dieser ganzen Zahl von Wellen und des Bruchteils seit dem letzten Nulldurchgang. Wird nun ein Satellit vom Empfänger aus gesehen durch ein Hindernis verdeckt, wird diese kontinuierliche Zählung unterbrochen, und es tritt ein *Phasensprung* oder «cycle slip» auf. Cycle slips sind also Sprünge um eine ganze Anzahl von Zyklen der beobachteten Trägerwelle. Da der mittlere Fehler der Phasenmessung (besser als ein cm) wesentlich kleiner ist als die Wellenlängen der beiden Trägerwellen (19 cm für L_1 , 25 cm für L_2), ist es in den meisten Fällen durch eine Analyse der Residuen der Ausgleichung möglich, solche Phasensprünge zu eliminieren.

Bei der Auswertung der Alaska-Kampagne war dieser Schritt des Preprocessing äusserst mühsam: Mehr als 20 solcher Sprünge pro Empfänger, Session und Frequenz waren keine Seltenheit. Die Situation war in der Tat so schlimm, dass wir die Auswertung dieser Kampagne zum Anlass nahmen, ein eigenes Programm mit komplexer Logik zur automatischen Elimination dieser Phasensprünge zu schreiben. Dieses Programm wird an anderer Stelle zu beschreiben sein.

2.2 Auswertung der Phasenbeobachtungen

Unser GPS-Phasenauswerteprogramm

GPSEST ist an anderer Stelle ausführlich beschrieben worden (Gurtner et al., 1985). Weitere Information findet der Leser in (Gurtner, 1986) in derselben Ausgabe der vorliegenden Zeitschrift. Wir beschränken uns hier auf einige wenige Hinweise:

GPSEST verarbeitet sogenannte doppelte Differenzen (Gurtner, 1986). Es können Messungen beliebiger Stationen einer Kampagne in einem Programm-Lauf verarbeitet werden. Als Resultate erhält man (unter anderem) die geozentrischen Koordinaten der Stationen.

GPSEST kann die folgenden Parameter-typen schätzen:

- (1) Stationskoordinaten
- (2) Bahnparameter
- (3) «Ambiguity»-Parameter (siehe unten)
- (4) Empfängeruhrfehler
- (5) Ionosphären- und Troposphärenmodell-Parameter

In der vorliegenden Auswertung brauchten keine Atmosphärenparameter geschätzt zu werden (es standen für jede Station Meteo-Messungen zur Verfügung, der Einfluss der Ionosphäre konnte durch Bildung einer geeigneten Linearkombination der beiden Trägerphasen weitgehend eliminiert werden), die Uhrfehler konnten vorgängig durch Auswertung des P-Codes bestimmt werden, sodass nur die ersten drei Parametertypen zu diskutieren sind:

2.2.1 Schätzen der Stationskoordinaten

GPSEST erlaubt es, die Koordinaten einer beliebigen Zahl von Stationen festzuhalten. Darüber hinaus ist es möglich, für die Stationskoordinaten a priori Varianzen anzugeben. Von dieser letzten Möglichkeit wurde bei der Auswertung der Alaska-Kampagne kein Gebrauch gemacht. Dagegen wurden die Koordinaten von Fairbanks festgehalten:

Mit Hilfe der Messungen und einer lokalen Vermessung mit konventionellen Methoden wurden die Koordinaten des GPS-Monumentes im VLBI-System wie folgt angegeben:

Fairbanks, GPS-Monument:

$$\begin{aligned} X_{VLBI} &= -2281471.190 \text{ m} \\ Y_{VLBI} &= -1453757.900 \text{ m} \\ Z_{VLBI} &= 5756981.946 \text{ m} \end{aligned} \quad (1)$$

Diese Koordinaten wurden sodann ins WGS-72 System transformiert (Larry Hotem, U.S. NGS, private Mitteilung):

$$\begin{aligned} \text{Skalenfaktor } s &= 1 - 0.326 \cdot 10^{-6} \\ \text{Rotation } w &= 0.54'' \text{ um die Polachse} \end{aligned} \quad (2)$$

Schliesslich resultieren so für die Koordinaten der festgehaltenen Station im WGS-72:

$$\begin{bmatrix} X_{WGS} \\ Y_{WGS} \\ Z_{WGS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s & w & 0 \\ -w & s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_{VLBI} \\ Y_{VLBI} \\ Z_{VLBI} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Die Stationskoordinaten der übrigen Stationen wurden im WGS-72 geschätzt, die

Partie rédactionnelle

Koordinaten von Fairbanks wurden aus (1) mit (2) und (3) berechnet und festgehalten.

