KURZBERICHT ZUR DIPLOMARBEIT[1]:

ENTWICKLUNG EINER ECHTZEITFÄHIGEN C/C++ SOFTWARE ZUR VERBESSERUNG DER GPS-MESSUNGEN MITTELS SBAS FÜR DIE LANDFAHRZEUGNAVIGATION

LUIS DIEMER

17.07.2015

INHALTSVERZEICHNIS

1 Motivation 2
2 Grundlagen 2
2.1 Pseudorange . . . 2
2.2 Deltarange . . . 3
2.3 Fehlerhaushalt . . . 3
2.4 SBAS-Korrekturen . . . 3
3 Vorgehensweise 4
3.1 Hardware . . . 4
3.2 Software . . . 4
3.3 Ausgleichung . . . 6
4 Untersuchungen 7
4.1 Statische Messungen . . . 7
4.2 Kinematische Messungen . . . 8
5 Zusammenfassung und Ausblick 10

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Hadware des Messsystems. PC und u-blox Empfänger. 4
Abbildung 2 Screenshot der mit der C/C++ Klassenbibliothek Qt entwickelten Software Oberfläche. . . . 5
Abbildung 3 Schematischer Programmablauf. . . . 5
Abbildung 4 Messaufbau der statischen Messung. . . . 8
Abbildung 5 Dritte statische Positionsmessung. Langzeitmessung. 8
Abbildung 6 Gefahrende Route und erstes Szenario: Autobahn E52. 9
Abbildung 7 Zweites Szenario: Hauptstätterstraße, Stuttgart. . . . 9
Abbildung 8 Drittes Szenario: Löffelstraße, Stuttgart. . . . 10

[1] *Am Institut für Navigation der Universität Stuttgart, Juli 2014*

1 MOTIVATION

Für die Landfahrzeugnavigation haben sich die äußeren Bedingungen in den letzten Jahren im Wesentlichen aus zwei Gründen zunehmend erschwert. Ein Grund ist der kontinuierlich zunehmende Straßenverkehr, ein anderer die vor allem in Ballungszentren stetig komplexer werdende Infrastruktur.

Um das Autofahren dennoch möglichst komfortabel und sicher, sowie effizient zu gestalten forscht die Automobilindustrie vermehrt in dem Bereich des autonomen Fahrens. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei die Fahrspurerkennung. Mit einer Positionsgenauigkeit von ca. $10,3m$[1] wird mit reinen GPS-Messungen dieses Ziel nicht erreicht.

Die SBAS gestützten GPS-Messungen erreichen eine Lagegenauigkeit von ca. $1-3m$[2] und stellen zudem eine Integritätsinformation für die verwendeten Signale zur Verfügung. Damit wäre unter der Voraussetzung einer hochgenauen Kartengrundlage und eines guten Satellitenempfangs, bereits eine sehr genau und auch zuverlässige Positionierung ohne zusätzliche Kosten für weitere Sensoren möglich.

Für die Entwicklung der Software wurde ein Ein-Frequenz Low-Cost Empfänger der Firma u-blox verwendet. Da weder die vom Empfänger berechnete Positions- noch die Geschwindigkeitslösung dokumentiert sind, werden diese in der entwickelten Software auf Basis der Beobachtungen mittels einer gewichteten Ausgleichung selbst geschätzt. Dabei werden die empfangenen Rohdaten nach den offiziellen Dokumenten *IS-GPS-200G* und *RTCA DO229D* für SBAS verarbeitet. Durch die Berechnung der Daten mit einer hardwarenahen Programmiersprache wie C/C++ wird dabei eine Positions- und Geschwindigkeitsschätzung in Echtzeit gewährleistet. Echtzeit soll in dieser Arbeit die Fähigkeit beschreiben, die empfangenen Daten innerhalb der von den Satellitenbeobachtungen vorgegebenen Taktrate von $1s$ zu verarbeiten und eine Schätzung für die Position und Geschwindigkeit an den Nutzer weiterzugeben.

