

GPS–Anwendungen in der Sportwissenschaft

Dipl.-Ing. Thomas Blumenbach
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Augath (Projektleiter)
Geodätisches Institut, TU Dresden

18. März 2003

1 Einleitung

Seit längerer Zeit wird am Geodätischen Institut ein Forschungsprojekt¹ betrieben, das den Einsatz von GPS im Bereich der Sportwissenschaft zum Inhalt hat. Erste Tests in den Jahren 1999/2000 wurden mit geodätischen GPS-Empfängern durchgeführt. Dabei erwies sich vor allem die relativ große Masse der robusten Instrumente als problematisch.

Für weitere Untersuchungen war gefordert worden, kleinere und leichtere Geräte einzusetzen. Dank der rasanten Entwicklungsgeschwindigkeit auf dem Gebiet der Empfängertechnologie konnten in diesem Punkt wesentliche Fortschritte verzeichnet werden.

Dieser Beitrag beschreibt im ersten Teil die Entwicklung eines optimierten Spezialempfängers für Einsatzgebiete mit Forderungen nach

- geringsten Abmessungen,
- kleinem Gewicht,
- höchster zeitlicher Auflösung und
- Zentimetergenauigkeit der Messung

Der zweite Teil des Beitrags dokumentiert den aktuellen Stand geodätischer GPS-Berechnungssoftware. Getestet wurden verschiedene Produkte auf ihre Leistungsfähigkeit unter komplizierten Messbedingungen. Zur Qualitätsbeurteilung wurden kinematische Testdaten bzgl. Satellitenanzahl und Dauer der Messung systematisch variiert.

¹Dieses Projekt wurde mit Forschungsmitteln des Bundesinstituts für Sportwissenschaft unter dem Geschäftszeichen VF 0408/06/01/2000-2002 gefördert.

2 Empfängerentwicklung

2.1 Auswahl eines GPS-Empfängers

Für den Einsatz in der Sportwissenschaft muss ein GPS-Empfänger klein und leicht sein, damit möglichst rückwirkungsfrei gemessen werden kann. Deshalb wurde eine Marktanalyse nach schnellen, kleinen und leichten Zweifrequenzempfängern durchgeführt. Am Ende wurde ein *NovAtel OEM4*-Board ausgewählt. Dieser 20 Hz-Empfänger war in Frühjahr 2002 verfügbar, jedoch nicht direkt einsatzfähig, denn bei dem Gerät handelt es sich um eine Platine ohne Gehäuse, Bedienelemente, Stromversorgung und Speichermöglichkeit.

Deshalb wurde nach Industrieprodukten gesucht, die die Steuerung und Datenspeicherung übernehmen. Die Suche gestaltete sich schwierig, da bei der seriellen Rohdatenausgabe mit hoher Messrate Übertragungsgeschwindigkeiten von 230 kbaud notwendig sind. Dies ist nicht mehr PC-Standard und muss i.d.R. durch Zusatzhardware realisiert werden. Es konnten keine bezahlbaren Industrie-PCs im PC/104- oder DIMM-PC Format gefunden werden, die den Anforderungen nach geringem Volumen und kleinem Energieverbrauch entsprachen und dennoch hohe Leistungsfähigkeit bieten.

2.2 Eigene Lösung

Da im Bereich der Standardkomponenten zumindest zu bezahlbaren Preisen keine Lösung vorhanden war, wurde die Entscheidung zur Eigenentwicklung der Steuerung des Mobilempfängers getroffen.

Es entstand ein microprozessorgesteuertes Modul mit Tastaturinterface, LED-basierter Zustandsanzeige und einer Speicherkapazität von 8 Megabyte. Als Speichermedium wurde Flash-Speicher gewählt, damit die Daten auch bei abgeschalteter Versorgungsspannung erhalten bleiben.