2.2.2 Schätzen von Bahnparametern

Der Fehler δb einer Basislinie der Länge b , der durch einen Fehler δr in der Satellitenbahn induziert wird, kann nach (Bauersima, 1982) wie folgt abgeschätzt werden:

$$\frac{\delta b}{b} = \frac{\delta r}{r} \quad (4)$$

Dabei steht r für die mittlere Entfernung Station-Satellit.

Mit einiger Vorsicht ist dieselbe Formel auch für die zu erwartenden Systematiken in den Residuen zu verwenden, falls man die Bahnparameter nicht bestimmt: Kombiniert man die GPS Beobachtungen von vielen verschiedenen Bogen in ein und derselben Auswertung (ohne Verbesserung der Bahnelemente) und macht man weiterhin die Annahme, dass die Erwartungswerte für alle nicht bestimmten Elemente gleich Null sind, darf man δb , berechnet nach Formel (4), als Mittelwert für die Systematiken in den Residuen der beobachteten Phase interpretieren.

Da wir im Falle der Alaska-Kampagne Basislinien der Grössenordnung $b = 1000$ km zu bearbeiten haben, würden Bahnfehler von $\delta r = 25$ m Anlass zu Systematiken der Grössenordnung $\delta b = 1$ m geben, falls man für $r = 25000$ km verwendet. Diese Systematik aber liegt ungefähr zwei Grössenordnungen über der Streuung der Einzelmessungen. Will man also den Informationsgehalt einer jeden Beobachtung voll ausschöpfen, kommt man um eine Verbesserung der beobachteten Satellitenbahnen nicht herum.

Hat man sich zu Bahnverbesserungstechniken entschieden, müssen die folgenden Entscheide getroffen werden:

- (1) Die Bahn eines jeden Satelliten muss in sogenannte Bogen unterteilt werden. Jeder Bogen wird dann mit einem eigenen Satz von Bahnparametern beschrieben. Einerseits wäre es attraktiv, möglichst lange Bögen zu machen und so die Zahl der zu bestimmenden Parameter zu minimieren. Andererseits muss man befürchten, bei langen Bögen Modellfehler des auf den Satelliten wirkenden Kräftefeldes in die Auswertung einzuführen. Gesucht ist also ein Optimum. Für die Alaska-Kampagne haben wir uns für Zweitagesbögen entschieden, sodass die Beobachtungen zweier aufeinanderfolgender Tage mit einem Satz von Bahnparametern erfasst werden können.
- (2) Als nächstes muss man sich für einen Satz von Bahnparametern entscheiden. Auf den ersten Blick scheint es am einfachsten, direkt die Komponenten der Anfangswertvektoren (Ort und Geschwindigkeit des Satelliten zur Ausgangsepoche E_0) als Unbekannte einzuführen.

Vorzuziehen ist jedoch das folgende Vorgehen:

Aus Ort und Geschwindigkeit zur Zeit E_0 berechnet man die sogenannten oskulierenden Bahnelemente, die Charakteristiken der momentanen Bahnellipse:

- a : Halbachse der Satellitenbahn
- e : Numerische Exzentrizität
- i : Neigung der momentanen Bahnebene gegen die Äquatorebene
- Ω : Länge des aufsteigenden Knotens
- ω : Perigäumsabstand vom aufsteigenden Knoten
- T_0 : Perigäumsdurchgangszeit

- (3) Wir sind nun in der Lage für die Bahnelemente auf einfache Weise die a priori Genauigkeit der Bahnen ins Spiel zu bringen: Wir führen für jeden zu bestimmenden Bahnparameter B_i eine Beobachtungsgleichung der Art

$$B_i = B_{i, \text{apr}} \quad (5)$$

Wobei $B_{i, \text{apr}}$ der bekannte a priori Wert für den betreffenden Parameter ist. Dieser Beobachtung wird ein Gewicht

$$p(B_i) = \sigma_O^2 / \sigma_{B_i}^2 \quad (6)$$

beigemessen. Die mittleren Fehler a priori σ_{B_i} sind vom Programmbenutzer zu definieren.