2 GRUNDLAGEN

Aus dem Fehlerhaushalt (Kapitel 2.3) der Pseudorange (Kaptiel 2.1) und Deltarange (Kapitel 2.2) ergibt sich die Notwendigkeit für das Anbringen von SBAS-Korrekturen (Kapitel 2.4) an diesen beiden GPS-Beobachtungsgrößen.

2.1 Pseudorange

Grundlage für die Positionsbestimmung bildet die Beobachtung der Pseudorange ρ, welche über die folgende Beobachtungsgleichung bestimmt wird:

$$\rho = |\mathbf{r}| + c \cdot (\Delta t_{t,Rec} - \Delta t_{t,SV}) + c \cdot \Delta t_e \tag{1}$$

Wobei $|r|$ den geometrischen Abstand zwischen Satellit und Empfänger beschreibt und $\Delta t_{t,Rec}$ und $\Delta t_{t,SV}$ den Empfägeruhren- beziehungsweise den Satellitenuhrenfehler. Weitere Signallaufzeitfehler werden in dem Term Δt_e

[1] W. Mansfeld. *Satellitenortung und Navigation: Grundlagen, Wirkungsweise und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme. Vieweg+Teubner Verlag, 2010.*
[1] ESA. *User Guide for EGNOS Application Developers, Ed. 1.1. 2009.*

zusammengefasst. Die wesentlichen Signallaufzeitfehler sind in Tabelle 1 nach ihrer jeweiligen Fehlerquelle geordnet.

2.2 Deltarange

Die Beobachtungsgröße der Deltarange $\dot{\rho}$ beschreibt Streckenunterschiede zwischen dem Empfänger und dem Satelliten. Für kleine Zeitintervalle kann die Deltarange als zeitliche Ableitung der Pseudorange betrachtet werden:

$$\dot{\rho} = \boldsymbol{v}_{Rec}^{SV} \cdot \boldsymbol{e} + c \cdot (\Delta \dot{t}_{t,Rec} - \Delta \dot{t}_{t,SV}) + c \cdot \Delta \dot{t}_e \tag{2}$$

Dieser Beobachtungsgleichung liegt die Messgröße der Dopplerfrequenz zu Grunde, welche auf Grund der Relativgeschwindigkeit $\boldsymbol{v}_{Rec}^{SV}$ zwischen Empfänger und Satellit entlang des sogenannten Line Of Sight Vektors $\boldsymbol{e}$ entsteht.

2.3 Fehlerhaushalt

Fehler bei einer GPS-Messung sind auf Laufzeitfehler des Signals zurückzuführen, weshalb die Streckenmessung zu einem Satelliten auch als Pseudorange Messung bezeichnet wird. Die Signallaufzeitfehler lassen sich nach ihrer Enstehungsquelle geordnet werden. Die unter dem Formelzeichen Δt_e zusammengefassten Fehler sind die nach dem anbringen von SBAS-Korrekturen verbleibenden Signallaufzeitfehler.

Tabelle 1: Signallaufzeitfehler Δt[1]

Quelle	Effekt	Formelzeichen
Satellit	Satellitenuhrenfehler Satellitenorbitfehler	Δt_{SV}
Signalausbreitung	Refraktion in der Ionosphäre Refraktion in der Troposphäre	Δt_{Iono} Δt_{Tropo}
Empfänger	Mehrwegefehler Antennenphasenzentrumsfehler Empfängeruhrenfehler	Δt_e Δt_e Δt_{Rec}

2.4 SBAS-Korrekturen

Von SBAS-Satelliten werden für die Minimierung der Troposphärenfehler, der Ionosphärenfehler und der Satellitenorbitfehler Parameter zur Berechnung von Korrekturmodellen übertragen. Der Empfängeruhrenfehler hingegen wird bei der Positionsschätzung als vierter, unbekannter Parameter mitbestimmt. Somit verbleiben der im Vergleich zu den übrigen Fehlern als gering einzustufende Antennenphasenzentrumsfehler und der antennenumgebungsabhängige Mehrwegefehler als einzige nennenswerte Fehlereinflüsse. Neben den Korrekturparametern werden auch Parameter für die Berechnung der Varianzen der Korrekturen übertragen, welche für eine gewichtete Ausgleichung genutzt werden können.

