



High-Sensitivity GPS: Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung

Andreas Wieser, Graz

Kurzfassung

Der Wunsch, einen Mobiltelefonbenutzer automatisch zu lokalisieren, wenn er eine Notrufnummer wählt, sowie die steigende Nachfrage nach ortsbezogenen Diensten hat die Entwicklung von sogenannten high-sensitivity (HS) GPS Empfängern angetrieben. Sie ermöglichen die Positionsbestimmung im Wald, in Straßenschluchten und selbst in Innenräumen. Während sich solche Empfänger bereits in Mobiltelefonen, einfachen Navigationsgeräten und anderen Massenmarkt-Artikeln finden, konnten sie sich in technischen Bereichen mit hohen Genauigkeitsanforderungen noch nicht etablieren. Woran liegt das? Haben die Anwender das Potential noch nicht erkannt? Ist die Entwicklung noch nicht weit genug vorangeschritten?

Dieser Beitrag gibt einen Einblick in die Grundlagen von HS-GPS. Es wird diskutiert, warum GPS Positionsbestimmung in abgeschatteten Bereichen überhaupt möglich ist, wie die Empfindlichkeit eines GPS Empfängers gesteigert werden kann, und welche zukünftigen Entwicklungen absehbar sind. Es zeigt sich, dass die Steigerung der Empfindlichkeit unweigerlich eine Reduktion der Genauigkeit bewirkt. Auch zukünftig wird HS-GPS in erster Linie für Anwendungen interessant sein, wo die Verfügbarkeit von Positionslösungen im Vordergrund steht, nicht die Genauigkeit.

Schlüsselwörter: GPS, Empfindlichkeit, Genauigkeit, Verfügbarkeit

Abstract

The development of high-sensitivity (HS) GPS receivers has been driven by the US mandate on location of cell phone users who place an emergency call, and by the increasing interest in location based services. HS-GPS receivers increase the availability of position solutions in environments with limited line-of-sight satellite visibility and may allow positioning even indoors. They are now commonly used within the latest cell phones, car navigation systems and other consumer products but have not entered technical areas with stringent accuracy requirements. The paper highlights the reasons. The basic concept of HS-GPS is reviewed, examples of applications are given, and the limitations are discussed. It is shown that HS-GPS is primarily useful for applications which require position availability rather than accuracy.

Keywords: GPS, sensitivity, accuracy, availability

1. Einleitung

GPS Satelliten strahlen den C/A-Code mit einer Leistung von 27 W ab. Beim Empfang auf der Erdoberfläche beträgt die Signalleistung nur noch etwa 10^{-16} W bzw. -160 dBW.¹⁾ Der enorme Verlust resultiert hauptsächlich aus der sogenannten Freiraumdämpfung, also der Abnahme der Leistungsdichte mit dem Quadrat der Entfernung. Eine ausführliche Diskussion des Leistungsbudgets und Angaben zu den anderen GPS Signalen findet man z.B. in [18] und [10, S.183ff].

Die praktische Erfahrung mit konventionellen GPS Empfängern verleitet zur Annahme, dass Gebäude und andere Objekte die Signale

blockieren („abschatten“) und dass GPS Empfänger deshalb im Schatten solcher Objekte – oder in ihrem Inneren – nicht einsetzbar sind. Tatsächlich breiten sich elektromagnetische Wellen aber nicht nur entlang der direkten Sichtverbindung aus, sondern auch indirekt durch Reflexion, Beugung und Streuung, siehe z.B. [14]. Darüber hinaus können elektromagnetische Wellen Hindernisse sogar durchdringen. Dabei werden sie jedoch je nach Materialeigenschaften, Dicke des Hindernisses, Wellenlänge und Auftreffwinkel abgeschwächt, [8]. GPS Signale existieren also auch in abgeschatteten Bereichen, wie in Innenräumen, im Inneren von Fahrzeugen, oder unter dichter Beschirmung im Wald. Sie sind dort jedoch normalerweise so schwach, dass ein

¹⁾ Leistungsverhältnisse werden häufig logarithmisch angegeben, weil damit unterschiedlichste Größenordnungen bequem gehandhabt werden können. Mit der Beziehung $R_{dB} = 10 \cdot \log(P_1/P_2)$ kann das Verhältnis von P_1 zu P_2 in Dezibel (dB) ausgedrückt werden. Leistungen selbst können ebenfalls in dB angegeben werden, wenn man sie als Verhältnis zu 1 W oder zu 1 mW auffasst. Dies wird durch die Dimensionen dBW oder dBm gekennzeichnet. -160 dBW entspricht daher 10^{-16} W bzw. 10^{-13} mW und -130 dBm.

konventioneller GPS Empfänger sie weder erfassen noch verfolgen kann.

Die Signalstärke in abgeschatteten Bereichen resultiert aus der Überlagerung reflektierter, gebeugter und transmittierter Wellen. Sie hängt von vielen nur näherungsweise bekannten Parametern ab und ist in der Regel zeitlich und räumlich stark variabel. Daher kann man die Signalstärke nicht deterministisch vorhersagen; eine Abschätzung auf Basis stochastischer Modelle ist jedoch möglich. Eine hilfreiche Einführung findet man in [14], konkrete Anwendungsbeispiele für GPS z.B. in [9] und [7].

Abb. 1 zeigt typische Größenordnungen der Dämpfung von GPS Signalen (C/A-Code) in unterschiedlicher Umgebung bzw. durch unterschiedliche Hindernisse. Die Werte stammen größtenteils aus experimentellen Untersuchungen des Autors, entsprechen aber auch den mittleren Dämpfungswerten die für verschiedenste Materialien und Umgebungen in der Literatur angeführt sind, [14], [2]. Konventionelle GPS Empfänger sind so ausgelegt, dass sie Signale bis zu einer Stärke von etwa -170 dBW nutzen können. Solche Empfänger sind in stark abgeschatteten Bereichen nicht mehr einsetzbar, wo die Dämpfung 10 dB häufig übersteigt.²⁾

Marktbedürfnisse (z.B. „Location based services“) und gesetzliche Rahmenbedingungen in den USA (E911 Mandat, [3], [4]) haben in den vergangenen Jahren die Entwicklung von GPS Empfängern angetrieben, die auch im Wald, in stark verbautem Gebiet und sogar im Inneren von Gebäuden funktionieren. Die prinzipielle Machbarkeit wurde 1997 von Peterson et al. experimentell nachgewiesen, [13]: mit einem Versuchsaufbau gelang es, GPS Pseudostrecken in einer Umgebung zu messen, wo die Signalleistung um 60 dB (d.h., um einen Faktor 10^6 !) schwächer war als bei direkter Sichtverbindung zu den GPS Satelliten. Inzwischen werden von fast allen namhaften Herstellern massenmarkttauglicher Einfrequenzempfänger auch hoch sensible GPS Empfänger, sogenannte *high-sensitivity* (HS) Empfänger, angeboten, die Signale mit einer Leistung von ≤ -180 dBW erfassen können.