Tabelle 2 gibt die für die Alaska-Kampagne gewählten Werte wieder:

Element	σ_{B_i}	induzierter Bahnfehler
a	1 m	1 m *)
e	0.0000001	2.6 m
i	.02 "	2.6 m
Ω	.02 "	2.6 m
ω	.00	0.0 m
T_0	.004 sec	15 m

Tab. 2: Mittlere Fehler a priori der zu bestimmenden Bahnelemente.

*) Die Änderung in der mittleren Bewegung und der dadurch eingeführte Fehler in der Bewegungsrichtung des Satelliten bleiben dabei unberücksichtigt. Eine gewisse Willkür bei der Wahl der Werte in Tabelle 2 lässt sich nicht leugnen. Es liegen jedoch auch einige Überlegungen himmelsmechanischer Natur zu Grunde: Es ist eine bekannte Tatsache, dass die Bahnebene (Elemente i, Ω) sehr gut im voraus bestimmbar ist. Dasselbe gilt für die Elemente a und e . GPS-Satelliten weisen kreisähnliche Bahnen auf (Exzentrizitäten kleiner als .01); bei Bahnen dieser Art sind die Elemente T_0 und ω sehr stark korreliert. Wir haben daher im Falle der Alaska-Kampagne gar nicht versucht, beide Elemente zu bestimmen. Traditionell am schlechtesten bestimmt ist die

Länge in der Bahn, hier durch das Element T_0 festgelegt. Für dieses Element haben wir daher einen wesentlich grösseren a priori Fehler angenommen.

2.2.3 «Ambiguity»-Parameter

Pro Session und Basislinie haben wir $n_{\text{sat}} - 1$ solcher Parameter zu bestimmen (dabei steht n_{sat} für die Zahl der beobachteten Satelliten). Diese Parameter bringen zum Ausdruck, dass die von zwei Empfängern gemessene Phasendifferenz des Signal ein und desselben Satelliten im wesentlichen gleich der Distanzdifferenz des Satelliten von den beiden Empfängern plus eine ganze Zahl von Wellenlängen ist. Eben diese ganze Zahl bezeichnet man als «Ambiguity»-Parameter. Für kleine Netze (siehe Gurtner, 1986) können diese Parameter auf ganze Zahlen gesetzt werden, d.h. aufgelöst werden. Für die Alaska-Kampagne jedoch kam ein Auflösen der Ambiguity Parameter nicht in Frage.

3. Resultate

3.1 Vorverarbeitung (Preprocessing)

Es zeigte sich schnell, dass von den Beobachtungen der zweiten Session eines jeden Tages (bei der nur zwei bis drei Satelliten beobachtet wurden) keine brauchbaren Resultate zu erwarten waren (viele Phasensprünge, aber auch ganz «normale» Uhrfehler, sowie lange Unterbrüche). Bei der Analyse der brauchbaren ersten Sessionen wurde es zudem rasch klar, dass die Empfänger beim Übergang auf neue Satelliten (neues Szenario) sehr grosse Uhrfehler (Sprünge von einigen Millisekunden bis 1.5 Sekunden) einführen. Es war daher nötig, bei der Phasenauswertung die beiden Szenarien als unabhängige Sessionen zu betrachten (ohne zu versuchen, die Phasen zusammenzuhängen).

Tabelle 3 fasst das Resultat der Datenvorverarbeitung zusammen:

Ins Auge springt der Qualitätsunterschied zwischen den beiden Teilkampagnen: Während im ersten Teil das Netz mit 5 simultan arbeitenden Empfängern in nur zwei Tagen vermessen wurde, waren im zweiten Teil für die gleiche Arbeit neun Tage nötig. Diese zweite Teilkampagne war von Empfängerausfällen geprägt: Nur am 31. Juli konnte mit vier Empfängern gearbeitet werden, an sechs Tagen funktionierten bloss drei, an zwei Tagen sogar nur zwei Empfänger. Ausserdem ist erwähnenswert, dass die Stationen Kodiak und Sandpoint nie simultan beobachtet worden sind.