[1] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, und E. Wasle. *GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer, 2007.*

3 VORGEHENSWEISE

Die verwendete Hardware (Kapitel 3.1) und die entwickelte Software (Kapitel 3.2), sowie zwei elementare Algorithmen (Kapitel 3.3) sollen an dieser Stelle kurz vorgestellt werden.

3.1 Hardware

Als Hardware Komponenten dienten ein Laptop mit einem Arbeitsspeicher von 4GB und einem 2,53GHz Dual-Core-Prozessor, sowie ein GPS-Empfänger der Firma u-blox (siehe Abbildung 1). Der Ein-Frequenz-Empfänger der Baureihe LEA-6T wird der Gruppe der Low-Cost-Empfänger zugeordnet und zeichnet sich wie die meisten Empfänger in diesem Preissegment durch eine hohe Sensitivität aus. Das bedeutet, dass auch sehr schwache Signale empfangen und für eine Positionsschätzung verwendet werden können. Der Empfänger überträgt über eine USB-Schnittstelle sowohl NMEA Daten, als auch die empfangenen Rohdaten in binärer Form, welche für die Weiterverarbeitung gelesen und in die entsprechenden C/C++ Klassen gespeichert werden.

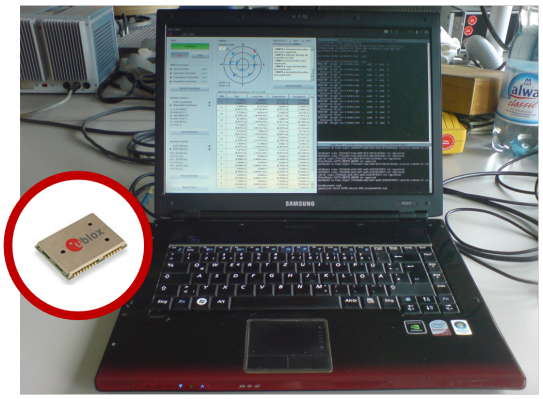


Abbildung 1: Hadware des Messsystems. PC und u-blox Empfänger.

3.2 Software

Die Software wurde unter der Linux-Distribution Ubuntu entwickelt. Sie ist in der Lage innerhalb einer Sekunde eine Positions- und eine Geschwindigkeitsschätzung durchzuführen. Diese Werte werden auf einer mit Qt entwickelten GUI ausgegeben. Die GUI bietet ebenfalls die Möglichkeit verschiedene Einstellungen vorzunehmen (siehe Abbildung 2). Unter anderem können nach Bedarf die von SBAS zur Verfügung gestellten Korrekturmodelle aus den vom Empfänger ausgelesenen Rohdaten berechnet und an die Positionsschätzung angebracht werden. Ein schematischer Überblick über den Programmablauf soll in Abbildung 3 dargestellt werden.