In diesem Beitrag wird zunächst skizziert, wie sich die Empfindlichkeit eines GPS Empfängers steigern lässt (Abschnitt 2). Diese Steigerung kann zu einer höheren Anzahl verfügbarer Satelliten-Beobachtungen führen; die zusätzlich gewonnenen Beobachtungen sind jedoch übli-

cherweise weniger genau als die Beobachtungen zu Satelliten mit direkter Sichtverbindung. In Abschnitt 3 wird die erreichbare Genauigkeit von HS-GPS unter diesem Aspekt diskutiert. Daraus ergeben sich dann Limitierungen für gegenwärtige und absehbare Anwendungsfelder, die in Abschnitt 4 exemplarisch vorgestellt werden.

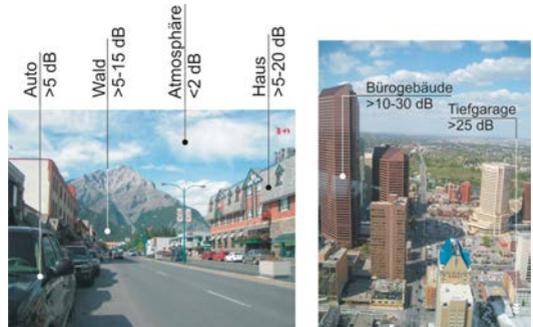


Abb. 1: Typische Dämpfung von GPS Signalen durch unterschiedliche Hindernisse im direkten Signalweg

2. Vom konventionellen zum hoch-sensitiven GPS Empfänger

2.1 Signal-Rausch-Verhältnis

Es mag zunächst naheliegend scheinen, in den Empfänger einen besseren Signalverstärker einzubauen, um auch die Signale abgeschatteter Satelliten nutzbar zu machen. Die kritische Größe ist jedoch nicht primär die Signalleistung p_s , sondern das Signal-Rausch-Verhältnis

$$\text{SNR} = 10 \cdot \log_{10} \frac{p_s}{p_N} \tag{1}$$

Dieses wird durch einen Verstärker nicht verbessert. Im Fall von GPS resultiert die Rauschleistung p_N zum überwiegenden Teil aus dem thermischen Rauschen, welches im Antennen-Empfänger-System selbst entsteht, siehe [10]. Die Energie des thermischen Rauschens ist gleichmäßig über alle Frequenzen verteilt (*weißes Rauschen*). Damit ergibt sich die Rauschleistung aus dem Produkt der sogenannten Rauschdichte n_0 (in W/Hz) und der Bandbreite b (in Hz) des Systems:

$$p_N = n_0 \cdot b \tag{2}$$

Setzt man Gl. (2) in Gl. (1) ein und drückt alle beteiligten Größen logarithmisch aus, dann kann man das Signal-Rausch-Verhältnis auch wie folgt schreiben:

2) -170 dBW = -160 dBW -10 dB; aufgrund der logarithmischen Skala sind Dämpfungen, ausgedrückt in dB, additiv.

$$\text{SNR} = P_S - N_0 - B = C/N_0 - B, \quad (3)$$

worin P_S , N_0 und B die Signalstärke (in dBW), die Rauschdichte (in dBW/Hz) und die Bandbreite (in dBHz) sind, und die ersten beiden Terme zum Signal-Rauschdichte-Verhältnis C/N_0 (*carrier-to-noise-density ratio*) zusammengefasst werden. Der C/N_0 -Wert kann im Empfänger praktisch nicht beeinflusst werden³⁾ und ist ein direktes Maß für die Signalstärke, weil der Anteil N_0 durch Antenne und Vorverstärker weitgehend vorgegeben ist. Für eine typische Antennen-Empfänger-Kombination beträgt die Rauschdichte ca. -201 dBW/Hz und das C/N_0 eines ungestörten C/A-Code Signals damit ca. 41 dBHz, [10], [22].

2.2 Signalerfassung und -verfolgung

Die Bandbreite B – und damit das Signal-Rausch-Verhältnis SNR – hängt von der Abtastrate und den eingesetzten Filtern ab. Die Bandbreite ist an verschiedenen Punkten im Antennen-Empfänger-System unterschiedlich groß. Aufgrund der C/A-Code Chiprate von 1.023 MHz muss die Digitalisierung des empfangenen GPS Signals mit mehr als 2.046 MHz erfolgen, und die Bandbreite der vorgeschalteten Filter zur Rauschunterdrückung muss diesen Wert ebenfalls übersteigen, daher gilt zunächst

$$b > 2.046 \times 10^6 \text{ Hz} \Rightarrow B > 63 \text{ dBHz}, \quad (4)$$

weil die Bandbreite der Abtastrate gleichgesetzt werden kann. Für ein typisches, nicht zusätzlich abgeschwächtes GPS Signal mit $C/N_0 = 41$ dBHz folgt:

$$\text{SNR} < 41 - 63 \text{ dB} = -22 \text{ dB}. \quad (5)$$

Das Rauschen (Varianz) ist nach der Digitalisierung also um einen Faktor 100 stärker als das Signal. Zur Messung kann das Signal jedoch nur genutzt werden, wenn $\text{SNR} > 0$. Um das zu erreichen muss nach Gl. (3) die Bandbreite verringert werden. Rein rechnerisch scheint das durch die Wahl einer geringeren Abtastrate erreichbar. Praktisch führt das nicht zum Ziel, weil das Signal dann gemäß dem Abtasttheorem nicht mehr (eindeutig) aus den digitalisierten Werten rekonstruierbar ist, [11].

