



ANALYSE DIFFERENZIELLEN GPS-EMFANGS

MAXIMILIAN GÖTZ

Analyse eines einfachen differenziellen Systems zur optimierten  
Positionsbestimmung

Fakultät für Informatik und Mathematik

E-Mail: [goetzmax@fim.uni-passau.de](mailto:goetzmax@fim.uni-passau.de)

Universität Passau

Maximilian Götz: *Analyse differenziellen GPS-Emfangs*, Analyse eines einfachen differenziellen Systems zur optimierten Positionsbestimmung, © Oktober 2016

## ZUSAMMENFASSUNG

---

In dieser Bachelorarbeit wird ein Vergleich zwischen zwei verschiedenen differenziellen GPS-Empfängern aufgestellt. Dabei wird am Anfang auf die Funktionsweise von Global Navigation Satellite Systems (GNSS) eingegangen und im Speziellen auf differenzielle GNSS. Es wird erklärt wie GPS funktioniert und inwiefern Faktoren die Genauigkeit der Positionsbestimmung beeinflussen. Kurz wird auf die weiteren GNSS wie GLONASS, BeiDou und Galileo eingegangen. Danach werden die Techniken der differenziellen Lokalisierung erläutert. Im Vergleich werden zwei Android Geräte gegen zwei RAW-Daten Empfänger antreten. Dabei stellt sich heraus, dass die Daten, die von den Android Geräten geliefert werden, schon gut sind. Weiter wird anhand der Daten vermutet, dass die Android Geräte die Position filtern und so relativ gleichmäßige Positionsangaben liefern. Bei den RAW-Daten Empfängern kann man mit Hilfe von Korrekturen sehr gute Ergebnisse bei guten Bedingungen bekommen. Sobald Gebäude ins Spiel kommen und den Signalempfang stören, werden die Ergebnisse schlechter, sind aber trotzdem noch auf bis zu zehn Meter genau. Für die Auswertung wurden verschiedene Differenzen gebildet, die sich in ihrer Komplexität unterscheiden. Abschließend lässt sich sagen, dass die einfache Differenzbildung bei den Android Geräten zu keiner Verbesserung der Strecke führt.



# INHALTSVERZEICHNIS

---

Zusammenfassung	i
<b>I ALLGEMEINE INFORMATIONEN ÜBER GNSS</b>	<b>1</b>
1 EINLEITUNG	3
2 SATELLITEN-NAVIGATION IN DER THEORIE	5
2.1 Grundlagen	5
2.1.1 Funktionsweise	5
2.2 Global Navigation Satellite System	6
2.2.1 Satellitentypen	6
2.2.2 Koordinatensysteme	7
2.2.3 Frequenzbänder	7
2.2.4 Navstar-GPS	9
2.2.4.1 Geschichte und Entwicklung	9
2.2.4.2 Konstellation	10
2.2.4.3 Funktionsweise	11
2.2.5 Andere GNSS	12
2.2.5.1 GLONASS	12
2.2.5.2 BeiDou/Compass	12
2.2.5.3 Galileo	13
2.2.6 Genauigkeit	13
2.3 Differenzielles GNSS	17
2.3.1 Theorie	17
2.3.1.1 Einfache Differenz	18
2.3.1.2 Differenz über einzelne Pseudorange	18
2.3.1.3 Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS)	18
2.3.2 Protokolle und Verbreitungswege	19
2.3.3 Anbieter von hochpräzisen Echtzeitdaten	19
2.4 Weitere Empfangsmöglichkeiten und Lokalisierungsarten	20
2.4.1 Trägerphasenmessung	20
2.4.2 A-GPS	21
2.4.3 WLAN und Mobilfunk Positionierung	21
<b>II VERSUCHE</b>	<b>23</b>
3 VERSUCHE - UNTERSUCHUNGEN	25
3.1 Versuchsbeschreibung	25
3.2 Aufbau	25
3.3 Geräte, Systeme, Informationsquellen	26
3.4 Software	27
3.4.1 u-blox u-Center	27
3.4.2 Android Logger - BetterLocation	27

3.4.3	RTKlib . . . . .	28
3.4.4	Auswertungssoftware . . . . .	30
3.4.5	Herausforderungen bei der Entwicklung der Programme . . . . .	31
3.5	Auswertung . . . . .	32
3.5.1	Allgemein erfasste Daten . . . . .	32
3.5.2	Versuch 1 . . . . .	33
3.5.3	Versuch 2 . . . . .	37
3.5.4	Versuch 3 . . . . .	39
4	AUSBLICK . . . . .	43
4.1	Hardware . . . . .	43
4.2	Tests . . . . .	43
4.3	Software . . . . .	44
5	FAZIT . . . . .	45
<b>III ANHANG</b>		47
	Abbildungsverzeichnis . . . . .	49
	Tabellenverzeichnis . . . . .	50
	Abkürzungsverzeichnis . . . . .	51
	Stichwortverzeichnis . . . . .	52
	<b>LITERATUR</b> . . . . .	53

## Teil I

# ALLGEMEINE INFORMATIONEN ÜBER GNSS





## EINLEITUNG

---

### MOTIVATION

Mobile Navigation wird heute mehr denn je benutzt. Während einige Anwendungen mit einer Ortung von +/- 20 m Genauigkeit auskommen, gibt es beispielsweise Automatisiertes Fahren, Vermessung, Geodäsie oder Flugzeugnavigation, die nicht mit dieser Genauigkeit arbeiten können. Sie benötigen genauere Verfahren und diese müssen teilweise auch in Echtzeit anwendbar sein. Hierfür werden Techniken benutzt, die bewegte Empfänger auf eine Genauigkeit von 1 dm und stationäre Empfänger auf unter 1 cm bringen.

Nicht nur in professionellen Bereichen, die oben schon genannt wurden, ist Genauigkeit gefragt. Auch beim **OpenStreetMap** Projekt ist ein genaues Kartografieren vor Ort von Vorteil für das Einpflegen der Objekte in die Karte. Da heute das Einpflegen der Objekte mit Smartphones geschieht, wäre eine einfache Ortungsverbesserung bereits hilfreich. Deshalb werden zwei verschiedene Ansätze verglichen, die nicht besonders teuer in der Anschaffung sind. Die Smartphone Methode wurde dafür als einfache mobile Art und Weise angesehen. Schließlich besitzt fast jeder mittlerweile ein Smartphone mit einem GPS-Empfänger. Die andere Methode, mit den externen GPS-Empfängern, sollte auch im normalen Empfang die Position genauer bestimmen können. Letztere Methode benötigt sowohl für die Aufzeichnung als auch für die Aufbereitung einen Computer.

Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, ob einfache differenzielle Auswertungsmethoden zur Verbesserung der Positionsgenauigkeit beitragen und ob diese schon heute in Smartphones umgesetzt werden können. Gleichzeitig soll die Lösung möglichst günstig sein, so dass keine größeren Investitionen nötig sind.

### STRUKTUR DIESER ARBEIT

Die Arbeit ist in die Kapitel Allgemeine Informationen, Versuche und Anhang aufgeteilt. Im Allgemeinen Teil wird nach einen kurzen Einführung über die globale Satelliten-Ortung, der genaue Aufbau und die Funktionsweise der Global Navigation Satelit Systems (GNSS) erklärt. Dabei wird auf die einzelnen existierenden Systeme eingegangen und deren Unterschiede kurz erläutert. Das amerikanische System GPS wird genauer erklärt. Besonders wird auf die einzelnen Fehlerquellen bei der Positionierung eingegangen. Der darauf folgende Abschnitt beschäftigt sich mit dem differenziellen GNSS (DGNSS) im

Speziellen und dessen Vorteilen. Im Kapitel Versuche erläutere ich die genauen Vorgehensweisen und stelle die verwendeten Tools vor. Hierbei gehe ich auch auf die selbst entwickelten Programme ein, die zur Aufzeichnung und Auswertung angefertigt wurden. Außerdem werde ich auf die Ergebnisse und deren Bedeutung im Abschnitt Auswertung vorstellen. Am Ende des Kapitels werden die Ergebnisse im Fazit zusammengefasst. Im Anhang befinden sich die Quellennachweise, das Abkürzungsverzeichnis, das Glossar sowie das Tabellen- und Abbildungsverzeichnis.