Durch den Einsatz von platzsparenden *SMT*-Bauteilen beträgt die Gesamtmasse der Steuer- und Speichereinheit ganze 15 Gramm. Die Platine ist so mit dem *OEM4*-Board verbunden, dass Länge und Breite des GPS-Empfängers maßgebend sind. Die Bauhöhe vergrößert sich nur um 8 mm. Der Energiebedarf liegt bei 0.2-0.5 Watt.



Abbildung 1: Der fertig aufgebaute Zweifrequenzempfänger.

Somit konnten alle Vorteile der *OEM4*-Karte bzgl. Größe und Gewicht optimal genutzt werden. Der vollwertige geodätische GPS-Empfänger im Westentaschenformat, vgl. Abbildung 1, hat eine Masse von 270 Gramm. Zwei Lithium-Batterien (90 Gramm) sichern einen stabilen Betrieb über Stunden. Das leichte und dennoch robuste Aluminiumgehäuse stellt einen sehr guten Kompromiss zwischen Stabilität und Masse dar. Für die Untersuchungen im Skisprungbereich wurde der Empfänger in einer kleinen Gürteltasche an der Hüfte des Athleten getragen.

2.3 Funktionsprinzip des Mobilempfängers

Anhand von Abbildung 2 soll der prinzipielle Aufbau des GPS-Empfängers dargestellt werden. Hauptbestandteil ist der GPS-Sensor selbst. Er ist mit der Antenne über ein entsprechendes Kabel verbunden. Eine externe Batterie versorgt al-

le Baugruppen des Mobilempfängers mit Strom. Ein Regler sorgt für gleichbleibende Spannung in allen Komponenten des Gerätes. Da die Antenne einen internen Vorverstärker besitzt, dient das Antennenkabel gleichzeitig zu dessen Energiezufuhr.

Die Tastatur und die LED-Anzeigen bilden die Schnittstelle zum Anwender. Folgende Funktionen sind per Tastendruck ausführbar:

- Ein- und Ausschalten des Geräts
- Messung starten
- Messung beenden
- Daten zum PC übertragen
- internen Speicher löschen
- Reset/Warmstart des GPS-Empfängers

Da die Aufzeichnungsparameter, wie z.B. Elevationsmaske und Datenrate fest vorgegeben sind, konnten o.a. Funktionen mit einem Hauptschalter und vier Drucktasten realisiert werden. Eine intelligente Tastatursteuerung überwacht die Plausibilität der Nutzereingaben.

Für eine leichte Bedienbarkeit des Gerätes sind Rückmeldungen zum Nutzer notwendig. Aus Platz- und Kostengründen wurde eine Anzeige mit LEDs eingesetzt. Farblich unterschiedliche Leuchten signalisieren folgende Systemzustände:

- Anzahl aktuell empfangener Satelliten (Blinkcode)
- Datentransfer
- Schwache Batterie
- Hardware-Fehler (Blinkcodes)

Die zentrale Steuereinheit besteht aus einem Einchip-Microprozessor. Dieser sorgt für die Entgegennahme der Tastaturbefehle, die Ausgabe der Systemzustände, die Ansteuerung des GPS-Empfängermoduls, die Messdatenübernahme sowie den Datentransfer zur Speichereinheit. Über eine serielle Schnittstelle liefert der Prozessor nach Beendigung der Messungen die Daten an einen angeschlossenen PC oder Laptop.

Sämtliche Baugruppen sind in einem stabilen, aber dennoch leichten Gehäuse untergebracht. Dieses besteht aus elektrisch leitfähigem Material, denn nicht nur die gesamte Schaltung muss vor elektromagnetischen Störeinstrahlungen geschützt werden, sondern das Gerät selbst darf keine Störungen in der Antenne hervorrufen. Das