Die Lösung besteht in der Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion aus empfangenem Signal $x(t)$ (inklusive Rauschen) und im Empfänger erzeugter Signalkopie $y(t)$ (*replica code*). Der Wert der Kreuzkorrelationsfunktion wird aus n

aufeinanderfolgenden abgetasteten Werten x_i und y_i wie folgt geschätzt:

$$\hat{R}_{xy}^{[n]}(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_{i+k}, \quad (6)$$

mit

$$\begin{aligned} x_i &= x(t_i), y_i = y(t_i), \tau = k \cdot \Delta t_s, \\ \Delta t_s &= t_{i+1} - t_i = \text{const.}, k \in \mathbb{Z}. \end{aligned} \quad (7)$$

Die Pseudostrecke ergibt sich dann aus der Lichtgeschwindigkeit und jenem Zeitversatz τ , für den die Kreuzkorrelationsfunktion maximal wird. Der interessierte Leser wird für eine umfassende Darstellung von Signalerfassung, Signalverfolgung und Bestimmung der Pseudostrecken auf [18] und [16] verwiesen; eine Zusammenfassung des Prozesses in deutscher Sprache wurde z.B. in [22] gegeben.

Die Schätzung der Kreuzkorrelation nach Gl. (6) wird in der GPS Literatur als „Integration“ bezeichnet und entspricht im Prinzip einer Mittelung über n Messwerte. Das Rauschen (Varianz) geht bei einer solchen Mittelung um den Faktor $1/n$ zurück, während die Signalleistung unverändert bleibt. Damit bewirkt die Integration über $T_{int} = n \times \Delta t_s$ Sekunden also eine Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses um $10 \cdot \log_{10} n$ dB (und entspricht einer Reduktion der Bandbreite um $10 \cdot \log_{10} n$ dB). Je länger integriert wird, umso größer wird das SNR. Konkret lässt sich aus Gl. (3) das SNR nach der Integration wie folgt berechnen:

$$\text{SNR} = C/N_0 - B_s + 10 \cdot \log_{10} n, \quad (8)$$

wobei die Bandbreite des abgetasteten Signals mit B_s bezeichnet wurde. Aus Gründen der Einfachheit sind Implementierungsverluste in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Im realen GPS Empfänger treten bei der praktischen Umsetzung des Prinzips aus Gl. (6) noch Verluste von einigen dB auf, die von Details der Implementierung abhängen und in Gl. (8) bzw. (10) als konstanter, additiver Term berücksichtigt werden könnten.

Aus Gl. (8) erhält man wegen

$$\begin{aligned} n &= \frac{T_{int}}{\Delta t_s} = f_s \cdot T_{int} \Rightarrow \\ &\Rightarrow 10 \cdot \log_{10} n = B_s + 10 \cdot \log_{10} T_{int}, \end{aligned} \quad (9)$$

die einfachere Beziehung

$$\text{SNR} = C/N_0 + 10 \cdot \log_{10} T_{int}, \quad (10)$$

das SNR hängt also nur vom C/N_0 und der Integrationsdauer ab.

³⁾ Die Bestimmung dieses Wertes erfolgt im Empfänger durch Schätzverfahren und auf Basis von Annahmen. Unterschiedliche Empfänger können daher selbst bei Verwendung identischer Antennen und Signale verschiedene C/N_0 -Werte anzeigen.

Die zuverlässige Bestimmung der Pseudostrecken erfordert, dass das Signal deutlich stärker als das Rauschen ist; als Richtwert dafür kann $\text{SNR} > 10$ dB angenommen werden, was einem Verhältnis 10:1 von Signalleistung zu Varianz – und damit etwa einem Verhältnis 3:1 von Signalamplitude zu Standardabweichung – entspricht. Mit Hilfe von Gl. (10) kann man die minimale Integrationsdauer als Funktion der Signalstärke abschätzen. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 2 veranschaulicht.

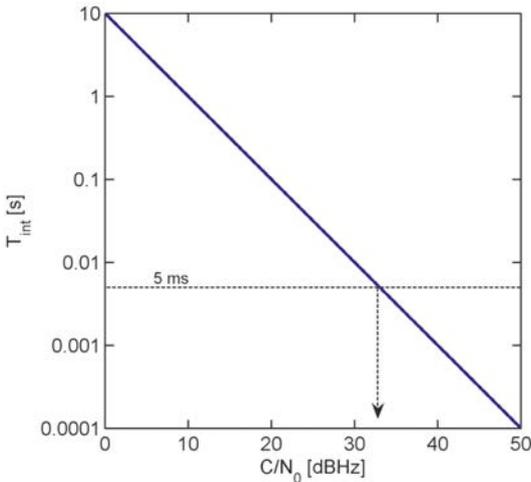


Abb. 2: Nach Gl. (10) abgeschätzte minimal erforderliche Integrationsdauer für $\text{SNR} \geq 10$ dB

Für die oben erwähnte typische Signalstärke von 41 dBHz ist demnach eine Integration über etwa 1 ms erforderlich. Die Abbildung suggeriert, dass sich die Sensitivität des Empfängers durch längere Integration nahezu beliebig steigern lässt. In Innenräumen können GPS Signale um mehr als 30 dB gedämpft sein; nach Abb. 2 scheinen selbst solche Signale noch erfassbar, wenn die Integrationszeit 1 s oder mehr beträgt.

Allerdings kann man die Zeitdauer der sogenannten *kohärenten Integration*, mit der der Wert der Kreuzkorrelation gemäß Gl. (6) geschätzt wird, nicht beliebig ausdehnen. Die Ursache liegt in der unbekannt *exakten* Trägerfrequenz des empfangenen Codes (aufgrund der Relativbewegung zwischen Empfänger und Satellit kommt es zu einer zeitlich veränderlichen Dopplerverschiebung von bis zu ± 4.5 kHz) und in den Navigationsdaten, die dem C/A-Code mit einer Bit-Rate von 50 Hz aufmoduliert sind. Beide Effekte bewirken letztlich einen Vorzeichen-

wechsel im digitalisierten Signal $x(t)$, der im replizierten Code $y(t)$ nicht enthalten ist. Bei der Integration über einen solchen Vorzeichenwechsel hinweg kommt es mit zunehmender Integrationsdauer zu einer Auslöschung des Signalanteils und damit zu einer Reduktion anstatt zu einer Steigerung des SNR. Um diesen Effekt zu vermeiden, beträgt die Integrationsdauer bei einem konventionellen GPS Empfänger typischerweise nicht mehr als 5 ms, und Signale mit einem C/N_0 unter 33 dBHz können gemäß Abb. 2 nicht mehr erfasst werden. Für Details wird auf [18], [10] und [22] verwiesen.