## 2.1 GRUNDLAGEN

Mit einem globalen Satelliten-System (Global Navigation Satellite System, kurz **GNSS**) sollte ein Ortungssystem auf der Erde geschaffen werden. Dies war das Ziel der USA, die im April 1973 beschlossen das NAVSTAR-GPS System zu entwickeln (Bauer, 2003, S. 153). Heute wird es nur noch als GPS bezeichnet. Der Begriff GPS steht, anders als oft allgemein im Sprachgebrauch verwendet, nur für das amerikanische **GNSS**. Aber auch Russland mit **GLONASS**, die EU mit **Galileo** und China mit **BeiDou** betreiben solche Systeme. Diese sind untereinander nicht vollständig kompatibel. In vielen Geräten werden deshalb nicht alle Systeme zur Navigation unterstützt, sondern nur die etablierten und vollständig ausgebauten Systeme **GPS** und **GLONASS**.

### 2.1.1 Funktionsweise

Stark vereinfacht wird in diesem Abschnitt die grundsätzliche Funktionsweise der Ortung erklärt. Genauere Ausführungen werden im Abschnitt **Funktionsweise** für GPS erläutert. Was bei allen Systemen gleich ist, ist die Art und Weise wie diese Ortung abläuft. Jeder Satellit sendet eine Nachricht in bestimmten Zeitintervallen. Diese enthält die Uhrzeit und die Position des Satellit zum Sendezeitpunkt. Der Empfänger könnte jetzt, sofern er eine exakte Uhrzeit besitzt, die Position aus 3 Satellitennachrichten bestimmen (siehe **Tabelle 1**). Da aber die meisten Empfänger keine Atomuhr besitzen, benötigt man für eine Positionierung im Raum (Längengrad, Breitengrad, Höhe) einen weiteren Satelliten um die vierte Variable, die Zeit  $t_{\text{User}}$ , exakt zu bestimmen. Die Zeit ist deshalb so wichtig, weil über die Differenz zur Satellitenzeit die Distanz zu diesem berechnet wird.

Der Empfänger misst die Zeit des Signals vom Satellit zum Empfänger und kann mit der Annahme, dass sich das Signal mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, die Strecke zwischen dem Gerät und dem Satellit berechnen.

$$R = (t_{\text{User}} - t_{\text{Satellit}}) * c \quad (1)$$

Diese Distanz wird als Pseudorange bezeichnet, weil die genaue Uhrzeit zum Zeitpunkt des Nachrichtenempfangs nicht verfügbar ist. Auch breitet sich das Signal nicht in Lichtgeschwindigkeit aus, sondern

Tabelle 1: Zu lösendes Gleichungssystem in vereinfachter Form

$$(R_1)^2 = (X_1 - U_X)^2 + (Y_1 - U_Y)^2 + (Z_1 - U_Z)^2$$

$$(R_2)^2 = (X_2 - U_X)^2 + (Y_2 - U_Y)^2 + (Z_2 - U_Z)^2$$

$$(R_3)^2 = (X_3 - U_X)^2 + (Y_3 - U_Y)^2 + (Z_3 - U_Z)^2$$

---

$R_i$	gemessene Distanz zwischen User (U) und Satellit
$X_i$	X Position des Satellit i
$Y_i$	Y Position des Satellit i
$Z_i$	Z Position des Satellit i
$U_x$	X,Y oder Z Position des User
t	Zeit (in R - siehe dazu <a href="#">Gleichung 1</a> )
c	Lichtgeschwindigkeit

wird verzögert. Den Fehler, d. h. die Abweichung der Pseudorange von der exakten Distanz, gilt es zu reduzieren.

## 2.2 GLOBAL NAVIGATION SATELITE SYSTEM

Es gibt verschiedene globale Satellitennavigationssysteme. Vollständig entwickelt war das erste System von den Amerikanern erst im Jahre 1995. Es ist uns heute als [GPS](#) bekannt. Ein weiteres System das heute genutzt wird, ist das russische System [GLONASS](#). Außerdem gibt es noch das nicht militärisch, sondern zivil kontrollierte Galileo System. Alle Systeme ermöglichen eine zivile Ortung weltweit. Mit militärischen Empfängern können noch zusätzlich verschlüsselte Signale dekodiert werden, die genauere Daten beinhalten. Damit kann eine höhere Genauigkeit erreicht werden. Die wichtigsten Eigenschaften dieser Systeme werden hier kurz vorgestellt. Das GPS-System, das in den Versuchen verwendet wurde, wird genauer beschrieben. Ferner werden des Öfteren die Begriffe [Rover](#) und [Station](#) fallen. Rover ist ein sich bewegendes GNSS-Empfänger. Eine Station ist ein stationärer GNSS-Empfänger. Dieser stellt Korrekturdaten bereit. Die nachfolgenden Ausführungen dieses Abschnitts sind aus den Quellen [Bauer, 2003](#), [u-blox, 2009](#), [GPSWorld, 2016](#) und [Dach u. a., 2015](#) entnommen. Spezielle weiterführende Informationen werden extra gekennzeichnet.

### 2.2.1 Satellitentypen

Satelliten werden je nach Verwendungszweck in unterschiedlichen [Orbits](#) platziert. Sie sind nach diesen klassifiziert. Es gibt geostationäre Satelliten(GEO), geneigte geostationäre Satelliten (IGSO) als Spezialfall eines GEOs und Satelliten im mittlerer Orbit (MEO). Geosta-

tionäre Satelliten befinden sich immer am selben Punkt am Himmel. Durch sie wird Satellitenfernsehen erst möglich. Ansonsten müssten ständig die Satellitenschüsseln neu ausgerichtet werden. Auch die Korrekturdaten sendenden Satelliten des EGNOS Systems benutzen diesen Orbit in 36 000 km Höhe. Sie sind dort platziert, damit ihre Dienste immer die selben Gebiete abzudecken. Mehr dazu aber später im Abschnitt [Satellite-Based Augmentation Systems \(SBAS\)](#). Die IGSO haben eine Umlaufdauer von 23 Stunden und 56 Minuten und sind nicht exakt über dem Äquator platziert. Durch die leichte Neigung werden sie Inclined geosynchronous orbit genannt. Die für GNSS interessanten Satellitenorbits sind die MEOs. Hier in einer Höhe von ca. 20 000 km befinden sich die meisten Satelliten der GNSS. Ziel ist es eine möglichst geringe Anzahl an Satelliten zu verwenden, die trotzdem eine gute Abdeckung gewährleisten und deren Signal leicht auf der Erde empfangbar ist.

### 2.2.2 Koordinatensysteme

Es gibt mehrere Koordinatensysteme mit deren Hilfe der Empfänger seine Position berechnet. Dazu gehören das WGS84 (GPS) und das PZ-90 (GLONASS) System. Aber auch die einzelnen Länder haben Referenzsysteme, die sie für die Vermessung verwenden. Da die meisten Systeme ähnlich aufgebaut sind und sich nur in Achsenlage und gewissen Größen unterscheiden, wird hier nur auf das WGS84 eingegangen.

Das World Geodetic System von 1984 (WGS84) ist das wahrscheinlich meist verwendete System. Es vermisst die Erde und legt verschiedenste Parameter dieser fest. Dazu zählt die Angabe der Masse, wo sich der Mittelpunkt der Erde befindet oder welche Länge der Äquator hat. Ebenfalls wurde damals spezifiziert, dass der Null Meridian oder auch Prime Meridian genannt durch das Observatorium von Greenwich läuft. Wobei es hier auf Grund von Plattentektonik und Messungenauigkeiten leichte Verschiebungen gibt. Mittlerweile liegt Longitude  $0^{\circ}00'00''\text{E}$  nicht mehr genau dort, sondern ca. 100 m davon entfernt. Auch andere Messgrößen haben sich seit 1984 geändert. Dazu gehören die Parameter für den Ellipsoid der Erde. Deshalb wird das System ständig überarbeitet. Dies ist ein wichtiger Punkt, um später auch die Karten zu positionieren. Durch die Verwendung eines veralteten oder anderen Systems muss die Karte zuvor kalibriert und exakt vermessen sein. Andernfalls drohen hier Ungenauigkeiten in der Darstellung der Karte.