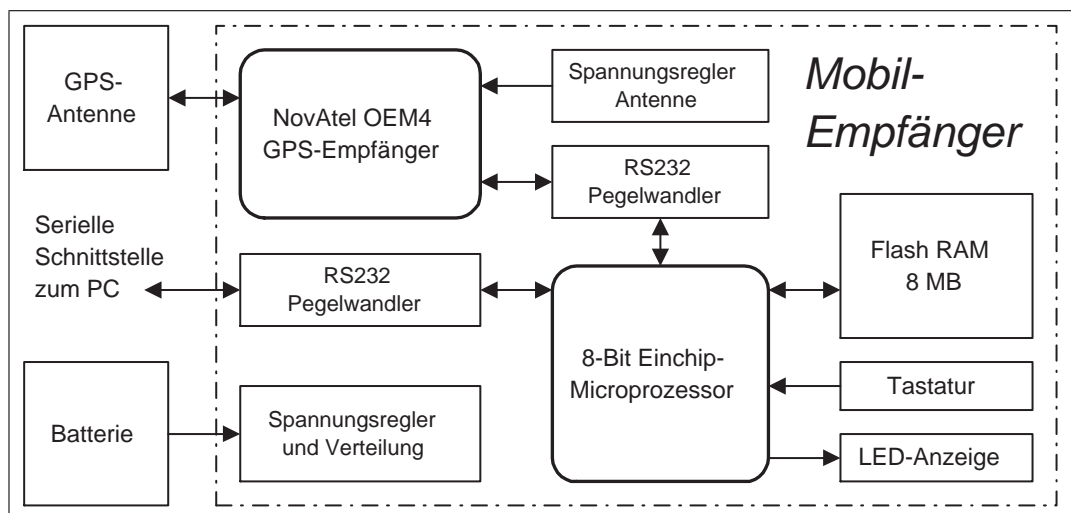


Abbildung 2: Blockschaltbild des mobilen GPS-Empfängers

Gehäuse ist so konstruiert, dass das Verletzungsrisiko für den Athleten im Falle eines Sturzes gering ist.

3 GPS-Softwarevergleich

Bei der kinematischen Vermessung mit GPS geht der Trend hin zu immer kürzeren Messzeiten. Dabei treten Probleme in Bezug auf die Korrektheit der Koordinatenlösungen auf. Je kürzer die Messzeit ist, desto weniger ändert sich die Empfänger-Satelliten-Geometrie und um so unsicherer ist die Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten auf ganzzahlige Werte. Es kann im ungünstigsten Fall also zu falschen Positionslösungen kommen.

Der hier vorgestellte Test untersucht die Zuverlässigkeit der Mehrdeutigkeitslösung kinematischer GPS-Daten auf kurzen Basislinien unter erschwerten Bedingungen. Dabei wurde die Anzahl verfügbarer Satelliten sowie die Beobachtungsdauer systematisch variiert. Die Überprüfung der Richtigkeit einer Lösung ist auf mehreren Ebenen möglich. Bei kommerziellen Produkten hat der Nutzer vielfach keine Möglichkeit, an Zwischenergebnisse der Berechnung zu gelangen. Um trotzdem Vergleichbarkeit zu gewährleisten, erfolgte die Bewertung auf Koordinatenebene. Dies stellt einen durchgreifenden Test dar, da der Nutzer im Allgemeinen an einer Koordinatenlösung interessiert ist. Das Problem von Koordinatenverschiebungen auf Grund wechselnder Satellitenkonstellationen wurde bei der Berech-

nung der Solllösung berücksichtigt.

Zum Test standen drei verschiedene Softwarepakete zur Verfügung. Diese Produkte sind primär für den Produktionseinsatz im Ingenieurbüro entwickelt worden und haben meist vollautomatisierte Auswerteprozesse mit mehr oder weniger Eingriffsmöglichkeiten durch den Anwender.

Dadurch wird deutlich, welche Software zu wissenschaftlichen Experimenten besser oder schlechter geeignet ist. Der folgende Vergleich soll die Stärken und Schwächen der einzelnen Produkte in Bezug auf die Prozessierbarkeit problematischer Datensätze aufzeigen.