2.3 Sensitivitätssteigerung

Trotz der oben angeführten Schwierigkeiten liegt der Schlüssel zu HS-GPS in einer Verlängerung der Integrationszeit. Dies wird insbesondere durch eine sogenannte *nicht-kohärente Integration* ermöglicht, bei der die Ergebnisse mehrerer aufeinanderfolgender kohärenter Integrationen zunächst quadriert und dann aufsummiert werden. Dadurch kann der Einfluss von Vorzeichenwechseln im modulierten Signal reduziert und die Integration über die Grenzen der Datenbits hinweg durchgeführt werden. Der Preis dafür ist ein einmaliger *Quadrierverlust* (Verringerung des SNR), der umso stärker ausfällt, je geringer das Signal-Rausch-Verhältnis vor dem Quadrieren ist.

Der Zusammenhang zwischen C/N_0 und erforderlicher Integrationszeit aus Abb. 2 gilt nur für starke Signale (die allein mit kohärenter Integration erfasst werden können). Abb. 3 zeigt den Zusammenhang unter Berücksichtigung des Quadrierverlustes und gilt auch für schwache Signale. Die erforderliche Integrationszeit hängt nicht nur vom C/N_0 sondern auch von der Dauer T_{coh} der kohärenten Integration ab, die ja das SNR vor dem Quadrieren mitbestimmt. Die Treppenform der Kurven in Abb. 3 entsteht, weil die gesamte Integrationszeit T_{int} nur ein ganzzahliges Vielfaches von T_{coh} sein kann. Wie zuvor, sind auch hier Implementierungsverluste (von typischerweise 2–10 dB) nicht berücksichtigt.

Leider ist die Integrationszeit auch mit nicht-kohärenter Integration auf etwa 1 s beschränkt. Die Hauptgründe dafür liegen in der Instabilität des Empfängeroszillators und in der Bewegung von Empfänger bzw. Antenne relativ zur Erdoberfläche. Dadurch ändert sich die Frequenz des empfangenen Signals während der Integration in nicht präzisierbarer Weise, was den SNR-Gewinn mit zunehmender Integrationsdauer wieder auslöscht, [1]. Daher ist für die Erfassung von

Signalen in stark abgeschatteten Bereichen oder in Innenräumen ($C/N_0 < 20$ dBHz) auch eine Ausdehnung der kohärenten Integration über die oben angeführten 5 ms hinaus nötig, siehe Abb. 3. Tatsächlich gelingt das, wenn dem Empfänger Information über die Datenbits der Navigationsnachricht sowie den Frequenzfehler des Empfänger-oszillators zur Verfügung gestellt wird (*aiding*). Das kann mit Hilfe entsprechender Dienste über eine Telekommunikationsverbindung (z.B. GSM) erfolgen – man spricht dann von *assisted GPS* (A-GPS), siehe z.B. [23] –, oder über kürzere Zeiträume auch durch Prädiktionsalgorithmen im Empfänger selbst (z.B. beim Übergang von abschattungsfreier Umgebung in abgeschattete Bereiche, oder bei einem Warmstart).

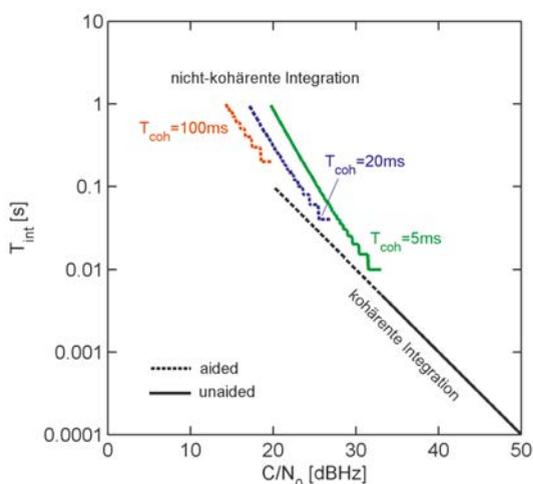


Abb. 3: Theoretisch erforderliche Integrationsdauer für $SNR \geq 10$ dB unter Verwendung nicht-kohärenter Integration (Quadraturverlust berücksichtigt, Implementierungsverluste vernachlässigt)

Schließlich ergeben sich bei der technischen Umsetzung noch beträchtliche Probleme durch den Rechenaufwand, insbesondere während der Signal-Akquisition. Da sich der Trägerfrequenzunterschied δf_D zwischen empfangenem und repliziertem Signal auf den geschätzten Wert der Kreuzkorrelation auswirkt, muss der Empfänger nämlich die Integration für hinreichend viele Werte von τ und δf_D durchführen, um das Maximum der Kreuzkorrelation zu finden. Damit die Signalakquisitionszeit trotzdem im Bereich weniger Sekunden (oder darunter) bleiben kann, ist massive Parallelrechnung oder der Einsatz von Fourier-Transformations-Algorithmen erforderlich. Für

weitere technische Details und Referenzen wird auf [19], [17], [2] und [22] verwiesen.

Kommerziell erhältliche HS-GPS Empfänger können Pseudostrecken bis zu einem C/N_0 von ca. 12 dBHz noch verfolgen und sind damit um ca. 20 dB sensitiver als konventionelle Empfänger. Allerdings können derzeitige HS-GPS Empfänger bei Signalstärken unter ca. 27 dBHz keinen Kaltstart (keine Vorinformation über Uhrfehler, Position und Satellitenverteilung) mehr durchführen, weil die Navigationsdaten bei so schwachen Signalen nicht demoduliert und die Pseudostrecken nicht vollständig bestimmt werden können. Für einen längeren Betrieb in stark abgeschatteten Bereichen benötigen HS-GPS Empfänger daher externe Zusatzinformationen (A-GPS).

Eine Verbesserung der Kaltstart-Fähigkeit ist durch neue Acquisitions- und Demodulations-Algorithmen auf Basis erweiterter Kalman Filter und sogenannter Viterbi-Algorithmen absehbar, siehe [24]. Eine Verbesserung der Tracking-Fähigkeit zeichnet sich nicht ab, obwohl sie durch tiefe Integration von Inertialsensoren sowie die Verwendung besserer Oszillatoren theoretisch möglich wäre. Die Ursache liegt in den damit verbundenen Kosten, die für die Ziel-Märkte von HS-GPS (s. Abschnitt 4) noch zu hoch sind. Für Spezialanwendungen könnte der in [12] vorgestellte Ansatz nützlich sein, bei dem die Signalintegration und Ableitung der Messgrößen erst im Post-Processing erfolgt; allerdings fallen dabei gewaltige Datenmengen an, die zunächst gespeichert werden müssen (4 MB/s, wenn die Abtastfrequenz 16 MHz beträgt und mit einer Auflösung von 2 Bit digitalisiert wird).