### 2.2.3 Frequenzbänder

Für die Übertragung der Signale zu den Empfängern werden Frequenzen im L-Band (1-2GHz) verwendet. Referenzstationen und geo-

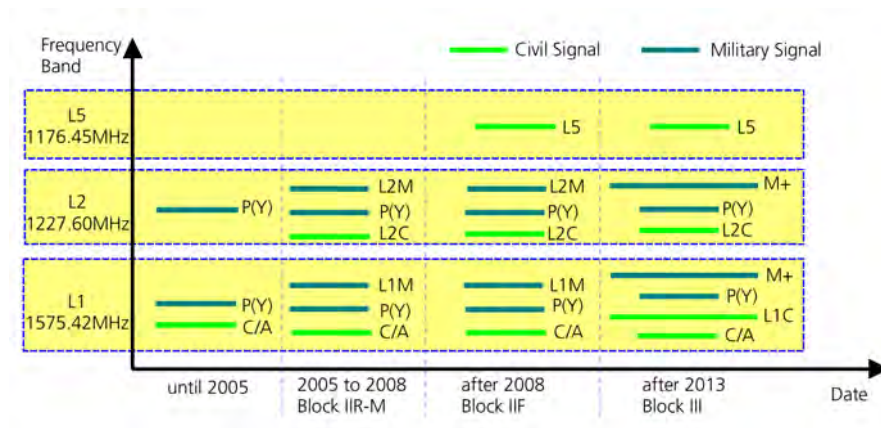


Abbildung 1: Frequenzbänder des GPS Systems, Quelle: u-blox, 2009

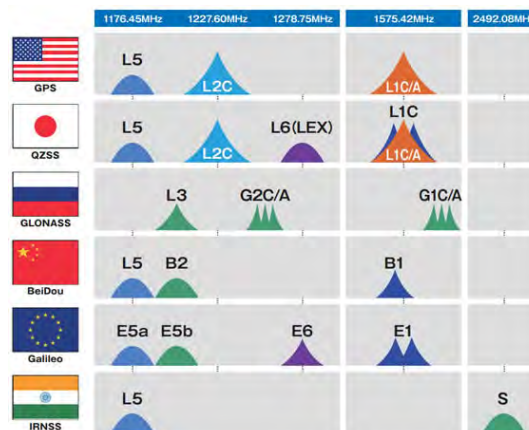


Abbildung 2: Frequenzbänder der verschiedenen GNSS

stationäre Satelliten untereinander verwenden das  $K_u$ /K-Band (12-18GHz/18-27GHz). Das L-Band wird beim GPS unterteilt in drei Frequenzen. Die anderen Systeme verwenden die gleichen Frequenzen mit anderer Modulation oder Frequenzen, die sich in der Nähe dieser befinden. Siehe dazu [Tabelle 2](#) und [Abbildung 1](#). Die am häufigsten verwendeten Frequenzen werden kurz vorgestellt und in [Abbildung 2](#) visualisiert:

1 575.420 MHz Mit GPS(L<sub>1</sub>), GLONASS(L<sub>1</sub>CR), Galileo(mit L<sub>1</sub>) erweitert um E1 und E2 ist dies, die meist genutzte Frequenz. Auf ihr wurden von Anfang an unverschlüsselte Signale gesendet.

1 227.600 MHz Die Frequenz, die hauptsächlich verschlüsselte Signale liefert. Bei GPS L<sub>2</sub> genannt.

Tabelle 2: Frequenzbänder aller GNSS

GNSS	Frequenzbänder	
	high	low
GPS / QZSS	L1	L2 , L5
GLONASS	L1PT , L1CR	L2PT , L3PT , L5R
Galileo	E1,L1,E2,L6	E3,E4,E5a/b , E6
BeiDou	B1	B2, B3

high hauptsächlich 1 575.420 MHz  
low zwischen 1 176.450 und 1 278.750 MHz

1 176.450 MHz Dies ist die neue Frequenz von GPS(L5, seit 2008) und GLONASS(L5R). Sie wurde erst in der letzten Generation von Satelliten eingeführt.

Die GNSS-Korrekturdaten (über SBAS) von [WAAS/EGNOS](#) und [OmniSTAR](#) senden auf 1 575.420 MHz bzw. 1 542.500 MHz.

Bessere Geräte verwenden zwei Frequenzbänder und können damit Laufzeitfehler in der Ionosphäre reduzieren. Details zu diesen und weiteren Verbesserungsmöglichkeiten finden sich im Abschnitt [Genauigkeit](#) und [Trägerphasenmessung](#).

#### 2.2.4 Navstar-GPS

##### 2.2.4.1 Geschichte und Entwicklung

Der Beginn der Entwicklung von NAVSTAR-GPS startete 1973. Im Jahr 1978 wurde der erste Satellit in den Orbit geschickt. Seitdem sind mehrere Generationen an Satelliten in den Orbit geschossen worden. Die Typen werden nach dem folgenden Schema durchnummeriert. Die römische Zahlen stehen für die Generation. Der weitere Buchstabe steht für eine Ausbaustufe. Erst 1995 wurde das System für voll funktionsfähig erklärt. Der älteste aktive Satellit wurde Anfang 2016 deaktiviert. Es war der letzte Satellit vom Typ IIA. Er wurde im November 1990 in den Orbit geschossen. Vor ihm wurde im November 2015 ein weiterer Satellit vom Typ IIA aus dem Jahr 1993 deaktiviert (GPSWorld, 2016). Es sind nun nur noch GPS-Satelliten vom Typ IIR, IIR-M und IIF im Orbit. Eigentlich sollte schon 2008 der Ausbau auf Typ III erfolgen. Da die alten Satelliten länger als geplant funktionsfähig sind, ist es noch nicht nötig, die nächste Generation in den Orbit zu senden. Mit dem neuen Typ IIF wurde das L2C und das L5 Signal für zivile Anwender aktiviert. Zuvor war auf dem L2-Band nur das vom Militär verschlüsselte Signal empfangbar. Mit diesen neuen Frequenzen ist mit einem Zwei-Frequenz-Empfänger eine Ge-



nauigkeit von zwei Metern und weniger möglich. Mehr dazu im [Abschnitt 2.3](#).

Bis im Mai 2000 hatte GPS die Funktion Selective Availability (SA) aktiviert. Diese Funktion schnitt je nach Stufe (0-15) die Anzahl der Bit zur Repräsentation der Position des Satelliten ab. Je nach Stufe verschlechterte sich so die Positionsbestimmung des Empfängers immer mehr. Eine sinnvolle Ortung war damit nicht möglich, da die Genauigkeitsabweichung teilweise bei über hundert Metern lag. Gleichzeitig wurden die Trägerphasen verrauscht. Damit war auch eine [Trägerphasenmessung](#) nicht möglich. Seit 2000 ist sie auf Null gesetzt, kann aber jederzeit wieder aktiviert werden. Dies ist ein Grund warum das zivil kontrollierte Galileo-System entwickelt wurde.

Mit der Anti-Spoofing (A-S) Maßnahme wird zudem verhindert, dass autorisierte GPS-Empfänger von einem verfälschtem Signal getäuscht werden. Mit der Technik können Militärempfänger ein verschlüsseltes unverfälschtes Signal nutzen. Es existiert aber auch eine Technik, um die verschlüsselten L2 Signale, nicht zu verwechseln mit dem neuen frei verfügbaren L2C Signal, zu nutzen. Die Technik wird als P-W Tracking oder Ashtech technique bezeichnet und in *Vermessung und Ortung mit Satelliten* im Abschnitt 3.8.3 näher beschrieben. Damit kann die Positionsbestimmung genauer werden. Die Techniken bieten aber keinen Schutz gegen Spoofing Angriffe<sup>1</sup>, da sie nicht das verschlüsselte Signal für die optimierte Ortung entschlüsseln, sondern nur einen kleinen unverschlüsselten Teil nutzen.

#### 2.2.4.2 *Konstellation*

Die Satelliten sind so über der Erde verteilt, dass gleichzeitig immer mindestens 4 am Himmel zu sehen sind. Sie befinden sich auf einer der insgesamt sechs Umlaufbahnen in ungefähr 20200km Höhe. Die Bahnen sind um 55° zum Äquator gedreht. Die Satelliten bewegen sich von West nach Ost. Dies führt mit der Drehung der Erde zu einem wellenförmigen Muster, auch Groundtrack genannt. Die Pseudo Random Noise Number (PRN), die sich in der GPS-Nachricht befindet, identifiziert einen Satelliten selbst nicht eindeutig. Nur für den aktuellen Zeitraum ist diese gültig. Sie kann zwischen den Satelliten wechseln. Dies ist besonders für Ausfälle oder spezielle Sonderab- und -hinzuschaltungen einzelner Satelliten nötig. Noch heute werden Satelliten immer mal wieder für bestimmte Zeiträume deaktiviert und gewartet. Genauere Infos gibt es auf der Seite des United States Air Force Space Command <sup>2</sup>.

Die Satelliten werden von der Erde aus in den Ground Control Stations beobachtet. Diese berechnen Korrekturdaten von Bahn und Uhr und senden diese in bestimmten Intervallen zum Satellit. Dadurch bleiben die Positionsbestimmungen gleichbleibend genau. Die exak-

<sup>1</sup> Psiaki und Humphreys, 2016.