Die Anzahl verfügbarer Satelliten wurde schrittweise von neun auf vier herabgesetzt. Dabei wurden immer die am niedrigsten stehenden Satelliten ausgeschlossen. Damit ergibt sich ein realistisches Szenario, wie es in urbanen Gebieten oder in Gebirgstälern vorzufinden ist. Die Beobachtungsdauer wurde für jede Satellitenkonstellation von 360 Sekunden schrittweise auf 15 Sekunden reduziert. Damit ergaben sich 48 verschiedene Kombinationen mit entsprechenden DOP-Faktoren.

3.1 Trimble Total Control Vers. 2.70

Nach Herstellerangaben wird das Mehrdeutigkeitsproblem bei kinematischen Zweifrequenzdaten mit *On-The-Fly*-Methoden (OTF) gelöst. Das bedeutet, dass keine statische Initialisierung erfolgen muss. Die Initialisierung erfolgt ab fünf

Beobachtungsdauer [sec]	Satellitenanzahl und (PDOP)					
	9 (2.5)	8 (2.9)	7 (3.1)	6 (4.1)	5 (6.6)	4 (9.6)
360	fixed	fixed	fixed	fixed	fixed	-
120	fixed	fixed	fixed	fixed	fixed	-
90	fixed	fixed	fixed	fixed	fixed	-
60	fixed	fixed	fixed	fixed	-	-
45	fixed	fixed	fixed	fixed	-	-
30	fixed	fixed	fixed	fixed	-	-
15	fixed	fixed	fixed	fixed	-	-

Tabelle 1: Lösbarkeit von GPS-Mehrdeutigkeiten in Abhängigkeit von Satellitenanzahl und Beobachtungsdauer mit der Software *Trimble Total Control*

Beobachtungsdauer [sec]	Satellitenanzahl und (PDOP)					
	9 (2.5)	8 (2.9)	7 (3.1)	6 (4.1)	5 (6.6)	4 (9.6)
360	fixed	fixed	fixed	fixed	float ²⁾	float ³⁾
120	fixed	fixed	fixed	fixed	float ²⁾	float ³⁾
90	fixed	fixed	fixed	fixed	float ²⁾	float ³⁾
60	fixed	fixed	fixed	fixed	float ²⁾	float ³⁾
45	fixed	fixed	fixed	fixed	float ²⁾	float ³⁾
30	float	float	float	float ¹⁾	float ²⁾	float ³⁾
15	float	float	float	float ¹⁾	float ²⁾	float ³⁾

Tabelle 2: Lösbarkeit von GPS-Mehrdeutigkeiten in Abhängigkeit von Satellitenanzahl und Beobachtungsdauer mit der Software *GrafNav*

Beobachtungsdauer [sec]	Satellitenanzahl und (PDOP)					
	9 (2.5)	8 (2.9)	7 (3.1)	6 (4.1)	5 (6.6)	4 (9.6)
360	fixed	fixed	fixed	fixed ⁴⁾	fixed ⁴⁾	fixed ⁴⁾
120	fixed	fixed	fixed	fixed ⁴⁾	fixed ⁴⁾	fixed ⁵⁾
90	fixed	fixed	fixed	fixed ⁴⁾	fixed ⁴⁾	fixed ⁵⁾
60	fixed	fixed	fixed	fixed ⁴⁾	fixed ⁴⁾	fixed ⁵⁾
45	fixed	fixed	fixed	fixed ⁴⁾	fixed ⁴⁾	fixed ⁵⁾
30	fixed	fixed	fixed	fixed ⁴⁾	fixed ⁴⁾	fixed ⁵⁾
15	fixed	fixed	fixed	fixed ⁴⁾	fixed ⁴⁾	fixed ⁵⁾

Tabelle 3: Lösbarkeit von GPS-Mehrdeutigkeiten in Abhängigkeit von Satellitenanzahl und Beobachtungsdauer mit der Software *GPSurvey*

Anmerkungen 1) bis 5) siehe Text.