Applikationen, welche die Trägerphasenmessungen benötigen, können von HS-GPS kaum profitieren. Selbst wenn es durch neue Algorithmen (wie in [24]) in Zukunft gelingen sollte, Trägerphasenmessungen auch unter 27 dBHz durchzuführen, werden diese Messungen mit häufigen Cycle-Slips kontaminiert sein und wegen des Signalempfangs über Beugung und Reflexion (statt entlang der direkten Sichtverbindung) große systematische Fehler aufweisen.

3. Erreichbare Genauigkeit

3.1 Präzision der Messungen

Die Präzision der rohen Messwerte (Pseudostrecke, Trägerphase, Dopplerfrequenz) im Empfänger hängt insbesondere vom Signal-Rauschverhältnis ab. Die ausführliche Darstellung in [18] zeigt, dass mit abnehmendem C/N_0 die Standard-

abweichung der Tracking-Loop-Ausgabe steigt. Man muss daher erwarten, dass die schwachen Signale, die ein HS-GPS Empfänger erfasst, weniger präzise Messwerte liefern, als jene Signale, die auch ein konventioneller GPS Empfänger nutzt.

3.2 Externe Effekte

Bei terrestrischen GPS Anwendungen geht die Signalabschwächung in der Regel nicht nur mit geringerer Präzision einher, sondern auch mit starken systematischen Abweichungen und damit geringerer Genauigkeit. Dies wird in Abb. 4 an einem Beispiel veranschaulicht. Die zugrundeliegenden Messdaten wurden mit einem u-blox TIM-LH GPS Empfänger im Februar 2006 am Dach eines TU Gebäudes in Graz aufgezeichnet. Die GPS low-cost Antenne befand sich am Boden („Station A“), in unmittelbarer Nähe der Wand eines Dachaufbaus, siehe Abb. 5.

In der stereographischen Darstellung (Abb. 4a) sind für jede volle Sekunde zwischen 10:00 und 14:00 Azimut und Elevation der Satelliten dargestellt, von denen der Empfänger eine Pseudostreckenmessung ausgeben konnte. Die Farbcodierung der Punkte zeigt die Signalstärke. Die graue Fläche kennzeichnet den durch Aufbauten abgeschatteten Bereich. Wie erwartet, sind die erfassten Signale in diesen Bereichen deutlich schwächer als im abschattungsfreien Sektor. Das sogenannte Gain-Pattern der Antenne verursacht auch im abschattungsfreien Bereich eine Abnahme des C/N_0 Wertes mit abnehmender Elevation.

Die Koordinaten der Antennenposition waren durch lokale Einmessung mittels Totalstation von Messpfeilern am selben Dach mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern bestimmt worden. Diese Koordinaten konnten nun für eine Analyse der Pseudostreckenmessungen als wahre Koordinaten betrachtet und in einer Ausgleichung festgehalten werden, mit deren Hilfe der Empfängerfehler geschätzt wurde. Die Residuen dieser Auswertung entsprechen (bis auf das Vorzeichen) weitgehend den Abweichungen der Pseudostreckenmessungen von ihren wahren Werten, siehe Abb. 4b. Diese Abweichungen beinhalten neben dem Rauschen aus der Tracking-Loop auch externe Effekte wie nicht-modellierte Anteile der troposphärischen und ionosphärischen Laufzeitverzögerung, oder Mehrwege- und Beugungseffekte.

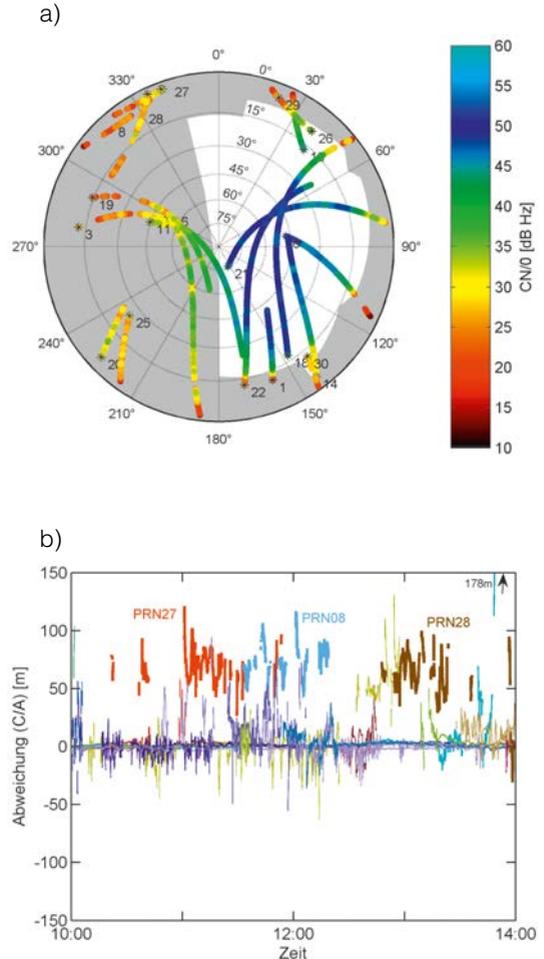


Abb. 4: (a) Satellitenverteilung und C/N_0 auf Station A, (b) Abweichung der gemessenen Pseudostrecken von den Referenzwerten (siehe Text; ublox TIM-LH Empfänger, C/A Code)



Abb. 5: Station A mit Umgebung

Mit HS-GPS Empfängern können Signale von Satelliten genutzt werden, die vom Empfänger aus gar nicht mehr direkt sichtbar sind, wie hier etwa von PRN 8, 27 und 28. Solche Signale gelangen in der Regel ausschließlich über indirekte Wege zum Empfänger und die entsprechenden Messungen sind daher systematisch zu lang (positiver Bias). Dieser Bias bewirkt unweigerlich einen entsprechenden systematischen Fehler der geschätzten Empfängerposition. Er lässt sich weder durch längere Beobachtungszeit auf einer Station noch durch mehrweg-resistentere Tracking-Loops reduzieren. Abhilfe könnte nur durch Qualitätskontrolle (Ausreißerdetektion) und Modellanpassung im Rahmen der Datenauswertung erfolgen, was aber ausreichende Redundanz oder Integration zusätzlicher Sensoren voraussetzt und letztlich zu einer Eliminierung der mittels HS-GPS (mühsam) gewonnenen zusätzlichen Beobachtungen führen würde.