<sup>2</sup> <https://gps.afspc.af.mil/gpsoc/ViewAdvisories.aspx?x>



ten Daten können mehrere Tage später, nach der Auswertung aller Beobachtungen, beispielsweise vom International GNSS Service (IGS) heruntergeladen werden. Dazu aber später mehr im Abschnitt differenziellen GNSS und [Anbieter von hochpräzisen Echtzeitdaten](#).

#### 2.2.4.3 Funktionsweise

Jeder Satellit sendet eine Navigationsnachricht in bestimmten Zeitintervallen. Diese Nachricht besteht aus Uhrkorrektur, Bahndaten, Zustand aller Satelliten, einem einfachen Refraktionsmodell, einem Almanach und weiteren Informationen (Bauer, 2003, S. 168 ff.). Jede Nachricht (Frame) besteht aus 1500 bit, die innerhalb von 30 s übertragen werden. Jede Nachricht besteht aus fünf Blöcken (Subframes), die jeweils mit einem Telemetry-Word (TLM) und Hand-Over-Word (HOW) beginnen. Insgesamt besteht jeder Block aus zehn Words (je 10 bit). In Word 3 bis 10 steht die jeweilige Nachricht des Blocks. Der erste Block enthält die Uhrinformationen. Die Uhrkorrektur besagt in welchem Verhältnis die gesendete Uhrzeit zur einheitlichen Uhrzeit des Satelliten steht. Ebenso die Drifts der Satellitenuhr. Im zweiten und dritten Block stehen die Bahndaten des Satelliten. Sie beinhalten die verschiedenen Koeffizienten der Satellitenbahn, die notwendig sind um die Kepler-Ellipse zu beschreiben. Der Empfänger berechnet daraus an welcher Position sich der Satellit befindet.

In den letzten beiden Blöcken werden Informationen (bez. Almanach) über die anderen Satelliten und das Refraktionsmodell transportiert. Dieses Modell wird zur Korrektur der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals angewandt. Der Almanach ist ein stark vereinfachtes Modell der Bahndaten und enthält Informationen zu allen Satelliten. Mit dem Zustand der Satelliten und den weiteren Informationen lässt sich bestimmen, welche Positionsinformationen benutzt werden können. Beispielsweise, ob ein Satellit gerade gewartet wird oder welche überhaupt aktiv oder empfangbar sind. Zur vollständigen Übertragung aller Informationen über das aktuelle GPS-System benötigt man 12.5 min. Das sind 25 Nachrichten eines einzelnen Satelliten, die fehlerfrei beim Empfänger ankommen müssen. Dies ist der Grund für die langen Initialisierungsphasen früherer Empfänger.

Den Empfangszeitpunkt der Nachricht speichert der Empfänger. Durch die Differenz zu der Uhrzeit, die sich in der Nachricht selbst befindet, errechnet er die Laufzeit des Signals und die Distanz zwischen Satellit und Empfänger. Hierbei fließen Korrekturen des Refraktionsmodell oder bei Differential Global Satelit System (DGPS) die Korrekturen des zweiten Empfängers mit ein.

Mit einer anfangs geschätzten Position vom Empfänger und der des Satelliten aus der GPS-Nachricht wird nun mit der Formel für die

Pseudorange iterativ für jeden Satelliten die Position des Empfängers bestimmt.

$$\text{PSR}_i = R_{\text{Total}_i} + \frac{X_{\text{Total}} - X_{\text{Sat}_i}}{R_{\text{Total}_i}} \cdot \Delta x + \frac{Y_{\text{Total}} - Y_{\text{Sat}_i}}{R_{\text{Total}_i}} \cdot \Delta y + \frac{Z_{\text{Total}} - Z_{\text{Sat}_i}}{R_{\text{Total}_i}} \cdot \Delta z + c \cdot \Delta t_0 \quad (2)$$

Diese Berechnung wird für alle Satelliten angewandt und mehrmals pro Satellit mit der neuen Position durchlaufen, bis die Differenzen von  $x, y, z$  ausreichend klein sind.  $t_0$  ist die Abweichung der Empfängeruhr zur tatsächlichen Uhrzeit und kann mithilfe dieser Werte korrigiert werden.  $R_{\text{Total}}$  ist die jeweils gemessene Distanz und  $X, Y, Z_{\text{Total}}$  die Position dazu. Eine genauere Aufschlüsselung findet sich in u-blox, 2009, S. 81 Abschnitt 6.2.

## 2.2.5 Andere GNSS

### 2.2.5.1 GLONASS

Das russische GNSS ist seit wenigen Jahren ein Konkurrenzsystem zu GPS. Die Entwicklung startete bereits 1982. Die ersten Satelliten hatten oft Probleme und sind ausgefallen. In der heutigen Konstellation finden sich nur Satelliten wieder, die kein älteres Baujahr als 2005 haben. In der endgültigen Konstellation sollen sich 24 Satelliten befinden. Die meisten der heutigen aktiven Satelliten wurden zwischen 2006 und 2011 in ihre Umlaufbahn in 19 100 km Höhe geschossen. 2016 wurden zwei weitere Satelliten ergänzt. Es sind momentan 23 Satelliten aktiv.<sup>3</sup> Damit ist es soweit ausgebaut. Nur wenige Gebiete der Erde sind nicht zu 100% abgedeckt. Der aktuelle Status kann auf der Seite des [Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing](#) jederzeit nachgesehen werden.

### 2.2.5.2 BeiDou/Compass

Das chinesische BeiDou System, ein Regional Satellite Navigation System, das nur die Region um China abdeckt, wird nun nach und nach erweitert zu einem globalen System. Anfangs wurde es Compass genannt. Jetzt läuft es unter dem Namen BeiDou-2 und soll 2020 die gesamte Erde abdecken. Seit Ende 2011 ist das System für das Gebiet China operationsfähig. Im Mai 2015 wurde mit Russland ein Abkommen zur Kooperation unterzeichnet<sup>4</sup>. Dabei wird besonders Wert auf Kompatibilität und Interoperabilität gelegt.

Ähnlich zu dem regionalen BeiDou, hat Japan ab 2010 das Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) entwickelt. Dieses benutzt quasi-zentrische Satelliten, die sich über Japan und Australien bewegen. Es soll in den

<sup>3</sup> <https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>

<sup>4</sup> <http://www.beidou.gov.cn/>

nächsten Jahren weiter ausgebaut werden. Es ist vollständig kompatibel zu GPS und soll dessen Genauigkeit erhöhen und Multipath-Fehler eliminieren, die durch die hohen Gebäude und den Umstand, dass GPS versucht die Satelliten gleichmäßig über den ganzen Himmel zu verteilen, entstehen (Cabinet Office National Space Policy Secretariat, 2016).

### 2.2.5.3 Galileo

Ein weiteres GNSS, das sich gerade im Aufbau befindet, ist das europäische zivil betriebene Galileo. Es ist ein gemeinsames Projekt mit der Europäische Union (EU) und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA). Das vollständige System soll 30 Satelliten umfassen, die sich auf drei kreisförmigen Orbits in 23.222 km Höhe befinden. Es soll mehrere verschiedene Dienste anbieten, wobei der Open Service (OS) frei verfügbar sein wird und eine Genauigkeit von ca. 4 bis 15 m ohne Korrekturen erreichen soll. Dies wird durch neue Technologien in Bereich der Modulation erreicht und auch durch neue Frequenzbänder. Neben dem Open Service soll es noch einen kommerziellen Dienst geben, der eine höhere Datenrate und Genauigkeit liefern kann. Des Weiteren soll es auch einen Kommunikationskanal vom Empfänger zum Satelliten geben, der für den Search and Rescue (SAR) Service gedacht ist.

Bisher sind aber erst sechs voll-funktionsfähige Satelliten aktiv. Zwei weitere, die im Mai 2016 gestartet wurden, befinden sich in der Test- und Überprüfungsphase. Die ersten beiden voll-funktionsfähigen Satelliten (GSAT0201, GSAT0202) sind auf falschen Orbits unterwegs, senden aber seit Anfang August 2016 Navigationsnachrichten<sup>5</sup>. Insgesamt sind 13 funktionierende Satelliten im Orbit, wovon zwei Testsatelliten der ersten Generation sind. Ein weiterer Testsatellit ist momentan im Wartungszustand. Zum vierten Testsatellit besteht seit 2014 kein Kontakt mehr. Im September 2016 wurden vier weitere Satelliten nach Französisch-Guayana (Südamerika) transportiert (ESA, 2016). Sie sollen im November noch starten.