Satelliten, die über ein Mindestintervall hinweg unterbrechungsfrei gemessen worden sein müssen. Der Zeitraum ist abhängig von der Satellitengeometrie, der Satellitenanzahl und den Mehrwegeeinflüssen.

Laut Hilfedatei des Programms verfügt dieses über drei verschiedene Lösungsstrategien. Die bevorzugte Methode ist das sog. *Widelane*-Filterverfahren. Weiter stehen die *Narrowlane*- und die geometriefreie Linearkombination zur Verfügung. Nach erfolgter Mehrdeutigkeitslösung kann mit minimal vier Satelliten weiterpositioniert werden. Dabei sollte der PDOP kleiner 7 sein.

Das Programm bietet verschiedene Einstellmöglichkeiten für Parameter, die bei der kinematischen Positionierung benutzt werden. Wichtige Parameter sind

- Verhältnis von bester und zweitbesten Lösung
- Dreifachdifferenz-Schwellwert für Phasenunterbrechungen
- Größe des Coderausens
- Standardabweichung des Positionsfehlers
- Wahrscheinlichkeitsgrenzen für die χ^2 - und Fisher-Tests

Der für die Berücksichtigung einer Epoche minimal notwendige PDOP ist vom Anwender leider nicht konfigurierbar. Dieser ist für kinematische Messungen auf den Wert 25 fest eingestellt. Für den Fall, dass bei geringer Satellitenverfügbarkeit eine kurze Signalunterbrechung eines Satelliten auftritt, kann der Grenzwert leicht überschritten werden. Damit würde eine vermeidbare künstliche Unterbrechung in den Daten entstehen.

Das Programm bietet keine Möglichkeit zur Initialisierung eines kinematischen Segments auf einem koordinatenmäßig bekannten Punkt. Ebenfalls nicht vorhanden ist eine Option zur Auswahl von Zwangspunkten innerhalb eines kinematischen Segments. Jegliche Anpassungen werden erst nach erfolgter Mehrdeutigkeitslösung mittels Koordinatentransformation realisiert. Das wahre Potential vorhandener Passpunkte wird nicht ausgeschöpft.

3.1.1 Variation von Satellitenanzahl und Messdauer

Die Mehrdeutigkeitsfestsetzung erfolgte ab 90 Sekunden mit 5 Satelliten problemlos. Vergleiche mit längeren Messintervallen und den Sollkoordinaten weisen keine Veränderungen in der Bestimmung der Mehrdeutigkeiten auf. Tabelle 1 veranschaulicht dies noch einmal übersichtlich.

Leider war das Programm nicht in der Lage, Phasenlösungen für die verbleibenden Kombinationen auszugeben. Entweder war keine Lösung berechenbar oder eine berechnete Lösung wurde als "falsch" identifiziert. Auch entsprechend eingestellte Grenzwerte für Rauschen, statistische Tests usw. lieferten keine Lösungen.

Die vom Programm ausgegebenen Lösungen konnten als "korrekt" bewertet werden. Für die Berechnung kürzerer Intervalle mit fünf bzw. vier Satelliten ist die Software nicht geeignet. Es gibt keine Möglichkeit zur Ausgabe einer *float*-Lösung.

3.2 Waypoint GrafNav Vers. 6.02

Als Zweites wurde das Programm *GrafNav* der Firma *Waypoint Consulting Inc.* getestet. Die Mehrdeutigkeitslösung erfolgt hier mit einem sog. *Kinematic Ambiguity Resolution* (KAR) Algorithmus. Laut Hilfetext des Programms sind dazu mindestens 5 Satelliten erforderlich.