3.2 Resultate der Phasenverarbeitung

Die Beobachtungen der beiden Trägerphasen L_1 und L_2 enthalten den Effekt der ionosphärischen Refraktion. Diese Korrektur kann in guter Näherung (Bauersima, 1983) wie folgt berechnet werden:

Teil-Kamp.	Tag MM DD		Stationen	Anzahl Beob.
1	07	26	Fair, Nome, Sour, Yaka, White	4228
1	07	26	Fair, Nome, Sour, Yaka, White	4162
2	07	30	Fair, Nome, Yellow	830
2	07	31	Nome, Yellow, Kodi	1512
2	08	01	Nome, Kodi	955
2	08	02	Nome, Kodi	833
2	08	03	Fair, Nome, Kodi	1338
2	08	04	Fair, Nome, Kodi	633
2	08	06	Fair, Nome, Sand	1357
2	08	07	Fair, Nome, Sand	2032
2	08	08	Fair, Nome, Sand	1444

Fair: Fairbanks Sour: Sourdough Yaka: Yakataga
 Sand: Sandpoint White: Whitehorse Yellow: Yellowknife

Tab. 3: Brauchbares Beobachtungsmaterial der Alaska-Kampagne

$$dr = -\frac{41}{f^2} \cdot \frac{E}{\cos(z')} \quad (6) \quad p_3 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot p_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot p_2 \quad (7)$$

Wobei: E totale Anzahl freier Elektronen auf dem Strahl Station – Satellit
 f Frequenz des beobachteten Trägers
 z' Zenitdistanz des Satelliten in der Höhe der Ionosphäre

In (7) sind übrigens die Phasen in Metern und nicht in Zyklen zu verwenden. Nun zu den Resultaten: Bei allen hier präsentierten Lösungen diente die ionosphären-freie Linearkombination (7) als Ausgangspunkt (von diesen Phasen wurden dann die doppelten Differenzen erzeugt)

Da wir in zwei Frequenzen $f_1 = 1.57542$ GHz und $f_2 = 1.2276$ GHz beobachtet haben, können wir diesen Effekt – in der Näherung (6) – eliminieren, indem wir an Stelle der ursprünglichen Phasen p_1 und p_2 (L_1 und L_2) die «ionosphärenfreie» Linearkombination p_3 verwenden:

Im folgenden diskutiert werden drei Lösungen:

- (1) Teilkampagne 1
- (2) Teilkampagne 2
- (3) Ganze Kampagne

Die Resultate mit den zugehörigen mittleren Fehlern sind in Tabelle 4 wiedergegeben. Als Resultate werden dort die geozentrischen Koordinaten im WGS-72 ausgewiesen. Dies soll nicht darüber hinwegtäuschen, dass effektiv ein Netz relativ zu Fairbanks bestimmt wurde. Deshalb sind die ausgewiesenen mittleren Fehler der betreffenden Stationsvektoren bezüglich Fairbanks zu verstehen.

Diese Fehler sind übrigens zu optimistisch (Faktor 1.5 bis 2), da die Korrelationen zwischen den zu ein und demselben Zeitpunkt verwendeten doppelten Differenzen nicht völlig korrekt modelliert wurden. (Zum Thema Korrelationen sei der Leser auf (Beutler et al., 1986) hingewiesen).

Verwenden dürfen wir diese mittleren Fehler bestimmt zur Beurteilung der relativen erreichten Genauigkeit in den zwei Teilkampagnen: Während im ersten Teil die Fehler pro Koordinate im Mittel 4.3 cm betrugen, resultiert im zweiten Teil ein Mittelwert von 7.3 cm. Ermutigend ist es, dass die Koordinaten von Nome (Fairbanks und Nome wurden in beiden Teilkampagnen beobachtet) in den drei Lösungen «nur» innerhalb eines Gebietes von 4 mal dem mittleren Fehler variieren.