### 2.2.6 Genauigkeit

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung hängt von der Messgenauigkeit und von verschiedenen anderen Faktoren ab. Die Uhren der Satelliten müssen genau sein. Das Signal ist ca. 70 ms unterwegs. „Ein Fehler von nur 10 ns führt zu einem Positionsfehlern von drei Meter“ (u-blox, 2009, S. 90). Deshalb werden die Uhren genau von den Basisstationen überwacht und bei Bedarf korrigiert. Auch befinden sich schon in den GPS-Signalen Korrekturdaten. Die genaueren Uhrdaten (Clocks) stehen je nach Wahl der Genauigkeit und Intervalle vom IGS

<sup>5</sup> <https://www.gsc-europa.eu/notice-advisory-to-galileo-users-nagu-2016029>

zur Verfügung (Hauschild, 2010, S. 4 ff.). So ist es mit den originalen Satellitennachrichten (RAW-Daten) und den Korrekturdaten möglich, die Uhrdaten auf ca. 20 ps (Faktor 33 besser) Standardabweichung als Uhrenfehler und die Bahndaten auf bis zu 2.5 cm (Faktor 40 besser) Orbitgenauigkeit zu korrigieren (IGS, 2016). Die Orbitgenauigkeit der Satellitendaten schwankt im Normalfall um die 1 m.

Hinzu kommen noch Laufzeitfehler zwischen Satellit und Empfänger. Dazu zählen Multiwege-Effekte (Multipath-Errors), die Ionosphäre, die Troposphäre und die Antennen des Satelliten und der Empfänger.

Multipath-Errors sind besonders in Städten mit großen Gebäudeflächen ein Problem. Das Signal wird an diesen Flächen reflektiert, bevor es am Empfänger ankommt. Es legt damit mehr Distanz zurück, als sich eigentlich zwischen Satellit und Empfänger befindet. Hier können die neuen Modulationstechniken für die Frequenzen aus den neuesten Satellitengenerationen helfen (Diessongo, 2014).

Die Ionosphäre ist Teil der Atmosphäre, die die Erde in einer Höhe von 80 km bis 500 km umgibt und die ionisierte Gase und freie Elektronen enthält. Dabei ist der Effekt, der sich auf die Signale bei Tag auswirkt größer als bei Nacht. Dort geht die Ionisierung zurück (Bauer, 2003). Den Aufbau der Ionosphäre ist anschaulich in [Abbildung 3](#) dargestellt und deren Total Electron Content (TEC) kann man durch zwei Frequenzempfänger oder durch Korrekturdaten vom IGS bestimmt bzw. deren Einfluss modelliert werden. Seit Anfang des zivilen GNSS wurden vom IGS sogenannte Vertical Total Electron Content (VTEC) Karten der Erde bereitgestellt (Pajares u. a., 2008). Somit kann auch für Ein-Frequenz-Empfänger eine Hauptstörsquelle nahezu eliminiert werden, wenn diese Daten zur Verfügung stehen.

Die Antennen und die Troposphäre tragen ebenso zur Signalverzögerung bei. Meist können durch genaue Vermessung der Antenne und den aktuellen Wetterdaten, diese beiden Faktoren zuverlässig reduziert werden.

Ein weiterer Faktor ist die Satellitenkonstellation. Deren Qualität hängt stark von der Positionsbestimmung ab, angegeben in Dilution Of Precision (DOP). Für eine optimale Positionsbestimmung sollten die Satelliten gleichmäßig am Himmel verteilt sein. Eine optimale Höhenmessung erreicht man allerdings mit Satelliten, die sich direkt über einem Empfänger befinden. Hier ist bei mehrere Messungen der Satellit senkrecht über dem Empfänger. Das Signal nimmt damit die kürzeste Strecke zum Empfänger.

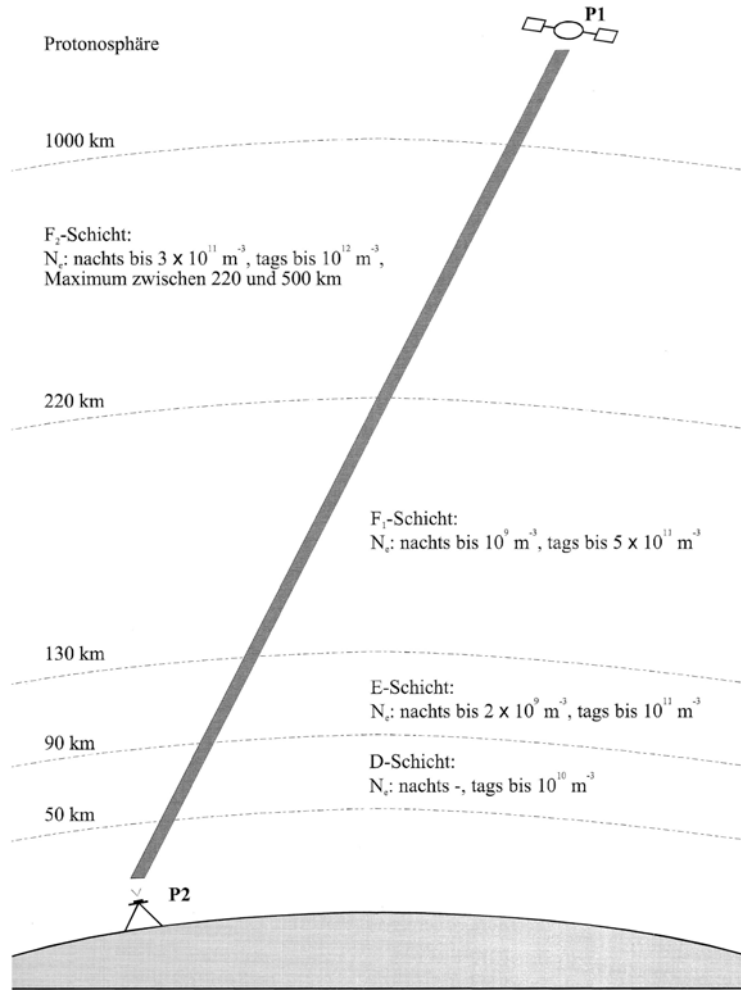


Abbildung 3: Schichten der Ionosphäre und dessen Elektronengehalt, Quelle: Bauer, 2003, S. 111

Die Qualität lässt sich aus dem Gleichungssystem zur Bestimmung der Position durch transponieren und invertieren ablesen (u-blox, 2009).

$$Pos = \begin{bmatrix} \frac{X_{User} - X_{Sat\_1}}{R_1} & \frac{Y_{User} - Y_{Sat\_1}}{R_1} & \frac{Z_{User} - Z_{Sat\_1}}{R_1} & 1 \\ \frac{X_{User} - X_{Sat\_2}}{R_2} & \frac{Y_{User} - Y_{Sat\_2}}{R_2} & \frac{Z_{User} - Z_{Sat\_2}}{R_2} & 1 \\ \frac{X_{User} - X_{Sat\_3}}{R_3} & \frac{Y_{User} - Y_{Sat\_3}}{R_3} & \frac{Z_{User} - Z_{Sat\_3}}{R_3} & 1 \\ \frac{X_{User} - X_{Sat\_4}}{R_4} & \frac{Y_{User} - Y_{Sat\_4}}{R_4} & \frac{Z_{User} - Z_{Sat\_4}}{R_4} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$D = \left[ \begin{bmatrix} Pos \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} Pos \end{bmatrix} \right]^{-1} \quad (4)$$

Tabelle 3: Positionsgenauigkeit ohne und mit DGPS/SBAS u-blox, 2009, S. 118

Fehlertyp	Fehler ohne DGPS/SBAS	Fehler mit DGPS/SBAS
Ephemeriden	1.5 m	0.1 m
Satelliten Uhren	1.5 m	0.1 m
Ionosphären Effekt	3.0 m	0.2 m
Troposphären Effekt	0.7 m	0.2 m
Multipath Fehler	1.0 m	1.4 m
Empfänger Effekt	0.5 m	0.5 m
Gesamt RMS Wert	4.0 m	1.2 m
Horizontaler Fehler ( $1\text{-}\sigma$ (68%))	6.0 m	1.8 m
Horizontaler Fehler ( $2\text{-}\sigma$ (95%))	12 m	3.6 m

RMS ist das Quadratisches Mittel, Horizontaler Fehler mit HDOP=1.3

Aus Gleichung 3 mit Gleichung 4 ergibt sich die DOP-Matrix. Aus der sich wiederum die einzelnen DOP-Werte ablesen lassen.

$$\text{DOP} = \begin{bmatrix} D_{11} & \cdots & & D_{14} \\ \vdots & D_{22} & & \vdots \\ & & D_{33} & \\ D_{41} & \cdots & & D_{44} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{GDOP} = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33} + D_{44}}$$

$$\text{PDOP} = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33}}$$

$$\text{HDOP} = \sqrt{D_{11} + D_{22}}$$

$$\text{VDOP} = \sqrt{D_{33}}$$

$$\text{TDOP} = \sqrt{D_{44}}$$

GDOP steht für Geometric-DOP und steht für alle Faktoren der Ortsbestimmung (3D und Zeit). Positional-DOP (PDOP) steht für die Positionsbestimmung im Raum (3D). Horizontal-DOP (HDOP) ist der Einfluss auf die 2D Position, d. h. wie genau Latitude und Longitude sind. VDOP steht für Vertical-DOP und damit den Faktor Höhe. TDOP beschreibt wie gut sich die Zeit heraus rechnen ließ.