Das Programm ist auch für erfahrene GPS-Auswerter gedacht, denn der Umfang an Konfigurationsmöglichkeiten ist recht groß. Damit sind gezielte Eingriffe in die Mehrdeutigkeitslösung möglich. Kinematische Segmente können an beliebigen Stellen mit bekannten Positionen initialisiert werden. Die Prozessierung kann zeitlich vorwärts und rückwärts erfolgen.

3.2.1 Variation von Satellitenanzahl und Messdauer

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Tests. Dabei sind einige Besonderheiten zu beachten. Die Fixierung der Mehrdeutigkeiten auf Ganzzahlen er-

folgt unabhängig von der Satellitenanzahl erst ab Segmentlängen von 41 Sekunden. Bei fünf Satelliten konnten entgegen der Aussage des Hilfetextes nur *float*-Lösungen berechnet werden. Dieser Effekt trat auch bei langen Segmenten auf, getestet wurde bis 15 Minuten Messdauer.

Im Zusammenspiel von Mehrdeutigkeitssuche und den vom Anwender konfigurierbaren Zwangspositionen ergibt sich die Möglichkeit, doch noch zu einer *fixed*-Lösung zu gelangen. Wird bei beliebiger Segmentlänge mit vier bzw. fünf Satelliten auf bekanntem Punkt initialisiert und dabei die Option "Fixierung auf nächstgelegene Ganzzahl" angegeben, erfolgt für die weiteren Epochen eine korrekte Positionsberechnung.

Damit ist ein Mechanismus gegeben, der auch die Auswertung problematischer Datensätze ermöglicht, sofern externe Zusatzinformationen (Zwangspunkte) eingeführt werden. Es stellte sich die Frage, wie präzise die Koordinaten eines Zwangspunktes sein müssen. Zum Test wurde die Initialisierungsposition systematisch verschlechtert und untersucht, wie sich die Mehrdeutigkeitsfestsetzung verhält.

Anmerkungen zu Tabelle 2:

1) Durch Einführung einer Initialisierung auf bekanntem Punkt kann auch bei Segmentlängen unter 45 Sekunden eine Mehrdeutigkeitsfestsetzung erzwungen werden. Jedoch driftet die Lösung nicht zu wahren Position, wenn die Initialisierung nicht der tatsächlichen Sollposition entspricht. Liegen Initialisierungs- und Sollposition weiter als 1 Meter auseinander, erfolgt keine Festsetzung der Mehrdeutigkeiten.

2) Wird eine Initialisierung eingeführt, die nicht weiter als 1 Meter von der wahren Position entfernt ist, werden die Mehrdeutigkeiten festgesetzt. Dabei konvergiert die Lösung aber nicht zur wahren Position. Der Initialisierungsfehler wirkt als Offset. Aufgrund der kurzen Messdauer und der damit verbundenen geringen Geometrieänderung stellt sich der Offset als Konstante dar. Ist die Initialisierung weiter als 1 Meter von der wahren Position entfernt, gibt das Programm eine *float*-Lösung aus, die dann merklich driftet.

3) Wird ein kinematisches Segment mit nur vier

Satelliten mit bekannter Position initialisiert, erfolgt trotzdem keine Mehrdeutigkeitsfestsetzung. Jedoch ist die so erhaltene *float*-Lösung genauso präzise wie eine äquivalente *fixed*-Lösung. Die Genauigkeit der Initialisierungsposition beeinflusst direkt die Genauigkeit der kinematischen Lösung.

3.3 Trimble GPSurvey Vers. 2.35

Ein etwas älteres Softwarepaket ist *GPSurvey* der Fa. *Trimble*. Dieses erlaubt ebenfalls kinematische GPS-Auswertung, jedoch gibt es Einschränkungen bzgl. der Datenrate. Das interne Format sieht nur eine Dezimalstelle für die Messzeit vor, ermöglicht also maximal 10 Hz Abtastfrequenz. Ungünstigerweise werden beim Import aus nicht geklärten Gründen RINEX-Daten auf 2 Hz ausgedünnt. Daten im *Trimble*-Rohdatenformat mit 5 Hz hingegen (nur solche Daten lagen vor) wurden korrekt eingelesen und weiterverarbeitet.