Folglich kann HS-GPS zwar helfen, Position, Geschwindigkeit und Zeit an Orten zu bestimmen, wo das mittels konventioneller Empfänger aufgrund der Abschattungsbedingungen nicht möglich ist (z.B. in Innenräumen), die dabei erzielbare Genauigkeit ist jedoch wesentlich geringer als mit konventionellem GPS in abschattungsarmer Umgebung. Dies wurde in [20] ausführlich diskutiert.

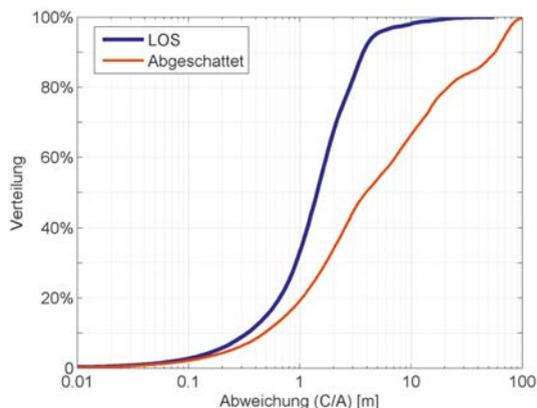


Abb. 6: Empirische Verteilung der Pseudostreckenabweichungen aus Abb. 4b

Die erzielbare Genauigkeit der Positionierung mittels HS-GPS lässt sich nicht pauschal angeben. Eine Größenordnung kann jedoch mit Hilfe der Abb. 6 abgeschätzt werden. Diese Abbildung zeigt die Verteilung der Pseudostreckenabweichungen aus dem obigen Beispiel, getrennt für die direkt sichtbaren Satelliten (LOS) und die

abgeschatteten Satelliten. Während nur 5% der LOS Beobachtungen Abweichungen von mehr als 4 m haben, weisen 50% der abgeschatteten Beobachtungen größere Fehler auf; 5% der abgeschatteten Beobachtungen haben sogar Abweichungen von mehr als 70 m. In anderen Datensätzen wurden teilweise noch größere Abweichungen festgestellt (>1 km), die durch sogenannte Kreuzkorrelationseffekte auftreten können wenn das direkte Signal nicht stark genug ist. Nicht selten weisen Positionslösungen, die unter Verwendung stark abgeschwächerter Signale gewonnen werden, systematische Abweichungen mit Größenordnungen von 10–100 m, oder mehr, auf.

3.3 Varianzmodell

Wegen der stark unterschiedlichen Genauigkeit der Beobachtungen kommt der Modellierung der Varianzen bei HS-GPS besondere Bedeutung zu, siehe [21]. Ohne realistische Varianzmodellierung können Ausreißer (wie z.B. km-Abweichungen) nicht zuverlässig detektiert werden. Weiters sind in diesem Fall die geschätzten Parameter suboptimal und ihre berechneten Standardabweichungen falsch.

Das in anderem Zusammenhang eingeführte SIGMA- ε Varianzmodell [6] eignet sich besonders gut für die Auswertung von HS-GPS Daten, [21]. Mit diesem Modell können die Varianzen der undifferenzierten Beobachtung aus den vom Empfänger gemessenen und ausgegebenen C/N_0 -Werten sowie einem empirisch bestimmbar Koeffizienten C berechnet werden:

$$\sigma_i^2 = C \cdot 10^{-\frac{C/N_{0,i}}{10}}. \quad (11)$$

Für die weitere Auswertung darf dann angenommen werden, dass die Beobachtungsabweichungen unkorreliert und normalverteilt sind, mit Erwartungswert 0 und (jeweils unterschiedlicher) Varianz σ_i^2 . Wie in [21] gezeigt wurde, repräsentiert dieses Modell in abschattungsarmer Umgebung typischerweise mehr als 99% der Beobachtungen, und selbst in stark abgeschatteten Bereichen wie z.B. in engen Straßenschluchten noch 80–90%. Die restlichen Beobachtungen müssen im Rahmen der Qualitätskontrolle als Ausreißer erkannt und eliminiert oder ausreichend abgewichtet werden.

3.4 Experimentelles Beispiel

Abb. 7 zeigt exemplarische Resultate aus dem angeführten Experiment. Ein konventioneller GPS Empfänger (Ashtech G12) und ein HS-GPS Empfänger (u-blox TIM-LH) waren mittels Sig-

nalsplitter zugleich an dieselbe Antenne in Station A (s. Abb. 5) angeschlossen. Die Zeitreihen zeigen die Abweichungen der geschätzten Ostkoordinaten vom bekannten Wert für unterschiedliche Berechnungsvarianten. Epochen, zu denen die interne Qualitätskontrolle nicht möglich (weniger als 5 Beobachtungen) oder nicht erfolgreich war (Modelltest negativ, Ausreißer nicht identifizierbar oder nach Modelladaption zu wenige Beobachtungen übrig), sind nicht dargestellt. Nord- und Höhenkomponenten liefern ein ähnliches Bild, werden hier aber nicht präsentiert.

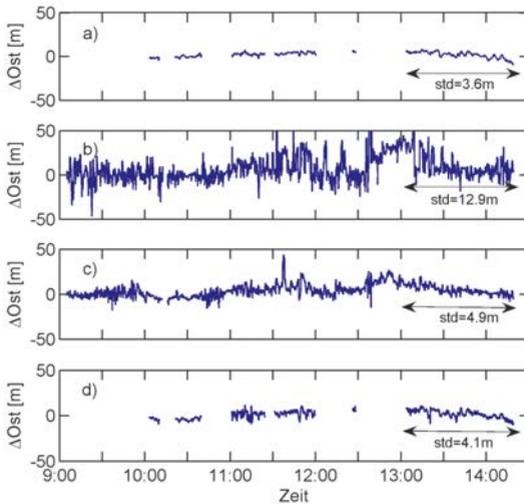


Abb. 7: Zeitreihen der geschätzten Koordinaten (Ostkomponente, C/A-Code) für Epochen mit ≥ 5 Beobachtungen und erfolgreichem globalen Modelltest: (a) konventioneller Empfänger (Beobachtungen gleich gewichtet), (b) HS-GPS Empfänger (Beobachtungen gleich gewichtet), (c) HS-GPS Empfänger mit SIGMA- ϵ Varianzmodell, (d) HS-GPS Empfänger mit SIGMA- ϵ Varianzmodell, nur ausgewählte Beobachtungen verwendet (siehe Text); ausgewiesene Standardabweichung bezieht sich nur auf markierten Bereich (ab 13:00)

Die Pseudostreckenmessungen des konventionellen Empfängers liefern Koordinaten mit hoher Präzision und Genauigkeit (Abb. 7a, RMS über gesamte Zeitreihe: 3.7 m, maximale Abweichung 9 m). Aufgrund der starken Abschattungen liefert dieser Empfänger in der vorliegenden Umgebung jedoch zu wenige Beobachtungen, und eine kontrollierte Lösung steht während 50% der Zeit nicht zur Verfügung.