Wie man in der Tabelle 3 sieht, geht der DOP-Wert proportional in die Fehler mit ein.

Die Formel lautet Fehler( $1\sigma$ ) =  $1 \cdot \text{GesamtRMS} \cdot \text{DOP}$ . Bei  $2\sigma$  entsprechend mit Faktor 2. In Abbildung 4 sieht man, wie sich eine

schlechte Satellitenkonstellation auf den Fehler der Positionsberechnung auswirkt. Es entsteht eine größere Fläche oder Gebiet, in der sich der Empfänger befinden kann. Dies passiert, wenn aus Sicht des Empfängers die Satelliten sich zu nahe beieinander befinden.

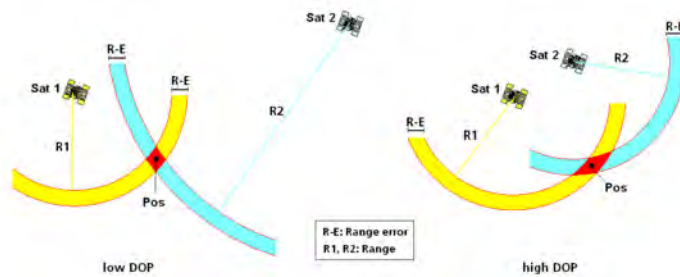


Abbildung 4: Effekt einer guten und schlechten Satellitenkonstellation

## 2.3 DIFFERENZIELLES GNSS

Der grundlegende Unterschied zwischen GNSS und DGNSS besteht in einem zusätzlichen Empfänger, der sich selbst nicht bewegt und als Referenzstation dient. Der bewegende Empfänger nennt sich **Rover**. Der Referenzempfänger wird als **Station** bezeichnet. Ab wann man den GNSS-Empfang als differenziell bezeichnen kann, ist nicht ganz klar. Oft wird Satellite-Based Augmentation Systems (kurz **SBAS**) als differenziell bezeichnet. Dies sind spezielle Satelliten die Korrekturdaten senden, welche über die selben Frequenzen wie bei den Ortungssatelliten gesendet werden. Damit können sie von allen Empfängern verarbeitet werden. Genaueres findet sich im Abschnitt **Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS)**. Manche sagen aber auch, dass es erst ab einer Pseudorange-Differenz ein differenzielles GNSS ist. In diesem Abschnitt gehe ich näher auf die verschiedenen Arten ein.

### 2.3.1 Theorie

Der Ansatz hierbei ist, dass beide Empfänger möglichst nahe beieinander sind und die gleichen Bedingungen vorherrschen. Der zweite Empfänger empfängt die gleichen Daten von den Satelliten, wie der erste Empfänger und kann so die Daten in gewisser Weise bewerten. Da ihm bekannt ist dass er sich nicht bewegt, kann er die Fehler in den Berechnungen finden. Diese Fehler kann er dem Rover mitteilen, sodass dieser sie in seiner Berechnung berücksichtigen kann. Bei einer Echtzeit-Verknüpfung der beiden Empfänger, können diese die Daten untereinander austauschen. Somit kann eine Fehlerkorrektur sofort erfolgen und eine korrigierte Position bestimmt werden. Diese Methode wird auch als Real Time Kinematic bezeichnet, kurz RTK.



### 2.3.1.1 Einfache Differenz

Die einfache Differenz kann man mit einer Vektorverschiebung gleichsetzen. Es wird zuerst die Distanz der aktuell berechneten Position zur eigentlichen Position der Station berechnet. Dadurch bekommt man die Richtung und die Entfernung, die von der eigentlichen Position abweicht. Dieser Vektor wird dann auf die Punkte des Rovers, die zur selben Zeit aufgezeichnet wurden, angewandt. Die [Abbildung 5](#) zeigt dies im zweidimensionalen Raum.

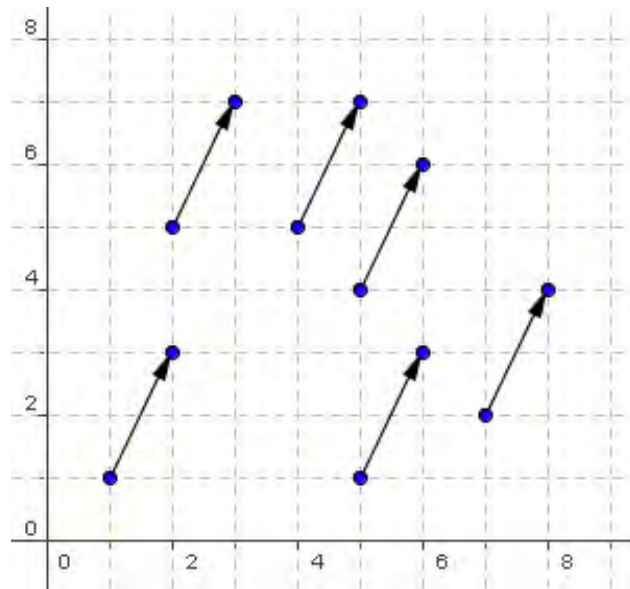


Abbildung 5: Anwendung der Vektorverschiebung auf die einzelnen Punkte

### 2.3.1.2 Differenz über einzelne Pseudorange

Bei einer Differenzbildung mit die einzelnen Pseudorange können verschiedenste Faktoren, die zur falschen Distanzmessung führen, reduziert werden. Mit dem Wissen, dass die Station sich nicht bewegt, kann diese den Laufzeitfehler für den Zeitpunkt berechnen. Dieser Fehler kann dann direkt beim Rover für den gleichen Zeitpunkt angewandt werden. Dabei sollten nur noch die Bahn- und Uhrenfehler des Satelliten und die Mess- und Uhrenfehler des Rovers die Positionsberechnung beeinflussen. Wichtig ist dabei, dass die Station einen guten Empfang hat und sich nahe bei dem Rover befindet. Dadurch herrschen bei beiden Empfängern sehr ähnliche Bedingungen.

### 2.3.1.3 Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS)

Satellite-Based Augmentation System wird mittels geostationäre Satelliten über bestimmten Regionen der Erde realisiert. In Europa ist es [EGNOS](#) und in Amerika ist es [WAAS](#).



Die Kontrollstationen der Systeme beobachten die GNSS-Signale und berechnen auf Grund von der aktuellen Situation (Wetter, Konstellation, Ionosphäre) Korrekturdaten, die sie dann an die geostationären Satelliten schicken. Diese Satelliten senden die Korrekturdaten an die Empfänger am Boden. Da die Systeme auf der L<sub>1</sub>-Frequenz, wie auch GPS, senden, können viele Systeme diese Daten empfangen und verarbeiten.

### 2.3.2 *Protokolle und Verbreitungswege*

Es gibt eine Vielzahl an Protokollen und Wegen mit denen man Korrekturdaten empfangen kann. Zum einen können diese mit **SBAS** über denselben Weg wie GNSS Signale empfangen werden. Zum anderen können über Radiowellen im **RTCM** Protokoll Korrekturdaten bzw. weitere Informationen zum Zustand der Satelliten übertragen werden. Kurze Zeit später wurde Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (**NTRIP**) entwickelt. Das ist sozusagen RTCM über IP Netze und damit weltweit verfügbar.

Mit dem Receiver Independent Exchange Format (**RINEX**) existiert ein Datei-Text-Format zum Austausch von GNSS-Informationen. Das Format ist unabhängig von Empfänger und dient heute in der Version 3.03 als Standard-Format. Es wurde an der Universität Bern entwickelt und ist mit den meisten GNSS Weiterverarbeitungsprogrammen, wie auch mit der dort entwickelten Software Bernese Software 5.2, lesbar. Die von mir verwendete RTKlib unterstützt ebenfalls diese Protokolle.