Die Software ist zur Berechnung von Stützstellen innerhalb kinematischer Segmente geeignet, die dann in andere Programme als Passpunkte eingeführt werden können. Das Programm bietet neben umfangreichen Konfigurationsmöglichkeiten die Option, Segmente bei der OTF-Mehrdeutigkeitslösung vor- und rückwärts zu prozessieren.

3.3.1 Variation von Satellitenanzahl und Messdauer

Das Programm hat für alle Testdatensätze *fixed*-Lösungen berechnet. Jedoch müssen zwei Bemerkungen zu den Ergebnissen in Tabelle 3 angefügt werden:

4) Aus nicht identifizierbaren Gründen ist die Positionslösung bei sechs und fünf Satelliten mit einem konstanten 3D-Offset von 2 cm behaftet.

5) Bei nur vier sichtbaren Satelliten und maximaler Messdauer unter zwei Minuten wurden die Mehrdeutigkeiten falsch festgesetzt. Dies äußert sich in Positionsablagen von 1.6 m. Das Programm hat mit seinen statistischen Tests nicht erkannt, dass es sich um eine falsche Lösung handelt. Bei so wenig Redundanz in den Daten ist

dies nicht verwunderlich. Es erfordert vielmehr erhöhte Aufmerksamkeit des Auswerters.

4 Zusammenfassung

Bei zwei Messkampagnen mit Athleten des B-Nationalkaders aus dem Bereich Skisprung hat sich der Mobilempfänger im wesentlichen bewährt. Es haben sich Ansatzpunkte für Weiterentwicklungen ergeben. Um den normalen Trainingsablauf durch die Messungen nicht zu stören, ist eine Erweiterung der Speicherkapazität des Datenloggers geplant. Der Empfänger wird in einer nächsten Entwicklungsstufe komplett im Helm des Athleten untergebracht sein. Damit entfällt die Gürteltasche und die Verkabelung zwischen Empfänger und Antenne.

Nicht alle Messungen beim Skisprung laufen unter optimalen Randbedingungen bzgl. Satellitensichtbarkeit, günstiger Geometrie und Mehrwegeinfluss ab. Dies ruft verstärkte Probleme bei der Auswertung der Messungen hervor. Es kommt zu falschen oder keinen Mehrdeutigkeitsfestsetzungen. Derzeit werden erfolgversprechende hard- und softwareseitige Möglichkeiten getestet, um externe Informationen über die Kinematik eines Skisprungs in die Auswertung einfließen zu lassen.

Literatur

[BLUMENBACH und HENKE 2000]

BLUMENBACH, THOMAS und T. HENKE (2000). *Projektbericht Satellitennavigation – Anwendungen in der Sportwissenschaft*. Geodätisches Institut TU Dresden (unveröffentlicht).

[NOVATEL INC. 2001] NOVATEL INC. (2001).

OEM4 Family of Receivers – User Manual Vol. 1 and 2. Calgary, Alberta, Canada. <http://www.novatel.com>.

[PC/104 CONSORTIUM] PC/104 CONSORTIUM.

Informations about PC/104 technology. <http://www.pc104.org>.

[TRIMBLE NAVIGATION LIMITED 1999]

TRIMBLE NAVIGATION LIMITED (1999). *Hilfetexte zum Programm GPSurvey*. <http://www.trimble.com>.

[TRIMBLE NAVIGATION LIMITED 2002]

TRIMBLE NAVIGATION LIMITED (2002). *Hilfetexte zum Programm Trimble Total Control*. <http://www.pc104.org>.

[WAYPOINT INC. 2002] WAYPOINT INC.

(2002). *Hilfetexte zum Programm GrafNav/GrafNet*. <http://www.waypnt.com>.