Mehr Aufschluss über die Qualität unserer Lösungen liefert der Vergleich mit den VLBI-Koordinaten für dieselben Stationen. Zu diesem Zweck wurde zwischen der mittels (2), (3) ins WGS-72 transformierten VLBI-Lösung und den von uns produzierten GPS-Lösungen eine 7-Parameter-Helmert-Transformation (Ähnlichkeits-Transformation mit drei Translationen, drei Rotationen und einem Skalenfaktor) durchgeführt. Die Resultate sind in den Tabellen 5a, 5b und 5c einzusehen. Das Ergebnis darf für die erste Teilkampagne als sehr gut eingestuft werden: Nicht nur ist der mittlere Einheitsfehler der Transformation mit 5 cm sehr klein (in Anbetracht der Baseline-Längen (siehe Tabelle 1) dürfen wir von einer Übereinstimmung der Grössenordnung $5 \cdot 10^{-8}$ sprechen), auch die Transformationsparameter sind – abgesehen von einem Skalenfaktor von -3 mm/km – sehr klein. Eben diesen Skalenfaktor aber haben wir durch die Transformation (2), (3) der VLBI-Lösung ins WGS-72 eingeführt. Es ist für uns eine erfreuliche Tatsache, dass zwischen unseren GPS Resultaten und den ursprünglichen VLBI-Resultaten kein signifikanter Skalenfaktor besteht.

Wie zu erwarten sind die Resultate der zweiten Teilkampagne etwas weniger gut. Zu erwarten ist dieser Qualitätsunterschied wegen der bedeutend grösseren Anzahl von Parametern (anstatt 30 mussten 150 Bahnparameter, anstatt 48 mussten 81 «Ambiguity»-Parameter) bestimmt werden.

Resultate der 1984 Alaska GPS Kampagne (WGS-72)						
Teilkampagne 1						
Station	x	+-	y	+-	z	+-
Yakataga	-2529746.594	.06	-1942084.884	.02	5505026.131	.04
Fairbanks	-2281474.252	*)	-1453751.453	*)	5756980.069	*)
Nome	-2658149.827	.06	-693815.336	.05	5737235.775	.04
Sourdough	-2419995.194	.03	-1664222.637	.01	5643536.764	.02
Whitehorse	-2215216.342	.07	-2209255.835	.02	5540290.316	.04
Teilkampagne 2						
Station	x	+-	y	+-	z	+-
Fairbanks	-2281474.252	*)	-1453751.453	*)	5756980.069	*)
Kodiak	-3026941.124	.10	-1575903.948	.06	5370360.820	.06
Nome	-2658149.473	.05	-693815.254	.04	5737235.703	.03
Sandpoint	-3425462.444	.10	-1214659.951	.08	5223856.773	.08
Yellowknife	-1224128.635	.12	-2689527.342	.08	5633552.510	.07
Teilkampagnen 1 und 2						
Station	x	+-	y	+-	z	+-
Yakataga	-2529746.691	.06	-1942084.834	.02	5505026.157	.04
Fairbanks	-2281474.252	*)	-1453751.453	*)	5756980.069	*)
Kodiak	-3026941.197	.10	-1575903.977	.05	5370360.834	.06
Nome	-2658149.610	.04	-693815.273	.03	5737235.737	.02
Sandpoint	-3425462.591	.10	-1214660.008	.07	5223856.806	.07
Sourdough	-2419995.232	.03	-1664222.608	.01	5643536.776	.02
Yellowknife	-1224128.439	.10	-2689527.272	.07	5633552.451	.06
Whitehorse	-2215216.511	.06	-2209255.846	.02	5540290.354	.03

Tab. 4

*) Festgehalten

Residuen der Helmert Transformation zwischen der GPS-Lösung
der 1984 Alaska GPS Kampagne und der VLBI-Lösung
Teilkampagne 1

Station	VLBI – GPS (m)		
	x	y	z
Yakataga	0.057	–0.050	0.022
Fairbanks	–0.056	0.054	0.012
Nome	0.007	0.004	–0.002
Sourdough	0.053	–0.013	0.002
Whitehorse	–0.061	0.004	–0.034
Mittlerer Einheitsfehler der Transformation = 0.051 m			
Drehung um x-Achse:	0.12" ± 0.01"		
Drehung um y-Achse:	–0.01" ± 0.03"		
Drehung um z-Achse:	0.04" ± 0.01"		
Skalenfaktor :	–0.31 ± 0.04 mm/km		

Tab. 5a

Residuen der Helmert Transformation zwischen der GPS-Lösung
der 1984 Alaska GPS Kampagne und der VLBI-Lösung
Teilkampagne 2