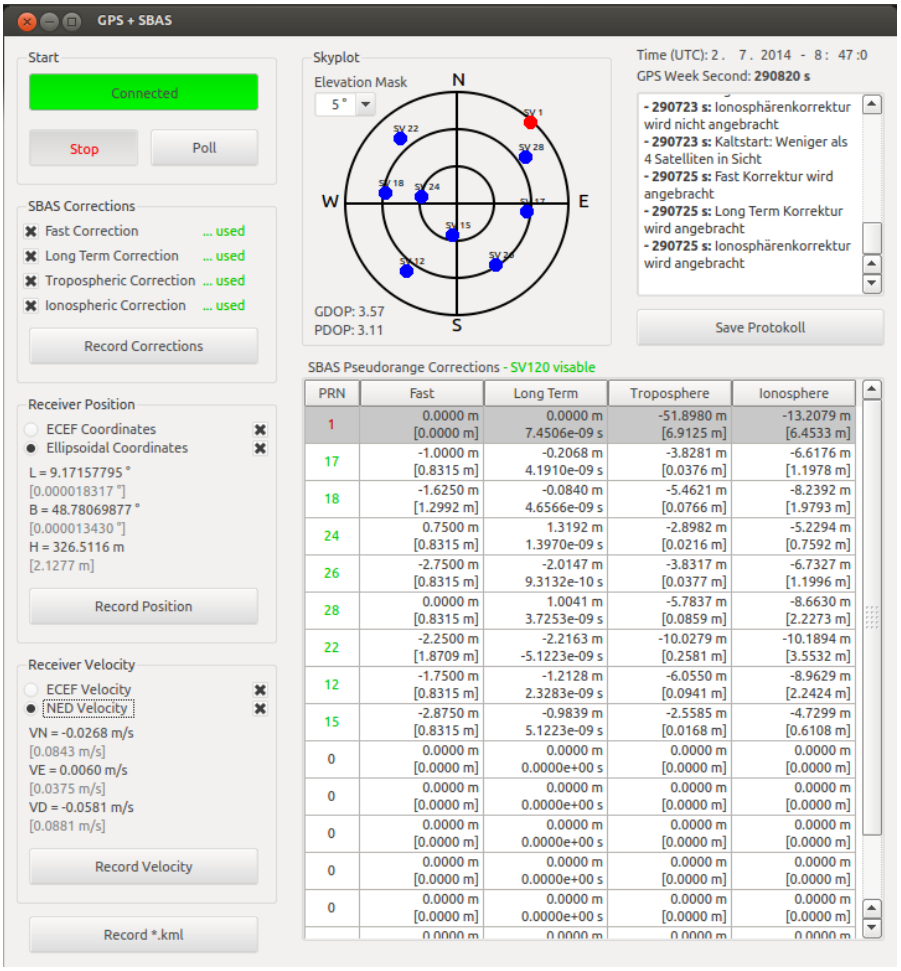


Abbildung 2: Screenshot der mit der C/C++ Klassenbibliothek Qt entwickelten Software Oberfläche.

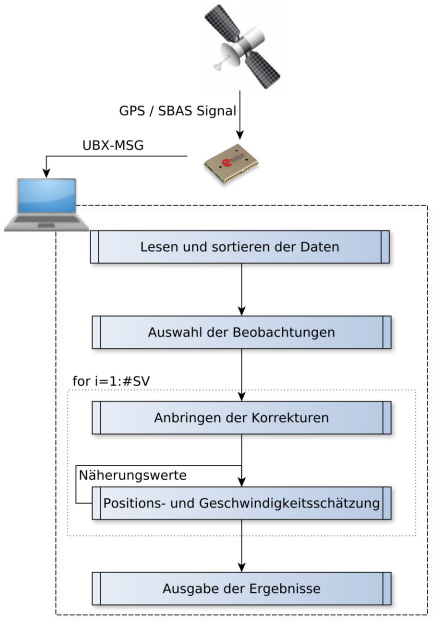


Abbildung 3: Schematischer Programmablauf.

3.3 Ausgleichung

Sowohl die Positions- als auch die Geschwindigkeitsschätzung wurden in der entwickelten Software nach der Methode der kleinsten Quadrate implementiert.

3.3.1 *Positionsschätzung*

Die gesuchte Empfängerposition ergibt sich aus Gleichung 1 und kann nur in einem nicht linearen Zusammenhang dargestellt werden, weshalb eine Linearisierung nach Taylor angewandt werden muss um zu folgendem funktionalem Modell zu gelangen:

$$\begin{bmatrix} \rho_1 - |\mathbf{r}_{0,1}| + c \cdot \Delta t_{t,SV,1} \\ \rho_2 - |\mathbf{r}_{0,2}| + c \cdot \Delta t_{t,SV,2} \\ \rho_3 - |\mathbf{r}_{0,3}| + c \cdot \Delta t_{t,SV,3} \\ \vdots \\ \rho_n - |\mathbf{r}_{0,n}| + c \cdot \Delta t_{t,SV,n} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{X_{Rec,0} - X_{SV,1}}{|\mathbf{r}_{0,1}|} & \frac{Y_{Rec,0} - Y_{SV,1}}{|\mathbf{r}_{0,1}|} & \frac{Z_{Rec,0} - Z_{SV,1}}{|\mathbf{r}_{0,1}|} & 1 \\ \frac{X_{Rec,0} - X_{SV,2}}{|\mathbf{r}_{0,2}|} & \frac{Y_{Rec,0} - Y_{SV,2}}{|\mathbf{r}_{0,2}|} & \frac{Z_{Rec,0} - Z_{SV,2}}{|\mathbf{r}_{0,2}|} & 1 \\ \frac{X_{Rec,0} - X_{SV,3}}{|\mathbf{r}_{0,3}|} & \frac{Y_{Rec,0} - Y_{SV,3}}{|\mathbf{r}_{0,3}|} & \frac{Z_{Rec,0} - Z_{SV,3}}{|\mathbf{r}_{0,3}|} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{X_{Rec,0} - X_{SV,n}}{|\mathbf{r}_{0,n}|} & \frac{Y_{Rec,0} - Y_{SV,n}}{|\mathbf{r}_{0,n}|} & \frac{Z_{Rec,0} - Z_{SV,n}}{|\mathbf{r}_{0,n}|} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta X_{Rec} \\ \Delta Y_{Rec} \\ \Delta Z_{Rec} \\ c \cdot \Delta t_{t,Rec} \end{bmatrix} \tag{3}$$

Sind SBAS-Korrekturen vorhanden ist die Software in der Lage eine gewichtete Ausgleichung durchzuführen und somit eine Genauigkeit für die geschätzte Position zu bestimmen:

$$\hat{\mathbf{x}}_{4\times1} = (\mathbf{A}^{\top}_{4\times n} \cdot \mathbf{P}_{n\times n} \cdot \mathbf{A}_{n\times4})^{-1} \mathbf{A}^{\top}_{4\times n} \cdot \mathbf{P}_{n\times n} \cdot \mathbf{l}_{n\times1} \tag{4}$$

Die Gewichtsmatrix $\mathbf{P}$ ist dabei die Inverse der Kofaktormatrix der Beobachtungen, deren Diagonale sich wiederum aus einer Addition der von SBAS mit den jeweiligen Korrekturen übertragenen Varianzen ergibt.

3.3.2 *Geschwindigkeitsschätzung*

Für die Geschwindigkeitsschätzung ergibt sich nach der Auflösung der Gleichung 2 nach der Empfängergeschwindigkeit das bereits lineare funktionale Modell zu:

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho}_1 - \dot{\mathbf{X}}_{SV,1} \cdot \boldsymbol{e}_1 + c \cdot \Delta\dot{t}_{t,SV,1} \\ \dot{\rho}_2 - \dot{\mathbf{X}}_{SV,2} \cdot \boldsymbol{e}_2 + c \cdot \Delta\dot{t}_{t,SV,2} \\ \dot{\rho}_3 - \dot{\mathbf{X}}_{SV,3} \cdot \boldsymbol{e}_3 + c \cdot \Delta\dot{t}_{t,SV,3} \\ \vdots \\ \dot{\rho}_n - \dot{\mathbf{X}}_{SV,n} \cdot \boldsymbol{e}_n + c \cdot \Delta\dot{t}_{t,SV,n} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{X_{Rec,0} - X_{SV,1}}{|\mathbf{r}_{0,1}|} & \frac{Y_{Rec,0} - Y_{SV,1}}{|\mathbf{r}_{0,1}|} & \frac{Z_{Rec,0} - Z_{SV,1}}{|\mathbf{r}_{0,1}|} & 1 \\ \frac{X_{Rec,0} - X_{SV,2}}{|\mathbf{r}_{0,2}|} & \frac{Y_{Rec,0} - Y_{SV,2}}{|\mathbf{r}_{0,2}|} & \frac{Z_{Rec,0} - Z_{SV,2}}{|\mathbf{r}_{0,2}|} & 1 \\ \frac{X_{Rec,0} - X_{SV,3}}{|\mathbf{r}_{0,3}|} & \frac{Y_{Rec,0} - Y_{SV,3}}{|\mathbf{r}_{0,3}|} & \frac{Z_{Rec,0} - Z_{SV,3}}{|\mathbf{r}_{0,3}|} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{X_{Rec,0} - X_{SV,n}}{|\mathbf{r}_{0,n}|} & \frac{Y_{Rec,0} - Y_{SV,n}}{|\mathbf{r}_{0,n}|} & \frac{Z_{Rec,0} - Z_{SV,n}}{|\mathbf{r}_{0,n}|} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{X}_{Rec} \\ \dot{Y}_{Rec} \\ \dot{Z}_{Rec} \\ c \cdot \Delta\dot{t}_{t,Rec} \end{bmatrix} \tag{5}$$

Um eine gewichtete Ausgleichung durchzuführen wird auf die aus vergangenen Epochen berechneten Standardabweichungen der Dopplerfrequenz zurückgegriffen, da diese als alleinige Messgröße der Berechnung der Deltarange zugrunde liegt. Es wird angenommen, dass die Korrekturen von SBAS auf die Geschwindigkeitsmessung keinen Einfluss haben. Denn die zeitlichen Ableitungen der Atmosphärenfehler sind bereits in den Dopplerfrequenzmessungen enthalten und nehmen zudem nur sehr geringe Werte an.

4 UNTERSUCHUNGEN

Es wurden die Genauigkeit der Positions- und der Geschwindigkeitsschätzung sowohl im statischen (Kapitel 4.1) als auch im kinematischen (Kapitel 4.2) Fall untersucht.

4.1 Statische Messungen

Die statischen Messungen mit einer exponierten Antenne wurden zur Verifizierung der entwickelten Software durchgeführt (siehe Abbildung 4). Bei der Untersuchung der Position konnte zum einen der Effekt der angebrachten Korrekturen dargestellt und mit Literaturwerten verglichen werden. Zum anderen konnte die Integrität der Software dadurch nachgewiesen werden, dass die Abweichung der geschätzten Positionslösung die mittels SBAS bestimmten Genauigkeitsgrenzen nicht überschreitet. Durch Langzeitbeobachtungen konnte die Stabilität der Software bei variierenden Satellitengeometrien getestet werden.

Bei einer Messdauer von einer Stunde wurde dabei eine mittlere Punktabweichung von $0,9830\text{m}$ festgestellt. Die durch die mit SBAS Varianzen bestimmte Standardabweichung betrug $2,9310\text{m}$. Da die Differenz der Referenzkoordinaten zu der geschätzten Position zu keiner Zeit die berechneten

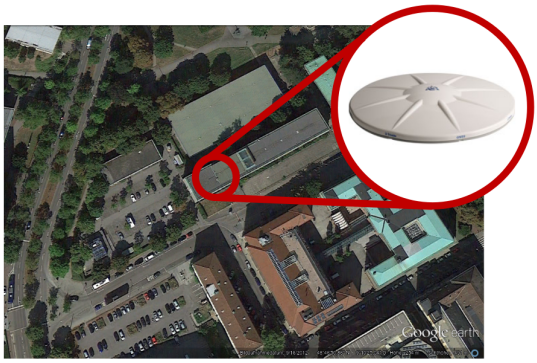


Abbildung 4: Messaufbau der statischen Messung.
Rechts: Trimble Zephyr Geodetic 2.

Standardabweichungen überschritten hat, ist diese Positionsschätzung als vertrauenswürdig anzusehen (verlgeiche Abbildung 5).

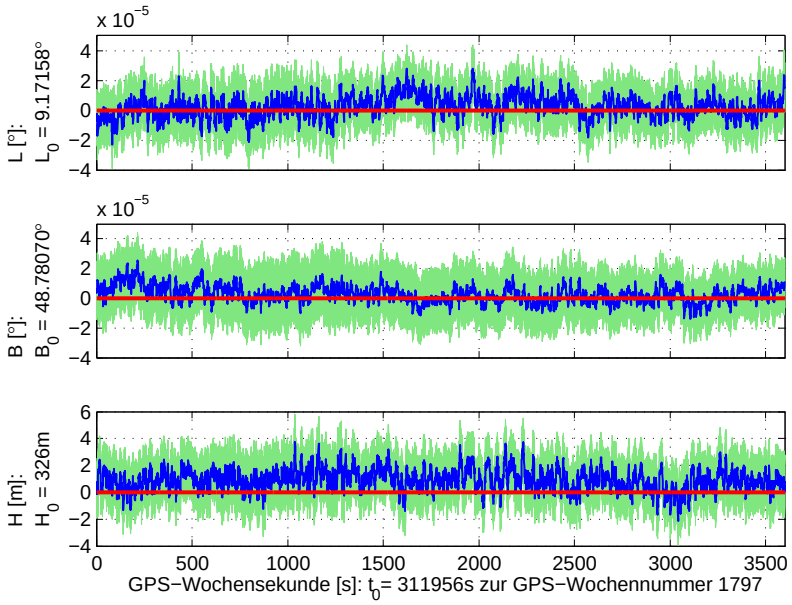


Abbildung 5: Dritte statische Positionsmessung. Langzeitmessung. Blau: Positionsschätzung; Grün: Standardabweichung; Rot: Referenz.

Die Untersuchungen bei der Geschwindigkeitsmessung beschränkten sich im statischen Fall auf die Bestimmung der Standardabweichung einer Dopplerfrequenzmessung um einen mittleren Initialwert für die Kofaktormatrix der Beobachtungen zu bestimmen. Dieser wurde in dieser Arbeit auf $0{,}0710\mathrm{m/s}$ gesetzt und durch Mittelbildung aus einer einstündigen Messung zu sechs Satelliten bestimmt.

4.2 Kinematische Messungen

Die kinematische Messung wurde exemplarisch anhand von drei unterschiedlichen Szenarien ausgewertet. Als Referenzmessung übergeordneter

Genauigkeit diente dabei das POSLV-System der Trimble-Tochter Applanix. Die in Stuttgart gefahrene Route wird in Abbildung 6a dargestellt.

In einem für eine Autobahnfahrt typischen Szenario mit weitestgehend freiem Sichtfeld (vergleiche Abbildung 6b) wurde in den meisten Fällen die berechnete Standardabweichung nicht von der Abweichung zur Referenzmessung überschritten. Ausnahmen wurden durch Autobahnbrücken oder vorbeifahrende Lastkraftwagen verursacht.

(a) Screenshot aus Google Earth. **(b)** Screenshot aus Google Street.

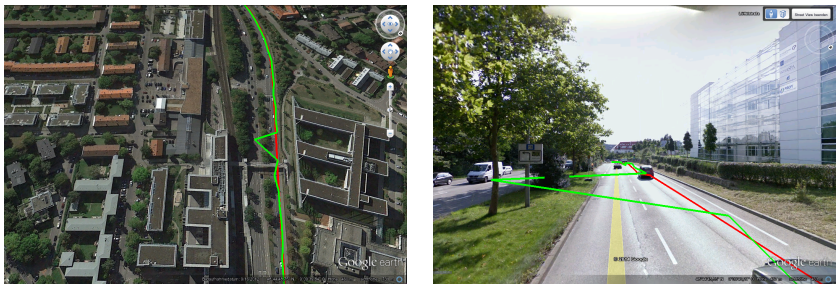
Abbildung 6: Gefahrende Route und erstes Szenario: Autobahn E52. Rot: Applanix; Blau: GPS'; Grün: GPS + SBAS.

In einem typischen Großstadtszenario wurde diese Genauigkeit auf Grund von starken Abschattungs- und Mehrwegeeffekten nicht erreicht. Sowohl die Ergebnisse der Positions- als auch die der Geschwindigkeitsschätzung sind deutlich sprunghafter und nur noch selten kann der mit den Varianzen der SBAS-Korrekturen berechnete Vertrauensbereich der Positionsschätzung eingehalten werden. Dass die erzielbare Genauigkeit sehr stark von der direkten Antennenumgebung abhängig ist konnte anhand der Beispiele in Abbildung 7 gezeigt werden. Trotz einer SBAS gestützten Positionslösung weicht die geschätzte Position für vier Sekunden um mehrere Meter deutlich von der Soll-Messung ab.

(a) Screenshot aus Google Earth. **(b)** Screenshot aus Google Earth.

Abbildung 7: Zweites Szenario: Hauptstätterstraße, Stuttgart. Rot: Applanix; Blau: GPS'; Grün: GPS + SBAS.

Auswirkungen des Mehrwegeeffekts konnten in einem dritten Szenario (siehe in Abbildung 8) veranschaulicht werden. Trotz der Verfügbarkeit von SBAS-Korrekturen konnte in dieser Sekunde die berechnete Genauigkeit nicht eingehalten werden.



(a) Screenshot aus Google Earth. **(b)** Screenshot aus Google Street View.

Abbildung 8: Drittes Szenario: Löffelstraße, Stuttgart. Rot: Applanix; Grün: GPS + SBAS.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine echtzeitfähige C/C++ Software zur kombinierten GPS und SBAS Positions- und Geschwindigkeitsschätzung entwickelt werden, welche die Rohdaten eines Low-Cost Ein-Frequenzempfänger der Firma u-blox nutzt.

Während die Genauigkeit der Positionsschätzung durch die Korrekturparameter der SBAS-Beobachtungen gesteigert werden konnte, blieb die Genauigkeit der Geschwindigkeitsschätzung, wie auf Grundlagen der Theorie zu erwarten war, unverändert. Bei statischen Messungen konnte die Integrität der entwickelten Software dadurch nachgewiesen werden, dass sich die absoluten Abweichungen der geschätzten Position innerhalb der berechneten Standardabweichungen bewegen. Die Geschwindigkeitsschätzung konnte bei statischen Messungen mit einer geringen Streuung von ca. $7\,\mathrm{cm/s}$ in allen drei Komponenten ebenfalls verifiziert werden.

Bei den kinematischen Messungen wurden diese Genauigkeiten auf Grund antennenumgebungsabhängigen Fehlereinflüsse nicht erreicht. Dabei wurde eine starke Korrelation von ungenauen Messergebnissen zum einen mit einem hohen DOP Wert und zum anderen bei einzelner Messungen mit einem niedrigen Signal/Rauschverhältnis beobachtet.

Es wurde gezeigt werden, dass bei der Landfahrzeugnavigation häufig Fehler auf Grund einer schlechten Satellitengeometrie auftreten. Diese könnten durch die Verwendung des SBAS Ranging Signals verbessert werden. Hierfür müsste die entwickelte Software um das Lesen und die Verarbeitung der Daten des SBAS Message Types 9 erweitert werden.

Ein gewissermaßen konträrer Ansatz wird von der ESA mit dem Projekt Signal in Space through the Internet (SISNeT) verfolgt. SISNeT stellt die Korrekturdaten von SBAS in Echtzeit über das Internet bereit. Damit wäre ein kontinuierlicher Empfang von Korrekturdaten gewährleistet, auch wenn vorübergehend kein SBAS-Satellit sichtbar ist.

Betrachtet man die Ergebnisse der statischen Messung könnte durch kombinierte GPS- und SBAS-Beobachtungen eine 3,5m breite Fahrspur einer Landstraße erkannt werden. Jedoch kann diese Genauigkeit bei kinematischen Messungen in den meisten Fällen nicht gewährleistet werden. Eventuell können die hier beschriebenen Ansätze die Genauigkeit weiter steigern. Jedoch wird eine zuverlässige Modellierung der in der direkten Antennenumgebung auftretenden Fehler die größte Herausforderung der satellitengestützten Landfahrzeugnavigation bleiben und die Hinzunahme von Inertialsensoren unerlässlich sein.