Der HS-GPS Empfänger liefert fast über die gesamte Zeitdauer (98.5%) eine kontrollierte Lösung, allerdings mit erheblich reduzierter

Präzision und Genauigkeit, wenn in der Auswertung gleiche Varianz aller Beobachtungen angenommen wird (Abb. 7b); der RMS Wert beträgt dann 15 m, 10% der Abweichungen sind größer als 28 m. Die Verwendung des SIGMA- ϵ Varianzmodells in der Auswertung verbessert Präzision und Genauigkeit der Lösung signifikant: der RMS Wert beträgt 7.8 m, 90% der Abweichungen sind kleiner als 13 m (Abb. 7c).

Prinzipiell sollten *zusätzliche* Beobachtungen das Ergebnis nicht verschlechtern, wenn die Beobachtungen untereinander richtig gewichtet sind und die Qualitätskontrolle im Rahmen der Auswertung funktioniert. Abb. 7a–c scheint jedoch eine solche Verschlechterung durch zusätzliche Beobachtungen anzuzeigen, wie z.B. die ausgewiesenen Standardabweichungen für den letzten Abschnitt zeigen, während dessen schon der konventionelle Empfänger ausreichend viele Beobachtungen zur Verfügung stellt. Man muss jedoch zusätzlich in Betracht ziehen, dass der konventionelle Empfänger (Abb. 7a) und der HS-GPS Empfänger (Abb. 7b–c) sich nicht nur in der HS Funktionalität und damit der Anzahl der ausgegebenen Beobachtungen unterscheiden, sondern dass es sich um gänzlich unterschiedliche Empfänger handelt. Damit weisen auch die Beobachtungen der von *beiden* Empfängern erfassten Satelliten unterschiedliche Präzision und möglicherweise unterschiedliche Verzerrung durch Mehrwegeeffekte auf. Zur Vervollständigung des Bildes wurde in Abb. 7d noch das Ergebnis einer Berechnungsvariante dargestellt, bei der nur die Beobachtungen des HS-GPS Empfängers Verwendung fanden, welche auch beim konventionellen Empfänger verfügbar sind. Diese Selektion von Beobachtungen simuliert ein Wegfallen der HS Funktionalität beim u-blox Empfänger. Im vorliegenden Fall weisen die Messwerte des u-blox HS-GPS Empfängers eine geringere Präzision auf als jene des G12 Empfängers, weshalb auch die Präzision der Koordinatenlösungen geringer ist (vgl. Abb. 7a und d).

4. Anwendungsmöglichkeiten

HS-GPS Empfänger wurden aufgrund massiver Nachfrage aus Anwendungsbereichen mit geringen Genauigkeitsanforderungen entwickelt, insbesondere für die möglichst ubiquitäre Ortung von Mobiltelefonbenutzern, die eine Notrufnummer wählen. Für solche Applikationen können Positionierungsfehler von mehr als 100 m tolerierbar sein, das Hauptaugenmerk liegt auf der Verfügbarkeit von Positionslösungen auch in stark

abgeschatteten Bereichen und in Innenräumen, sowie auf minimalen Kosten.

Wie oben gezeigt wurde, ist die Steigerung der Verfügbarkeit von Positionslösungen technisch realisierbar. Sie geht jedoch nicht mit einer Steigerung der Genauigkeit einher. Vielmehr sind jene Beobachtungen, die erst durch die HS Funktionalität eines Empfängers verfügbar werden, stärker verrauscht und häufig durch Ausbreitungseffekte stark verzerrt. Positionslösungen, die hauptsächlich auf schwachen Signalen beruhen, können daher um 1–2 Größenordnungen ungenauer sein als typische GPS Positionslösungen in abschattungsarmer Umgebung. Ebenso helfen *einzelne* zusätzliche Beobachtungen eines HS-GPS Empfängers in der Regel nicht, die Genauigkeit einer bereits ohne diese Beobachtungen möglichen Positionslösung zu verbessern, weil sie bei falscher Gewichtung die Lösung verzerren und bei richtiger Gewichtung kaum etwas zur Lösung beitragen.

Neben der Aufgabe, Mobiltelefonbenutzer zu lokalisieren (siehe [3],[4]), profitieren daher wohl ortsbezogene Dienste (*location based services*) am meisten von HS-GPS, wo die Information z.B. über naheliegende Sehenswürdigkeiten, Fahrpläne öffentlicher Verkehrsmittel oder lokales Verkehrsaufkommen selbst dann relevant sind, wenn die geschätzte Position um mehr als 100 m von der wahren Position abweicht.

Auch Navigationssysteme für Landfahrzeuge werden zunehmend mit HS-GPS Empfängern ausgerüstet. In Streckenabschnitten mit häufig wechselnder Abschattungssituation, z.B. in bewaldeter Umgebung, oder auf Strecken mit zahlreichen Tunnels und Überführungen können solche Empfänger wesentlich zu einer Stabilisierung der Positionslösungen beitragen, weil sie die GPS Signale nicht so häufig verlieren und unmittelbar nach dem Verlassen der jeweiligen Abschattung wieder genaue Messwerte liefern können, während konventionelle Empfänger nach dem Austritt aus dem Signalschatten unter Umständen mehrere Sekunden benötigen, um die Signale wieder zu akquirieren. In Kombination mit gespeicherten Karten und möglicherweise mit zusätzlichen Sensoren, können HS-GPS Empfänger das Navigationssystem auch besser gegen häufige Ausfälle in stark verbauten städtischen Bereichen rüsten.

In der Literatur finden sich zahlreiche weitere Applikationen auf Basis von Pseudostreckenbeobachtungen, wo HS-GPS erfolgreich eingesetzt wird oder werden könnte. Beispiele reichen von

der näherungsweise Ortung von Lawinenopfern (zum Eingrenzen des Suchbereichs), [15], bis zur Verfolgung der Beute von Bankräubern, [5].