Station	VLBI – GPS (m)		
	x	y	z
Fairbanks	0.031	0.091	–0.208
Kodiak	–0.257	0.110	–0.144
Nome	–0.064	0.023	0.142
Sandpoint	0.195	–0.165	0.127
Yellowknife	–0.005	–0.059	0.083
Mittlerer Einheitsfehler der Transformation = 0.188 m			
Drehung um x-Achse:	0.20" ± 0.04"		
Drehung um y-Achse:	–0.02" ± 0.03"		
Drehung um z-Achse:	0.01" ± 0.02"		
Skalenfaktor :	–0.32 ± 0.08 mm/km		

Tab. 5b

Residuen der Helmert Transformation zwischen der GPS-Lösung
der 1984 Alaska GPS Kampagne und der VLBI-Lösung
Teilkampagnen 1 und 2

Station	VLBI – GPS (m)		
	x	y	z
Yakataga	0.174	0.003	–0.205
Fairbanks	0.048	0.121	–0.098
Kodiak	–0.363	0.046	0.061
Nome	–0.070	0.098	0.109
Sandpoint	0.103	–0.226	0.283
Sourdough	0.157	0.045	–0.156
Yellowknife	–0.182	–0.154	0.359
Whitehorse	0.133	0.066	–0.353
Mittlerer Einheitsfehler der Transformation = 0.215 m			
Drehung um x-Achse:	0.16" ± 0.04"		
Drehung um y-Achse:	–0.01" ± 0.03"		
Drehung um z-Achse:	0.02" ± 0.02"		
Skalenfaktor :	–0.38 ± 0.09 mm/km		

Tab. 5c

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Insgesamt wurden bei der Auswertung der Alaska-Kampagne gegen 20000 doppelte Differenzen verarbeitet. Etwa 8500 entfielen auf die erste, etwa 12000 auf die zweite Teilkampagne. In jeder Teilkampagne wurde ein Netz von 5 Stationen vermessen. Der Vergleich der GPS-Lösung mit der VLBI-Lösung ist hervorragend für die erste Teilkampagne (besser als 10^{-7} , er ist gut immer noch überraschend gut für die problematische zweite Teilkampagne. Auf Grund der hier gesammelten Erfahrungen schliessen wir, dass

bei der Verarbeitung von GPS-Phasenbeobachtungen, stammend von vier oder mehr simultan arbeitenden Empfängern in einem Gebiet der Grösse $2000 \text{ km} \cdot 2000 \text{ km}$, bei der Verwendung von Bahnverbesserungstechniken Genauigkeiten besser als 10^{-7} erzielt werden können.

Referenzen:

- Bauersima, I. (1983): «NAVSTAR/Global Positioning System (GPS), (II).» Mitteilungen der Satellitenbeobachtungsstation Zimmerwald, No. 10, Astronomisches Institut, Universität Bern.
- Beutler, G., W. Gurtner, I. Bauersima, R. Langley (1985): «Modelling and Estimating the Orbits of GPS Satellites.» First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville, 1985.
- Beutler, G., W. Gurtner, M. Rothacher (1986): «Efficient Computation of the Inverse of the Covariance Matrix of Simultaneous GPS Carrier Phase Difference Observations.» To be published in Manuscripta Geodaetica.
- Gurtner, W. (1985): «GPS-Papers presented by the Astronomical Institute of the University of Berne in the Year 1985.» Mitteilungen der Satellitenbeobachtungsstation Zimmerwald, No. 18, Astronomisches Institut, Universität Bern.
- Gurtner, W. (1985): «GPS-Testmessungen auf dem CERN-LEP-Kontrollnetz.» Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 6/86.
- Mader, G.L., M.D. Abell (1985): «A Comparison Between Global Positioning System and Very Long Baseline Interferometry Surveys in Alaska and Canada.» First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville, 1985.
- Schildknecht, T. (1986): «The Contribution of GPS Pseudorange Registrations to the Evaluation of Carrier Phase Observations.» Mitteilungen der Satellitenstation Zimmerwald. In preparation.

Adresse der Verfasser:

PD Dr. Gerhard Beutler,
lic. phil. nat. Markus Rothacher
Astronomisches Institut Universität Bern
Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern