

Ein MatLab-Toolkit zur Analyse von GPS-Beobachtungen mit Modulen für die Ambiguity Function Methode

Benedikt Zebhauser *

Zusammenfassung

Um GPS-Anwendern Beobachtungsdaten, Modelle, Auswertalgorithmen und erreichbare Genauigkeiten näherzubringen, wurde ein modulares und erweiterbares Programmpaket in MatLab 5 entwickelt, das Zugriff auf Daten, Quellcodes und Laufzeitvariable zulässt und Ergebnisse graphisch visualisiert. Theorie und Software sind inklusive illustrierender Anwendungsbeispiele umfassend dokumentiert. Für die Auswertung von Trägerphasenbeobachtungen wurde die Ambiguity Function Methode, die unabhängig von cycle slips und Mehrdeutigkeiten ist, inkl. beurteilender Statistik weiterentwickelt, implementiert und validiert. Verlässliche Ergebnisse konnte die Methode nur auf kürzeren Punktentfernungen und mit Hilfe der sogenannten wide lane aus Zweifrequenzdaten erzielen. Eine Auswertestrategie mit Näherungs-kordinaten aus Pseudorange-DGPS und von Wellenlänge und Rasterweite abhängigem Positionssuchraum wird vorgeschlagen.

1. Entwurf eines GPS-Programmsystems für Lehre und Tests

Für das gewünschte Programmsystem stand zu Beginn die Forderung nach Praxisbezogenheit, Einblick in Theorie, Modularität bei gleichzeitig Übersichtlichkeit, geringe Wartezeiten, sowie überwiegend graphische Ergebnispräsentation.

Zu berücksichtigen war bei der Entwicklung das vergleichsweise problematische Datenhandling, das die Verarbeitungsprozeduren komplex und damit unübersichtlich macht. So hat man mit unterschiedlichsten Datentypen, -raten und -qualität, mit Lücken, Phasensprüngen und wechselnder Satellitenzahl, und mit stark unterschiedlichen Punktentfernungen etc. zu rechnen.

Die Motivation ergab sich aus dem wegen des stetig steigenden Schulungsbedarfs für die Nutzung von GPS in Geodäsie, Vermessung und Geoinformationssysteme, Geographie, Geologie, Geophysik, Luft und Raumfahrt, Telematik / Logistik, Landwirtschaft, Zeitübertragung, etc. ...

Das Ziel war, dass der Anwender Verständnis für die Grundlagen und Probleme der Punktpositionierung mit GPS entwickelt, insbesondere für die Satellitenbewegung, die Absolut- im Vergleich zu der Relativpositionierung, die Verarbeitung von Code- und Trägerphasenbeobachtungen, die Wiederholbarkeit von GPS-Ergebnissen, die Fehlereinflüsse, Modelle und Zielparameter. Der Übersichtlichkeit halber konzentriert sich das Programm auf die Untersuchung von Daten **einer** Basislinie, die Prozessierung **kurzzeit-statisch** beobachteter Daten und dabei **kurzen** Basislinien.

* Dr.-Ing. Benedikt Zebhauser, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Technische Universität München, D-80290 München, zebhauser@bv.tum.de

Nachfolgend sind die wichtigsten der implementierten Prozesse aufgelistet:

- Import von Daten (RINEX2.10)
- Beschränkung des Beobachtungszeitraums
- Berechnung und Darstellung ...
 - der GPS-Satellitenbahnen
 - der Satelliten- und Empfängeruhrfehler
 - von epochenweiser Einzelpunktbestimmung (SPP)
 - von epochenweisem DGPS mit Pseudorange
 - einer Trägerphasenauswertung nach der Ambiguity Function Methode inklusive Laning-Methoden
- Tools zur Koordinaten- und Zeitumwandlung
- Sichern von Ergebnisgraphiken und -texten

Zusätzlich sind Online-Hilfen und eine Online-Dokumentation (Handbuch, Variable, Formate, etc.) verfügbar. Eine **Abbildung im Anhang** am Ende dieses Aufsatzes gibt einen schematischen Überblick.

Die Realisierung erfolgte in MatLab5, das auf dem Prinzip der Interpreter- statt Compilersprache basiert, eine Entwicklungs- und Ausführungsumgebung enthält, Matrix-orientiert und -optimiert ist und einen schnellen Zugriff auf Daten, Quellcode und Laufzeitvariable sowie eine schnelle graphische Visualisierung erlaubt. Kurz: es ermöglicht Entwicklung, Berechnung und Visualisierung in einem.

2. Die Ambiguity Function Methode

2.1 Der allgemeine Ansatz

Bei der Ambiguity Function Methode handelt es sich um eine Methode der Radartechnik, die bereits Ende der 70er Jahre für die Auswertung von GPS-Trägerphasenbeobachtungen entdeckt wurde. Ausgangspunkt ist das Prinzip der Realivpositionierung: Man hält also die Koordinaten des Referenzpunkts A fest und bestimmt nachfolgend die Abweichungen im Roverpunkt B gegenüber eingeführten Näherungskordinaten. Zunächst bildet man den Widerspruch (in Phasenzyklen) aus beobachteten double difference Trägerphasen φ und berechneten double difference Strecken ψ bzgl. zweier Satelliten j,k aus Näherungs-kordinaten für A und B inklusive double difference Mehrdeutigkeiten und summiert den Kosinus über diesen Widerspruch über alle Beobachtungsepochen auf:

$$AF(\Delta \vec{x}) = \sum_t \cos(\varphi - \psi) = \sum_t \cos \left(2\pi \cdot \left(\nabla \Delta_{AB}^{jk} - \frac{S_{AB}^{jk}}{\lambda} - N_{AB}^{jk} \right) \right)$$

Je näher die eingeführten Näherungskordinaten an der "richtigen" Lösung liegen, desto geringer wird das berechnete Residuum und desto größer wird folglich der Kosinus des Residuums, sprich: desto größer wird der Wert der Ambiguity Function AF . Man sucht nun die Näherungskordinaten, welche zu einer Maximierung der Funktion führen. Und bereits hier wird der Vorteil dieses Ansatzes deutlich; die ganzzahligen Mehrdeutigkeiten N_{AB}^{jk} erzeugen nur Vielfache von 2π , ebenso cycle slips, so dass sich die Wirkung mit einer Modulo-Funktion der folgenden Form beschreiben lässt:

$$\text{mod} \left(\nabla \Delta_{AB}^{jk} - \frac{S_{AB}^{jk}}{\lambda} - N_{AB}^{jk} ; 1 \right)$$

Nun normiert und erweitert man den Ansatz noch so, daß die Summen über

- alle Beobachtungsepochen ne
 - alle (linear unabhängigen) double differences einer Epoche ($n-1$ Satelliten)
 - alle Frequenzen nf (wobei $nf=2$ nur, wenn L1 und L2 beobachtet wurde)
- gebildet werden, und man erhält die normierte Ambiguity Function NAF :

$$NAF(\Delta \vec{x}) = \frac{1}{ne} \sum_1^{ne} \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_1^{n-1} \left\{ \frac{1}{nf} \sum_1^{nf} \cos \left(2\pi \cdot \left(\nabla \Delta_{AB}^{jk} - \frac{S_{AB}^{jk}}{\lambda} \right) \right) \right\} \right\}$$

Das Ergebnis dieser Funktion wird immer $-1 \leq NAF \leq 1$ sein. Um die "richtige" Lösung für die als Näherungskordinaten eingeführte Position zu erhalten, ist ein sinnvoll diskretisierter Suchraum aufzuspannen, in welchem sich sicher (!) die gesuchte Position befindet. Mittelpunkt dieses Suchraums ist eine Näherungslösung, welche man aus Pseudorange-DGPS oder aus einer triple difference Trägerphasenlösung erhält, für die ebenfalls keine Mehrdeutigkeitsparameter anfallen. Die Diskretisierung des Positionssuchraums, also dessen Auflösung richtet sich nach der geforderten Genauigkeit der gesuchten Position, ungeachtet der natürlich verbleibenden systematischen wie auch zufälligen Fehler.

2.2 Suchen der "richtigen" Lösung im Positionsraum

Will man um die Näherungslösung X_B^0, Y_B^0, Z_B^0 einen 3D-Suchraum aufspannen, sind die notwendigen Verschiebungsvektoren aus den Richtungskosinussen

$$ax_B^{jk} = - \left(\frac{X^k - X_B^0}{S_B^k} - \frac{X^j - X_B^0}{S_B^j} \right), ay_B^{jk}, az_B^{jk} \quad \text{analog}$$

sowie aus den Verschiebungs-Vektorkomponenten

$$\begin{bmatrix} X_B^0 + m \cdot \Delta x_B \\ Y_B^0 + n \cdot \Delta y_B \\ Z_B^0 + l \cdot \Delta z_B \end{bmatrix}, \text{ wobei } Q(m, n, l) = \begin{bmatrix} \Delta X_B \\ \Delta Y_B \\ \Delta Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m \cdot \Delta x_B \\ n \cdot \Delta y_B \\ l \cdot \Delta z_B \end{bmatrix}$$

zu berechnen. Die Rasterweiten $\Delta x_B, \Delta y_B, \Delta z_B$ definieren die Auflösung, multipliziert mit ganzzahligen Faktoren m, n, l definieren sie dann einen jeweiligen Punkt im entstehenden Suchgitter. Damit lässt sich der vollständige Ansatz für die normierte Ambiguity Function anschreiben, der sich auf einen beliebigen Punkt im Suchgitter bezieht:

$$NAF(\Delta \vec{x}) = \frac{1}{ne} \sum_1^{ne} \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_1^{n-1} \left\{ \frac{1}{nf} \sum_1^{nf} \cos \left(2\pi \cdot \left(\nabla \Delta_{AB}^{jk} - \frac{S_{AB}^{jk}}{\lambda} - [ax_B^{jk} \quad ay_B^{jk} \quad az_B^{jk}] \cdot \frac{\mathcal{Q}}{\lambda} \right) \right) \right\} \right\}$$

Für akzeptablen Rechenaufwand empfiehlt sich ein maximales Gitterraster der Größe 21*21*21. Der Speicheraufwand liegt dann bei doppelter Genauigkeit um die 600 KB allein für die Variablen des Suchalgorithmus.

Will man die Position beispielsweise auf 1 cm auflösen, hätte der Suchkubus eine Ausdehnung von 21*21*21 cm. Da die Qualität der Näherungslösung oft nur bei rund 0.5 bis 1 m liegt, wäre ein größerer Suchraum nötig. Die Lösung muss allerdings innerhalb einer Wellenlänge gesucht werden, da sich Maxima der Funktion im Abstand von Wellenlängen bzw. ihrer Überlagerungen (aus den Beobachtungen zu den verschiedenen Satelliten) mit oft ähnlicher Größe wiederholen. Um solch eine Mehrdeutigkeit des Positionsergebnisses zu vermeiden, schafft nur die Wahl einer größeren Wellenlänge Abhilfe, damit man bei gleicher Anzahl Gitterpunkte einen größeren Suchraum erhält. Auf die Möglichkeit zur Erzeugung größerer (synthetischer) Wellenlängen, das sogenannte Laning, wird in Abschnitt 2.3 näher eingegangen. Die Suchschrittweite oder auch Rasterweite r

$$r = \Delta x_B = \Delta y_B = \Delta z_B$$

soll also variabel bleiben, doch sollte sie auf allen Vektorkomponenten gleichen Abstands sein.

2.3 Laning-Methoden

Um zu größeren synthetischen Wellenlängen der Trägerphasenbeobachtungen zu kommen, bildet man Linearkombinationen aus Beobachtungen auf L1 und L2. Dies erfolgt so, dass sich noch weitere spezifische Eigenschaften der resultierenden Beobachtungstypen ergeben, z.B.

- Verstärkung oder Abschwächung des ionosphärischen Fehleranteils oder auch
 - verringerte Rauschanteile
- im Verhältnis zur resultierenden Wellenlänge.

Bildet man die Linearkombination [cycles] der Trägerphasenbeobachtungen auf L1 und L2, wobei n und m beliebige Faktoren sein könnten,

$$\Phi_{n,m} = n \cdot \Phi_1 + m \cdot \Phi_2$$

erhält man als resultierende Wellenlänge [metrisch]

$$\lambda_{n,m} = \frac{c}{n \cdot f_1 + m \cdot f_2} \quad ,$$

f_1, f_2 seien die Trägerfrequenzen auf L1, L2,
 c sei die Lichtgeschwindigkeit,

als resultierendes Rauschen [metrisch]

$$\sigma_{n,m} = \lambda_{n,m} \cdot \sqrt{n^2 + m^2} \cdot \frac{0.1}{2\pi} ,$$

sowie für den ionosphärischen Verstärkungsfaktor (einheitslos)

$$V_I = \frac{n \cdot f_2 + m \cdot f_1}{n \cdot f_1 + m \cdot f_2} .$$

Gesucht wird für unsere Zwecke nun eine Kombination mit vielfach größerer Wellenlänge als L1 für die Bildung eines großen Suchraums, mit stark reduziertem ionosphärischem Rauschen, unter Beibehaltung ganzzahliger Mehrdeutigkeiten. Letzterer Punkt kann durch die Wahl ganzzahliger Faktoren n und m erreicht werden. Die nachfolgende Tabelle zeigt die zwei interessantesten Linearkombinationen im Vergleich zu L1. Die sogenannte Wide Lane Lw verfügt bei mäßiger Rauscherhöhung über eine mehr als vierfach größere Wellenlänge, während L43 sich bei allerdings nur noch halber Wellenlänge durch drastisch reduzierten ionosphärischen Einfluss auszeichnet.

Tabelle: Vergleich verschiedener Linearkombinationen aus L1 und L2

Linearkombination	L1	Lw	L43
Faktor n	+1	+1	+4
Faktor m	0	- 1	- 3
$\lambda_{n,m}$ [m]	0.19	0.86	0.11
V_I	0.779	-1.0	0.07
$\sigma_{n,m}$ [mm]	3	19	9
Suchkubus bei 21*21*21 [m]	± 0.4	± 1.5	± 0.2

Sinnvoll erscheint also, zunächst einen großen Suchraum mit Hilfe der Wide lane Lw abzusuchen und nachfolgend mit der so erhaltenen Positionslösung in einem kleineren Suchraum die Position mit Hilfe der L43 zu verbessern, wenn man längere Basislinien bearbeitet, die vom Einfluss der ionosphärischen Refraktion stärker betroffen sind.

2.4 Statistische Größen

Zur Beurteilung liegen hier nicht die sonst gewohnten statistischen Informationen vor, wie man sie aus einer Schätzung nach der Methode der kleinsten Quadrate zur Verfügung hat. Doch kann z.B. ein Plausibilitätstest mit Hilfe eines mittleren Residuums aus der Umkehrung der Ambiguity Function

$$m_{res} = \lambda \cdot \frac{\arccos(\max(NAF))}{2\pi} \quad \text{mit} \quad \lambda = \lambda_1, \lambda_{Lw}, \lambda_{L43}, \dots$$

durchgeführt oder ein "Maß der Qualität über Alles"

$$\sigma_Q = \sqrt{\left(\frac{m_{res}}{2} \cdot RDOP\right)^2 + \left(\frac{r}{2}\right)^2} \quad \text{mit } r \text{ als Rasterweite,}$$

gebildet werden. Der RDOP (*Relative Dilution of Precision*) berechnet sich aus

$$RDOP = \frac{1}{ne} \cdot \sum_1^{ne} RDOP(t)$$

$$RDOP(t) = \sqrt{\text{Spur}(A^T A)^{-1}}$$

Die Kovarianzmatrix der Unbekannten und damit die Standardabweichungen der Koordinaten lassen sich aus einer über alle Epochen gemittelten Designmatrix, welche die mittlere Geometrie widerspiegelt, ableiten:

$$\hat{K}_{\hat{x}\hat{x}} = \sigma_Q^2 \cdot (\bar{A}^T \bar{A})^{-1} \quad \rightarrow \quad \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$$

Die Designmatrix enthält die unter Abschnitt 2.2 angegebenen Richtungskosinusse.

2.5 Auswertestrategie

Folgende Prozessierungsschritte stellen ein empfehlenswertes Vorgehen dar: Nach den ersten beiden Schritten zur Berechnung einer adäquaten Näherungslösung

1. Schritt	Einzelpunktlösung mit Pseudorange
2. Schritt	DGPS mit Pseudorange

bildet man einen Suchkubus mit 21*21*21 Gitterpunkten, in welchem dann, je nach Basislinienlänge, mit unterschiedlichen Beobachtungsgrößen und Rasterweiten schrittweise die Positionsauflösung (und hoffentlich auch die Genauigkeit) verbessert wird:

AF-Methode	Linearkombination	Wellenlänge [m]	Rasterweite r [m]	⇒ Suchkubus-Kantenlänge [m]
3. Schritt	Lw	0.86	0.2	4.0
4. Schritt	Lw	0.86	0.1	2.0
5. Schritt	Lw	0.86	0.03	0.6
6. Schritt	L1,L2 oder L43	0.2 oder 0.1	0.01	0.2
7. Schritt	L1,L2 oder L43	0.2 oder 0.1	0.003	0.06

Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass die Vorteile dieses Ansatzes nur bei Daten von Zweifrequenzempfängern genutzt werden können, da sonst keine Linearkombinationen und somit auch keine größeren Wellenlängen möglich sind.

2.6 Beispiele für die Visualisierung im Programm

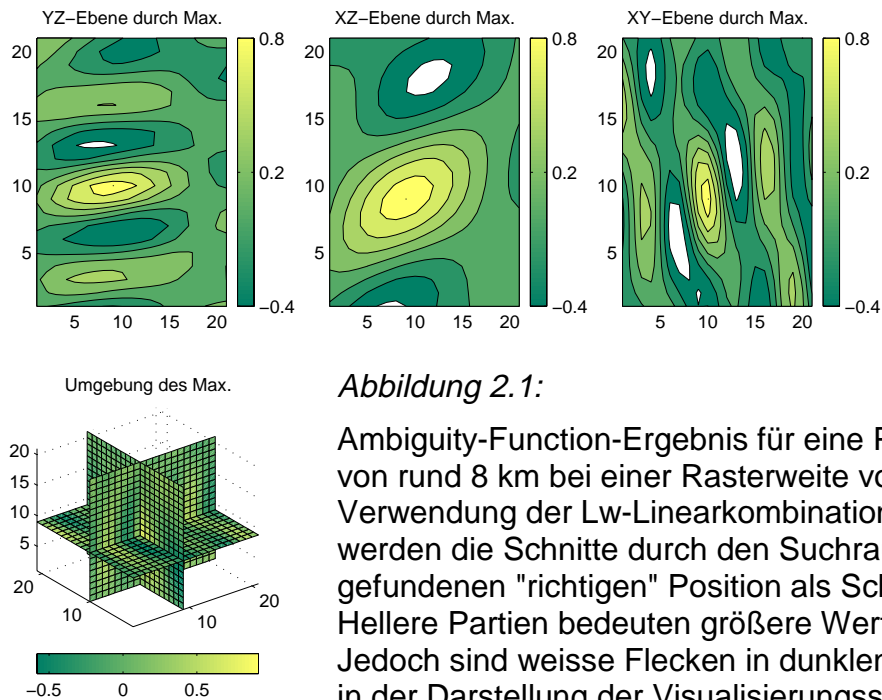


Abbildung 2.1:

Ambiguity-Function-Ergebnis für eine Punktentfernung von rund 8 km bei einer Rasterweite von 10 cm unter Verwendung der Lw-Linearkombination. Dargestellt werden die Schnitte durch den Suchraum mit der gefundenen "richtigen" Position als Schnittpunkt. Hellere Partien bedeuten größere Werte, also Maxima. Jedoch sind weiße Flecken in dunklen Partien Fehler in der Darstellung der Visualisierungssoftware und stets an der Stelle von Minima (sollten schwarz sein).

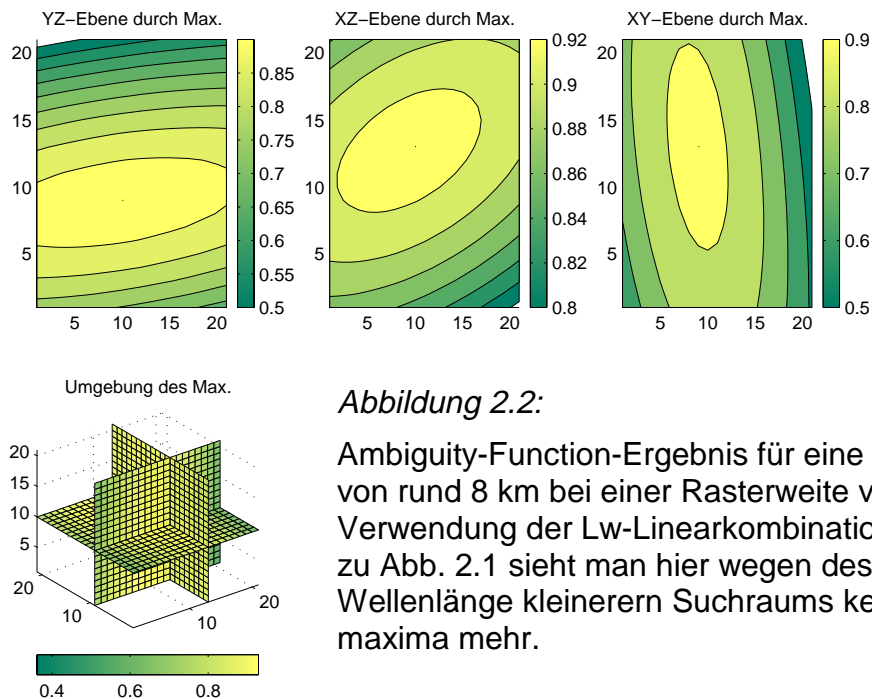


Abbildung 2.2:

Ambiguity-Function-Ergebnis für eine Punktentfernung von rund 8 km bei einer Rasterweite von 1 cm unter Verwendung der Lw-Linearkombination. Im Gegensatz zu Abb. 2.1 sieht man hier wegen des im Vgl. zur Wellenlänge kleinerern Suchraums keine Nebenmaxima mehr.

Weitere Beispiele und Darstellungen sowie eine ausführlichere Beschreibung von Software und Theorie finden sich in ZEBHAUSER (2000).

2.7 Ergebnisse bei statischen Kurzzeitmessungen (Rapid Static)

Um es vorwegzunehmen: Nicht bei allen Datensätzen konnte ein solcher Erfolg wie bei dem nachfolgend vorgestellten Beispiel erzielt werden, insbesondere bei Basislinien über 10 km gab es häufiger Probleme. Mit einem Testdatensatz (Punktentfernung 8 km, Datenrate: 5 sec., Elevationsmaske: 10°), dessen Aufzeichnung unter leicht erhöhter Ionosphärentätigkeit (11/1998) erfolgte, wurden Lösungen mit der Ambiguity Function Methode berechnet, wobei die gewählte Rasterweite 1 cm betrug und L1- und L2-Beobachtungen verarbeitet wurden. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Ergebnisse, wenn man die Beobachtungsdauer kontinuierlich herabsetzt. Für andere Zeitabschnitte des Testdatensatzes ergaben sich allerdings auch manchmal wesentlich schlechtere Werte.

Tabelle: Rapid Static, Untersuchung im cm-Raster, Abweichungen vom Soll (Betrag)

Beob.dauer [min : sec]	Σ aller Einzelbeob.	Abweichung in X [cm]	Abweichung in Y [cm]	Abweichung in Z [cm]
64:35	9397	0	0	3
32:45	4728	1	0	1
16:00	2316	1	2	0
7:20	1068	0	2	3
3:20	492	0	2	3
1:40	252	1	2	4
0:40	108	1	2	4
0:20	60	1	2	4

Man sieht zwar das Potential der Methode, doch die Abweichung von der Solllösung ist (aus geodätischer Sicht) nicht sonderlich befriedigend; sie ändert sich auch bei höherer Auflösung nicht mehr wesentlich. Da jedoch die Modelle z.B. für die troposphärische Refraktion in der Software sehr einfach gehalten wurden, ist die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Ergebnissen sicherlich noch steigerbar.

Bei der Anwendung der Wide Lane Linearkombination Lw ergaben sich vor allem bei längeren Basislinien stets deutlichere Maxima und zuverlässigere wie auch oft genauere Positionslösungen.

2.8 Historischer Abriss zum Einsatz der Ambiguity Function

Schon vor vielen Jahrzehnten wurde die Ambiguity Function für Ortungszwecke bei der Auswertung von Radarmessungen verwendet (siehe z.B. URKOWITZ, 1966). Erst mit COUNSELMAN und GOUREVITCH (1981) fand die Methode Einzug in die Auswertung von GPS-Beobachtungen. Drei Jahre später formulierte REMONDI (1984) seinen exponentiellen Ansatz für single difference Phasenbeobachtungen. MADER (1992) entwickelte einen Kosinus-Ansatz für double difference Phasenbeobachtungen und HAN und RIZOS (1996) ergänzten REMONDI's Ansatz u.a. um die Laning-Methoden und eine Statistik. LACHAPPELLE (1992), LU und LACHAPPELLE (1992) oder auch ABIDIN et al. (1991) setzten die Ambiguity Function als Testfunktion bei der Mehrdeutigkeitssuche ein. In der Dissertation des Autors (ZEBHAUSER, 2000) wurde an MADER's Ansatz angeknüpft.

3. Frei verfügbare Software

Für alle, die mit der Interpretersoftware MatLab 5.x unter Windows arbeiten, ergibt sich die Möglichkeit, die vollständige Software inklusive ausführlicher Dokumentation und diversen Testdatensätzen via Internet herunterzuladen, auszuprobieren und ganz oder teilweise weiterzuverwenden. Der Vorteil des lesbaren ASCII-Quellcodes von MatLab sollte eine schnelle Einarbeitung in die Datenstruktur ermöglichen. Die Benutzung des menügesteuerten Programms und die Interpretation der Ergebnisse sollte für einen GPS-erfahrenen Anwender nach Durchlesen des Online-Manuals möglich sein. Ich hoffe, dass das Programm rege Anwendung findet, insbesondere auch in der Lehre. Die Software ist frei verfügbar und abrufbar unter:

<http://www.iapg.bv.tum.de/ftp/contrib/gpslab/gpslab.html>

Voraussetzung ist nur das Vorhandensein von MatLab 5.x .

4. Resumee und Ausblick

4.1 Zum Einsatz der Ambiguity Function bei GPS

Es hat sich gezeigt, dass die Methode auf lokalen Bereich beschränkt und nur bei einer Beobachtung mit Zweifrequenzempfängern sinnvoll ist. Die erreichbaren Genauigkeiten liegen im Bereich mehrerer Zentimeter. Eine Erweiterung des Ansatzes auf zusätzliche Unbekannte ist insbesondere im Hinblick auf den dann explodierenden Speicherplatzbedarf kritisch.

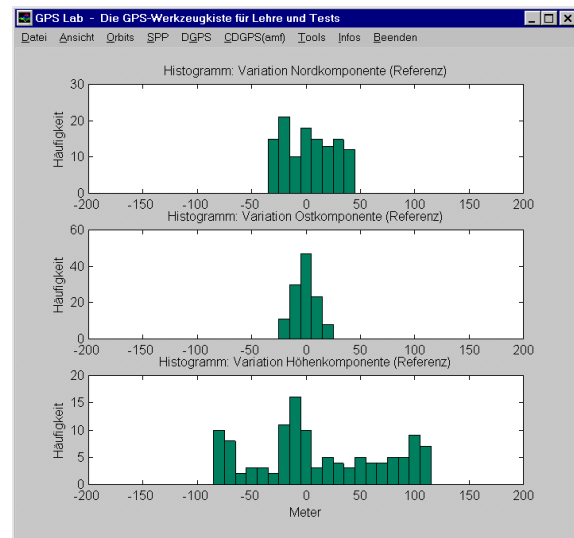
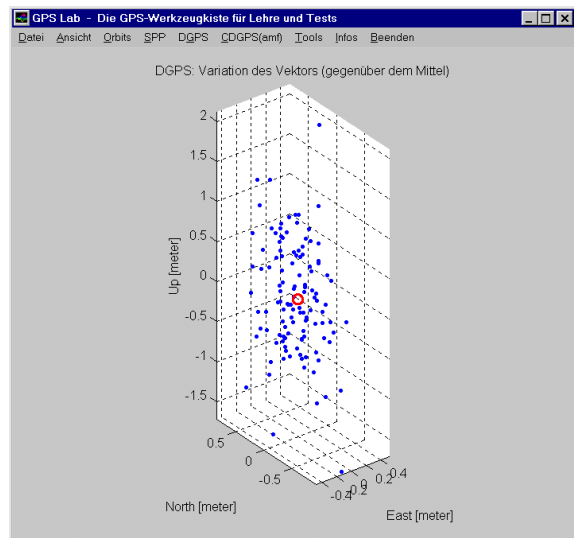
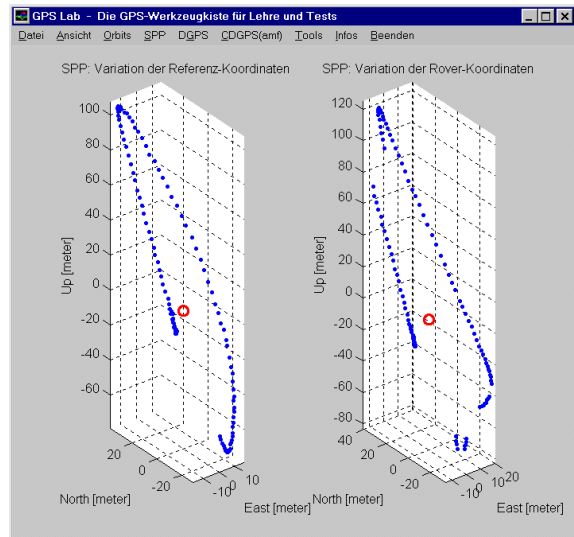
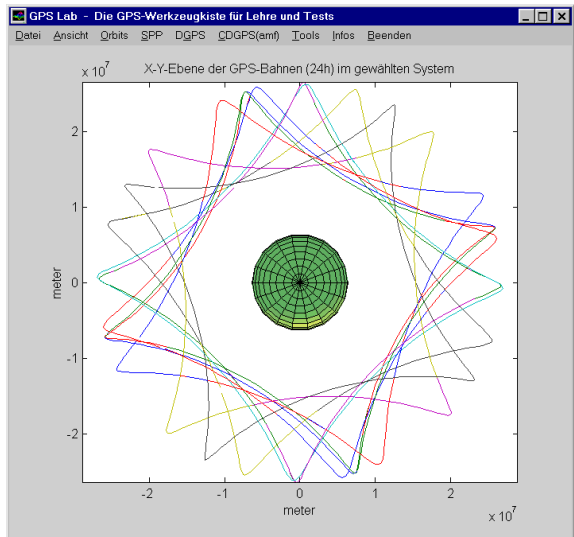
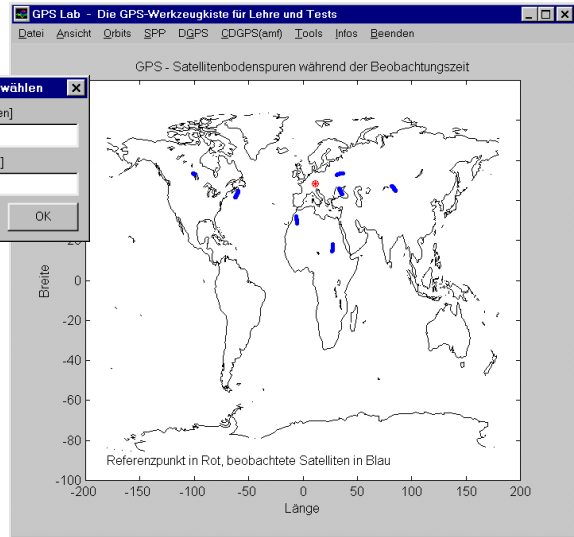
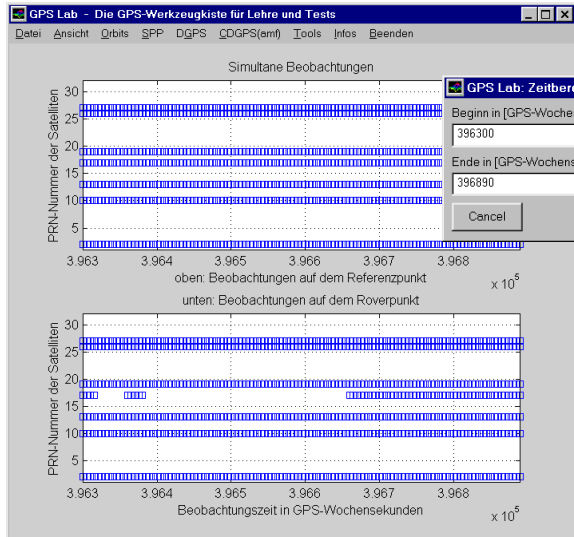
4.2 Denkbare Software-Erweiterungen

Die Software-Realisierung ist nicht in der Qualität, wie sie für die "Produktion" von Ergebnissen in Ingenieurbüros oder in Projekten mit hoher Zuverlässigkeitsforderung erwartet wird. Sie ist optimiert für das Kennenlernen von GPS-Observablen, Fehlerquellen und Auswerteprozeduren, für den Einsatz in der Lehre und Schulung sowie für die schnelle Implementierung von eigenen Entwicklungen zu ersten Testzwecken. Einige Erweiterungen scheinen bei näherer Betrachtung noch wünschenswert: Das Einführen von präzisen Ephemeriden, die Ausgleichung von Netzen aus berechneten Vektoren, die Berechnung und Visualisierung der Satelliten-Sichtbarkeit, Zeitreihen-Darstellung unterschiedlicher Beobachtungsgrößen, eine triple difference Lösung, die allgemeinübliche double difference Lösung mit Suche im Mehrdeutigkeitsraum, sowie die Ausweitung auf kinematische Anwendungen.

Anhang:

Beispiele einiger Screenshots, Softwareschema

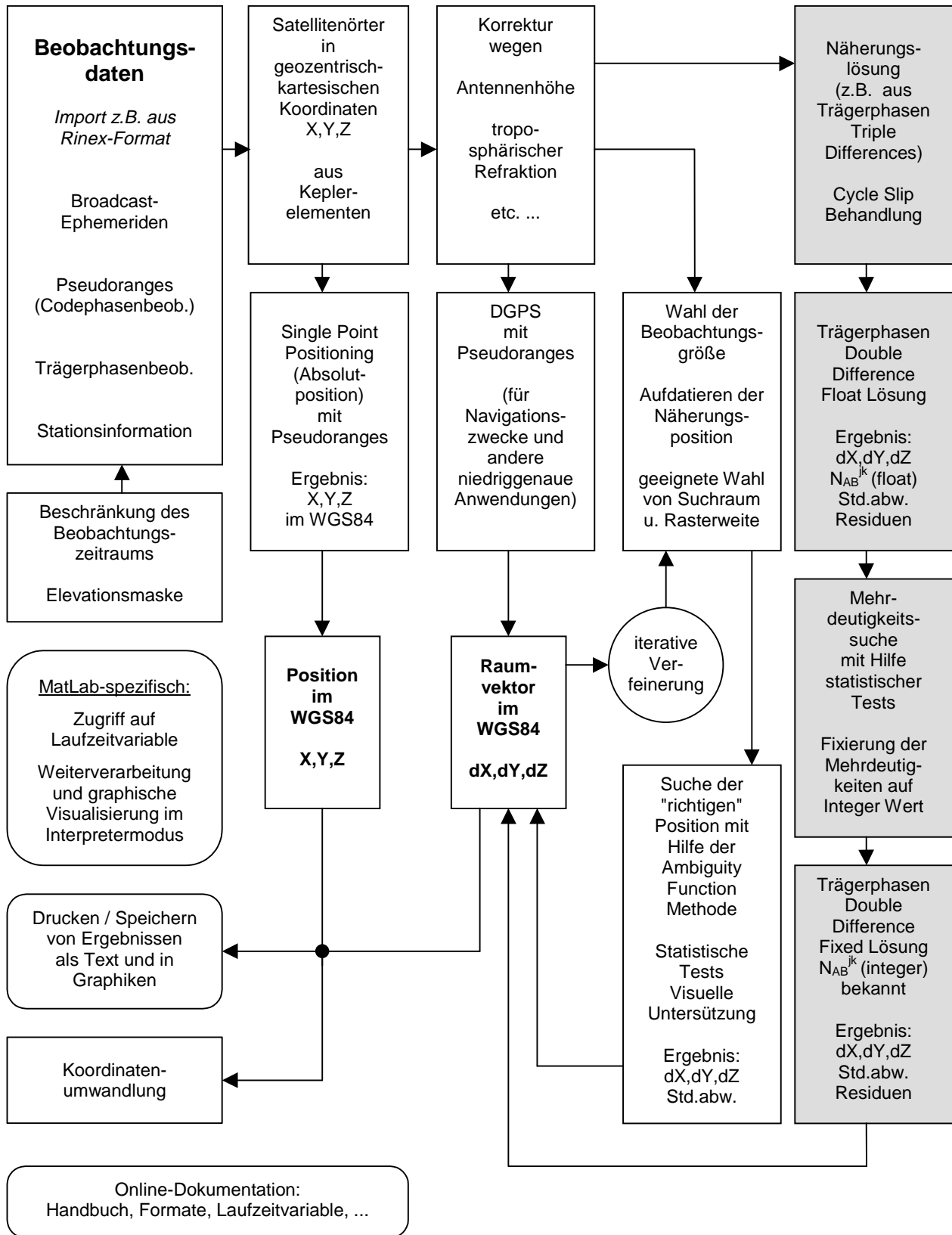
Auf der nächsten Seite sind Screenshots des in Abschnitt 1 kurz vorgestellten Programms bei der Anwendung verschiedener Menüpunkte abgebildet, auf der übernächsten Seite folgt das in Abschnitt 1 erwähnte Softwareschema:



Oben links: Anzeige/Auswahl des Auswerte-Zeitbereichs; **oben rechts:** Satellitenbodenspuren für die Beobachtungszeit; **mitte links:** polare Sicht auf die Satellitenbahnen; **mitte rechts:** epochenweises single point positioning (SPP); **unten links:** epochenweise DGPS-Lösung; **unten rechts:** Histogramm zum SPP eines Punkts

Schematische Darstellung der GPS-Auswertesoftware

(die grauen Module rechts sind nicht implementiert, stellen jedoch die klassische Methode dar)



Literatur

- Abidin, Wells, Kleusberg (1991):** Multi-Monitor Station 'On the Fly' Ambiguity Resolution: Theory and Preliminary Results, in: DGPS'91: First International Symposium Real Time Differential Applications of the GPS, Volume I, S.44-56, Verlag TÜV Rheinland, Köln
- Counselman, Gourevitch (1981):** Miniature Interferometer Terminals for Earth Surveying: Ambiguity and Multipath with Global Positioning System. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-19, No.4, October 1981
- Han, Rizos (1996):** Improving the computational efficiency of the ambiguity function algorithm. Journal of Geodesy (1996) 70: 330-341, Springer-Verlag
- Lachapelle (1992):** High Precision GPS Navigation with Emphasis on Carrier Phase Ambiguity Resolution. In: Linkwitz, Hangleiter (eds.): High Precision Navigation 91. Proceedings of the 2nd International Workshop on High Precision Navigation, Stuttgart and Freudenstadt, November 1991. Dümmler Verlag Bonn
- Lu, Lachapelle (1992):** Statistical quality control for kinematic GPS positioning. manuscripta geodaetica (1992) 17: 270-281, Springer-Verlag Berlin
- Mader (1992/1):** Rapid Static and Kinematic GPS Solutions Using the Ambiguity Function Technique. Journal of Geophysical Research, Vol.97, No.B3, pp. 3271-3283
- Mader (1992/2):** Kinematic GPS Phase Initialization using the Ambiguity Function. In: Proceedings of the 6th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, The Ohio State University, Columbus, Ohio
- Remondi (1984):** Using the Global Positioning System (GPS) Phase Observable for Relative Geodesy: Modelling, Processing, and Results. Dissertation, The University of Texas at Austin
- Urkowitz (1966):** Ambiguity and Resolution. In: Berkowitz (1966) (ed.): Modern Radar. Analysis, Evaluation and System Design. 2. Auflage, John Wiley & Sons, New York
- Zebhauser (2000):** Zur Entwicklung eines GPS-Programmsystems für Lehre und Tests unter besonderer Berücksichtigung der Ambiguity Function Methode. DGK Reihe C, Heft Nr. 523, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München; digitale Variante (mit farbigen Abbildungen): http://www.iapg.bv.tum.de/ftp/contrib/gpslab/zebhauser_diss4web.pdf