Für geodätische Anwendungen und insbesondere für Anwendungen, die die Auswertung der Trägerphasen erfordern, sind HS-GPS Empfänger aus den bereits diskutierten Gründen kaum geeignet. Eine Ausnahme stellt das Verfahren der GPS Okkultation dar, bei dem GPS Empfänger in „tief-fliegenden“ Satelliten verwendet werden, um Signale zu erfassen, die die Erdatmosphäre durchdringen und damit Information über die Atmosphäre liefern. Aufgrund der großen Distanz zwischen GPS Satellit und Empfänger können die Signale bei dieser Anwendung stark gedämpft sein, ohne jedoch durch indirekte Signalwege verzerrt zu sein. Hier kann HS-GPS helfen, präzise Trägerphasenmessungen besonders schwacher Signale zu erhalten. Eine nützliche technische Anwendung von HS-GPS Empfängern stellt schließlich noch ihre Verwendung zur Zeitsynchronisierung dar, z.B. in Sensornetzwerken, weil eine Genauigkeit von einigen Microsekunden selbst bei Beeinträchtigung durch indirekte Signalwege erreichbar ist.

Danksagung

Dieser Beitrag beruht auf einem Vortrag, den der Autor im Rahmen der Verleihung des „Karl-Rinner-Preises“ der Österreichischen Geodätischen Kommission im November 2006 gehalten hat. Besonderer Dank gilt Herrn DI Michael Schmid, dem Sponsor des Preises, und der Österreichischen Geodätischen Kommission. Weiters wird dankend erwähnt, dass Dr. Horst Hartinger und Dr. Raoul Schild HS-GPS Empfänger für die Testmessungen zur Verfügung gestellt und die in diesem Beitrag angeführten Untersuchungen teilweise ermöglicht haben.

Literaturverzeichnis

- [1] Chansarkar, M.M., Garin, L. (2000): Acquisition of GPS Signals at Very Low Signal to Noise Ratio. In: Proc. ION NTM 2000, Anaheim, California, 26.–28. Jänner, 731–737
- [2] Eisfeller, B., Teuber, A., Zucker, P. (2005): Untersuchung zum GPS-Satellitenempfang in Gebäuden. AVN 4/2005: 137–145
- [3] FCC (1996) Report and order and further notice of proposed rulemaking (FCC 96-264), http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-96-264A1.pdf
- [4] FCC (2004) 911 Seivices. <http://www.fcc.gov/911>, Federal Communications Commission, 24.11.2004
- [5] Fuller, R., Grimm, P. (2006): Tracking System for Locating Stolen Currency. In: Proc. ION GNSS 2006, Fort Worth, Texas, 26.–29. September, 3094–3104
- [6] Hartinger, H., Brunner, F.K. (1999): Variances of GPS Phase Observations: The SIGMA- ϵ Model. GPS Solutions 2/4: 35–43

- [7] *Hu, T., Lachapelle, G., Klukas, R. (2007):* Controlled GPS Signal Simulation for Indoors. *Journal of Navigation*, 60: 265–280
- [8] *Jackson, J.D. (1998):* Classical Electrodynamics. 3. Aufl., John Wiley & Sons, New York
- [9] *Klukas, R., Lachapelle, G., Ma, C., Jee, G.-I. (2003):* GPS signal fading model for urban centres. In: *IEEE Proc.-Microw. Antennas Propag.*, Vol. 150, No. 4, August, 245–252
- [10] *Misra, P., Enge, P. (2001):* Global Positioning System – Signals, Measurement, and Performance. Ganga-Jamuna Press, Lincoln, Massachusetts
- [11] *Oppenheim, A.V., Willsky, A.S. (1997):* Signals and Systems. 2. Aufl., Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 957p
- [12] *Pany, Th. (2006):* Nutzen des Post-Processings von aufgezeichneten GPS-Zwischenfrequenzsignalen zur Positionierung bei Abschattungen und im Indoor-Bereich. *Vermessung 205*
- [13] *Peterson B., Bruckner D., Heye S. (1997):* Measuring GPS Signals Indoors. In: *Proc. ION GPS 1997*, Kansas City, Kansas, 16.–19. September, 615–624
- [14] *Rappaport, T.S. (2002):* Wireless Communications: Principles and Practice. 2. Aufl., Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey
- [15] *Schlepppe, J.B., Lachapelle, G. (2006):* GPS Tracking Performance under Avalanche Deposited Snow. In: *Proc. ION GNSS 2006*, Fort Worth, Texas, 26.–29. September, 3105–3116
- [16] *Van Dierendonck, A.J. (1996):* GPS Receivers. In: *Parkinson, B.W., Spilker, J.J. (eds) Global Positioning System: Theory and Applications*, vol 1, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, DC, 329–407
- [17] *van Diggelen, F. (2002):* Indoor GPS theory & implementation. In: *Proc. IEEE Position, Location, and Navigation Symposium*, Palm Springs, California, 15.–18. April, 240–247
- [18] *Ward, P.W., Betz, J.W., Hegarty, C.J. (2006):* Satellite Signal Acquisition, Tracking, and Data Demodulation. In: *Kaplan, E.D., Hegarty, C.J. (Hrsg.) Understanding GPS: Principles and Applications*. 2nd ed, Artech House, Boston-London, 153–241
- [19] *Watson, J.R.A. (2005):* High-Sensitivity GPS L1 Signal Analysis for Indoor Channel Modelling. MSc thesis, University of Calgary, UCGE Report 20215, <http://www.geomatics.ucalgary.ca/links/GradTheses.html>
- [20] *Wieser, A. (2006):* High-Sensitivity GNSS: The trade-off between availability and accuracy. In: *Proc. 3rd IAG Symposium on Geotechnical and Structural Engineering*, Baden, Österreich, 22.–24. Mai, 12p
- [21] *Wieser, A., Hartinger, H., Gaggli, M. (2005):* Improved positioning accuracy with high-sensitivity GNSS receivers and SNR aided integrity monitoring of pseudo-range observations. In: *Proc. ION GNSS 2005*, Long Beach, California, 13.–16. September, 1545–1554
- [22] *Wieser, A., Hartinger, H. (2006):* High-sensitivity GPS: Technologie und Anwendungen. In: *DVW Schriftenreihe 49*, 251–274
- [23] *Wunderlich, Th.A., Preis, S., Su, C. (2006):* Wireless Assisted GPS – Technische Möglichkeiten und notwendige Infrastruktur. In: *DVW Schriftenreihe 49*, 241–250
- [24] *Ziedan, N.I. (2006):* GNSS receivers for weak signals. Artech House, Boston - London, 234p

Anschrift des Autors

Dr. Andreas Wieser: Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30, 8010 Graz. E-mail: andreas.wieser@tugraz.at 