### 2.3.3 *Anbieter von hochpräzisen Echtzeitdaten*

Sowohl das **EGNOS** Netz der Referenzstationen der ESA (EGNOS Data Access System (**EDAS**)), als auch SAPOS (Vermessungsverwaltungen der Länder der BRD) liefern Echtzeitdaten ihrer Bodenempfangsstationen aus. Aber auch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (**BKG**) und das weltweit agierende IGS sammeln Beobachtungsdaten und stellen Korrekturen in verschiedenen Genauigkeiten und Geschwindigkeiten zur Verfügung. Für einige der Dienste muss man sich bei den Anbietern registrieren oder sogar bezahlen. Diese bieten dann ein niedrigeres Intervall der Daten an. Kostenlos und ohne Registrierung bekommt man vom IGS ein 5 oder 10 min Intervall. Die anderen Dienste können hier auch Intervalle von 1 s anbieten.

SAPOS und EDAS bietet diese Daten auch über Radiowellen an. Neuerdings auch über Digital Audio Broadcast (DAB)<sup>6</sup>. Dies kam besonders den Vermessungsstationen im ländlichen Raum vor einigen Jahren zu Gute. Heute bieten beide Anbieter die Daten in Echtzeit über das Internet an. Mittlerweile sind auch in ländlichen Gebieten

6 <https://www.gsa.europa.eu/egnos/edas/applications>

die Daten überall mit Mobilfunk empfangbar. Hier verwenden sie das etablierte Protokoll NTRIP. Die Daten werden aber auch zum Post-Processing im RINEX-Format bereitgestellt.

#### 2.4 WEITERE EMPFANGSMÖGLICHKEITEN UND LOKALISIERUNGS-ARTEN

Es gibt weitere Arten der Positionsbestimmung, die über die Möglichkeiten der oben genannten hinaus gehen. Hier wird kurz auf diese eingegangen.

##### 2.4.1 Trägerphasenmessung

Eine weitere Methode die Entfernung zu messen, ist die Messung der Trägerphase. Bei den späteren Vergleichen verwendet der Kinematic-Modus von RTKlib diese Methode, um noch genauere Entfernungsmessung durchzuführen.

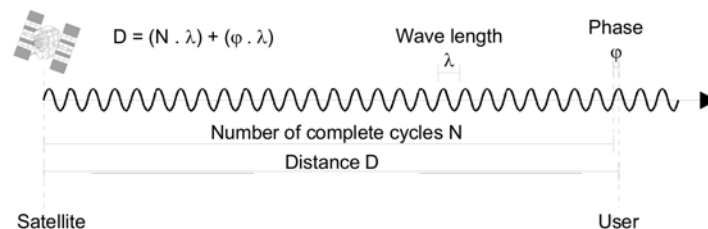


Abbildung 6: Prinzip der Trägerphasenmessung, Quelle: u-blox, 2009

Die [Abbildung 6](#) zeigt das Prinzip der Trägerphasenmessung. Die Frequenz der Trägerphase (bei L1 1 575.420 MHz) ist viel höher als die der Codephase (1 MHz). Deshalb ist eine genauere Terminierung, wann das Signal angekommen ist möglich. Es bleiben drei Unbekannte. Die genaue Ankunftszeit beim Empfänger, die genaue Startphase am Satellit und die Anzahl der Zyklen zwischen den beiden Antennen. Die Ankunftszeit beim Empfänger lässt sich durch die Verwendung mehrerer Satelliten auflösen. Der genaue Offset der Phase beim Satelliten durch mehrere Empfänger. Da die Anzahl der Zyklen ( $N$ ) nicht bekannt ist, entstehen hier Mehrdeutigkeiten. Diese Anzahl bestimmt mit der Wellenlänge des Signals die Distanz bis auf wenige Millimeter genau. Siehe dazu auch die Formel in der Grafik. Mit Hilfe der Codephasen lässt sich diese Unbekannte auf wenige Möglichkeiten einschränken. Dann heißt es probieren und finden durch Vergleich und Verschiebung des lokal generierten Phasensignals. Bauer verweist hier selbst auf Abidin<sup>7</sup>, Melbourne<sup>8</sup> und Wübbena<sup>9</sup> um das Mehrdeutigkeitsproblem zu lösen.

<sup>7</sup> Abidin, H.Z. (1993) On-the-fly resolution: formulation and results

<sup>8</sup> Melbourne, W.G. (1985) The Case for Ranging in GPS-Based Geodetic Systems

<sup>9</sup> Wübbena, G. (1988) GPS-Carrier Phases and Clock Modeling

### 2.4.2 A-GPS

Besonders im Mobilfunkbereich hat sich die Funktion Assistent-GPS(A-GPS) für den GPS-Empfang etabliert. Diese wurde für eine schnelle Ortung mittels GPS entwickelt. Typischerweise benötigt man für einen vollständigen GPS-Status 12,5 Minuten. Dies gilt aber nur unter der Bedingung, dass alle Informationen ohne Fehler beim Empfänger angekommen sind. Die benötigten Satelliten mit ihrer aktuellen Position hat man meist schon nach 1-3 Minuten. A-GPS hilft dem GPS-Empfänger, indem es die Daten der anderen Satelliten über einen anderen Weg bezieht. Meist ist dies heute das Mobilfunknetz. Dadurch werden schnellere Positionsbestimmungen möglich. Man spricht in der Fachsprache von einem Hot-Start.

### 2.4.3 WLAN und Mobilfunk Positionierung

Mittels Bluetooth Beacons und WLAN Netzwerken kann heute nach einmaliger Initialisierung eine zuverlässige Lokalisierung innerhalb von Gebäuden realisiert werden. (Museen, Einkaufszentren, usw.) Auch die Mobilfunkortung über Funkzellen und deren Überlappungen wird heute schon zur Lokalisierung eingesetzt. Die Genauigkeit der Positionierung hängt aber stark von der aufgestellten Anzahl und dem Ort der Geräte ab. Meist ist eine Positionierung nur in Städten mit vielen Funkzellen möglich. Trotzdem nutzt beispielsweise Google diese Ortung um besonders zwischen Hochhäusern noch eine Positionierung mit einer Genauigkeit von 30m zu erreichen. Hier hat das GNSS-Signal oftmals keine Chance den Empfänger direkt zu erreichen. Japan hat aus diesem Grund eigene Satelliten in den Orbit geschossen, die sich möglichst senkrecht über Japan bewegen.



Teil II

VERSUCHE



## VERSUCHE - UNTERSUCHUNGEN

---

Im folgenden Teil werden die durchgeführten Versuche zur Analyse des differenziellen GPS-Empfangs beschrieben.

### 3.1 VERSUCHSBESCHREIBUNG

Es wurden zwei Versuche durchgeführt. Bei jedem Versuch wurde ein PC zur Aufzeichnung der RAW-Daten verwendet. Daran wurde ein USB-GPS Empfänger angeschlossen und auf dem geschlossenen Notebook platziert. Direkt daneben wurde das Android-Gerät positioniert. Das bewegte Objekt (**Rover**) wurde dabei möglichst waagrecht vor dem Körper getragen. Das stationäre Objekt (**Station**) wurde am Boden positioniert. Der erste Versuch wurde unter möglichst optimalen Bedingungen durchgeführt. Es waren gute Wetterbedingungen und es wurde eine größere Fläche ohne Hindernisse in nächster Nähe gewählt. Der Versuch fand auf dem Sportplatz in der Universität Passau statt. Der zweite Versuch sollte mit optimalen Wetterbedingungen durchgeführt werden, jedoch mit der Einschränkung, dass der Rover sich um ein Gebäude bewegte. Dazu wurde das direkt an den Sportplatz angrenzende IT-Zentrum der Universität Passau gewählt. Des Weiteren wurde noch ein Test auf dem Sportplatz mit dem Android-Gerät in der Hosentasche der Testperson durchgeführt, um eine typische Platzierung des Gerätes nachzustellen. Für die Test wurden die optimalen Bedingungen für die Station gewählt, um die höchste Genauigkeit zu gewährleisten. Der Rover sollte einmal an optimalen und einmal an weniger guten Bedingungen messen.

Die wichtigste Frage, die es zu klären galt: Bringt die einfache Differenz eine Verbesserung der Position? Ziel war es ein paar repräsentative Teststrecken zu finden, an denen sich verschiedenste Teilaspekte der Positionsbestimmung zeigen. Es gibt beliebig viele weitere Testfälle, die man dafür hätte heranziehen können. Im **AUSBLICK** finden ein paar davon Erwähnung.

### 3.2 AUFBAU

Bei allen Versuchen war die Station mittig auf dem Sportplatz platziert. Es waren keine Gegenstände in direkter Nähe zur Station, sodass keine Gefahr einer Beeinflussung des Empfangs bestand. Die Station wurde 30 Minuten vor dem Versuch aktiviert, damit sie bis zum Beginn des Versuchs eine ausreichend genaue Mittelung der Position erreicht hat. Die Referenzlinien wurden aus den gemittelten

Endpunkten und der Position der Station zusammengesetzt. Sowohl die Endpunkte als auch die Station sind keinesfalls exakte ( $<10\text{cm}$ ) Punkte. Sie wurden mit den gleichen Geräten gemessen, die auch nachher im Versuch verwendet wurden. Die Strecken entsprechen also vielleicht nicht ganz den abgelaufenen Wegen. Durch das Tragen der Geräte vor dem Oberkörper und durch das Laufen der Testperson von Punkt zu Punkt, kommt es zu weiteren Abweichungen in der Größenordnung von 20 cm.

**VERSUCH 1** Beim ersten Versuch bewegte sich der Rover in einer T-Form über den Sportplatz, wobei die Station sich am Kreuzungspunkt der Geraden befand. Die Station war Start- und Endpunkt der Aufzeichnungen. Damit gibt es nach jeder Teilstrecke zu den Referenzpunkten einen wiederkehrenden Punkt, der direkt vergleichbar ist. Mit demselben Versuchsaufbau wurde noch ein weiterer Versuch durchgeführt, bei dem sich das Android-Gerät in der Hosentasche der Testperson befand.

**VERSUCH 2** Im nächsten Versuch wurde ein Rechteck abgelaufen. An der Rasenkante des Sportplatzes wurde eine Drehung um 90 Grad gemacht. Der weitere Eckpunkt auf dem Sportplatz war wieder die Station.

**VERSUCH 3** Einige Tage später wurde der dritte Versuch um das ITZ-Gebäude der Universität Passau durchgeführt. Hier wurden zwei Aufzeichnungen durchgeführt. Beim ersten Versuch traten jedoch Fehler auf. Die Geräte wurden zu heiß. Eine Korrektur war nicht möglich.

### 3.3 GERÄTE, SYSTEME, INFORMATIONQUELLEN

Als Messgeräte für die Android Applikation waren ein Lenovo TAB S8-50L und ein Google Nexus 6 im Einsatz. Diese wurden möglichst waagrecht zur Erdoberfläche ausgerichtet betrieben. Das Lenovo TAB wurde mit Android 5.0.1 betrieben, während das Nexus mit 6.0.1 betrieben wurde. Zwischen diesen beiden Versionen findet sich kein Unterschied in der API in Bezug auf das Android.Location Package, das als Schnittstelle zum GPS-Modul dient. Näheres zum Aufbau von Android wird im Abschnitt der Android Applikation erläutert. Weiter wurden zwei Notebooks mit der u-blox Software u-Center und den NaviLock NL-402U verwendet. Diese Empfänger kosteten jeweils ca. 40€, sind aber aktuell nicht mehr auf dem Markt erhältlich. In ihrer standardmäßigen Firmware sind sie stark in ihrer Funktionalität eingeschränkt und unterstützen keine Aussendung von RAW-Daten. Sie wurden deshalb mit einer alternativen Firmware genutzt, die diese Funktionalität bereitstellt.



### 3.4 SOFTWARE

#### 3.4.1 *u-blox u-Center*

Zur Aufzeichnung der Daten von den NaviLock Empfängern wurde die Software des Schweizer Chip-Hersteller u-blox AG u-Center in der Version 8.11 verwendet. Das proprietäre Dateiformat (.ubx) kann von der Software RTKlib weiterverarbeitet werden. Mit dem u-Center ist es möglich die verschiedenen Einstellungen (RAW-Daten, keine Filterung der Position) des Empfängers einzustellen. Auch kann man die Aufzeichnung in Echtzeit wieder abspielen lassen und so die verschiedenen Situationen beobachten.

#### 3.4.2 *Android Logger - BetterLocation*

Für das Sammeln der Daten wurde ein GPX-Logger geschrieben. Es gibt eine große Menge von GPX-Logger im Google Play Store. Der von mir geschriebene Android Logger zeichnet aber nicht nur die Position und die Zeit auf, sondern auch die zu diesem Zeitpunkt genutzten Satelliten. Die App startet einen Service, der im Hintergrund jede Sekunde die Position erfragt und den aktuellen GPS-Status speichert. Beides wird von der API über die Berechtigung `ACCESS_FINE_LOCATION` erlaubt. Wie viel Informationen jedoch über die Application Programming Interface (API) verfügbar sind, entscheidet größtenteils der Produzent, der die Schnittstelle zu Android (Hardware Abstraction Layer (HAL)) programmiert. Diese verbindet die Hardware-Treiber mit dem Framework. Was von der Hardware zur API weitergegeben wird, kann zwischen Produzent und Version stark variieren.

Das Lenovo TAB, wie auch das Nexus 6 unterstützen GLONASS. Zur Verfügung standen die beiden Geräte mit jeweils API 21 und API 23. Erst in der aktuellen Version 7.0(API 24), die am 22. August 2016 (Pakalski, 2016) veröffentlicht wurde, ist nativ die Unterstützung für mehrere GNSS implementiert (Google, 2016, Android API Location). Vorher mussten die Hersteller der Android Geräte GLONASS, QZSS oder SBAS selbst auf die GPS-API (seit API 3) anpassen. Dies führt dazu, dass die Positionen nicht nur vom GPS-System stammen, sondern aus einer Kombination aus verschiedenen GNSS. Seit API 5 gibt es zudem eine NMEA-Schnittstelle, über die sehr genaue Daten weitergegeben werden können. Es wäre möglich, so Almanac Daten oder DOP Informationen in Applikationen zur Positionsbestimmung mit einzubeziehen.

Es zeigte sich, dass über diese Schnittstelle das Lenovo TAB weitaus mehr Informationen über die anderen GNSS und diese auch öfter bereitstellte, als das Nexus 6 und ein ebenfalls in dieser Funktion getestetes Nexus 4. Da die mobilen Systeme bei einer normalen Positions-

Abfragerate von 1 s warm bis heiß werden und die Informationen stark variieren, wurde die NMEA Schnittstelle darüber hinaus nicht genutzt, um noch mehr zu berechnen.

Die Dateien werden in den Ordner *gpx* im Download-Verzeichnis des Geräte-Speichers geschrieben. Dieser muss systembedingt immer für das Android-System verfügbar sein und ist damit ein geeigneter Speicherort. Für die Aufzeichnung wird ein Service über die Oberfläche gestartet. Über die Oberfläche kann dieser auch gestoppt werden. Auch ist es möglich eine neue Datei anzulegen, damit kann man verschiedene Aufzeichnungen separieren. Gleichzeitig zur Positionsabfrage wird der GPS-Status abgerufen, in dem sich die aktuellen Informationen zu den für die Berechnung verwendeten Satelliten befinden. Die Daten werden im GPX-Format abgespeichert. Die Daten werden entweder nachdem der Service gestoppt wird, oder mit der Schaltfläche „Create new GPX File“ in eine Datei geschrieben. Die Oberfläche ist in [Abbildung 7](#) zu sehen. Der Dateiname setzt sich aus dem Startzeitpunkt der Aufzeichnung zusammen. Durch das Notieren der Uhrzeit, können einzelne Segmente leicht wiedererkannt werden, ohne dass man die Datei öffnen muss.

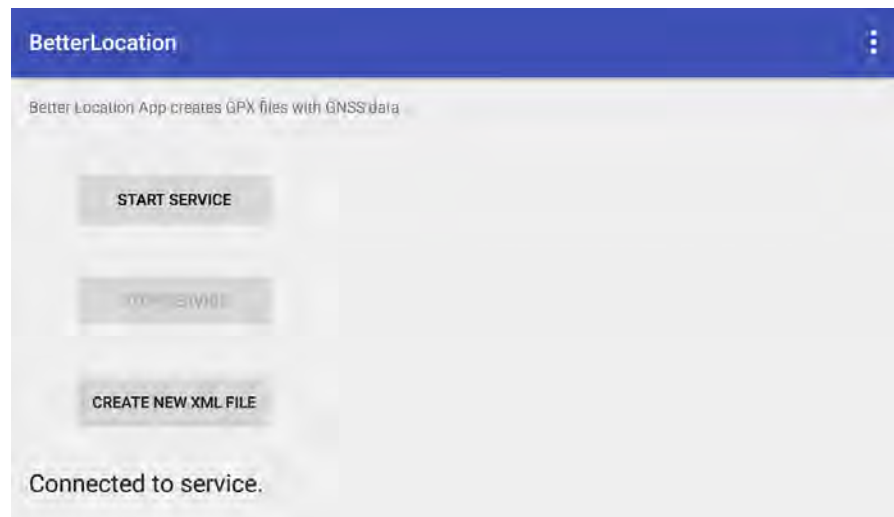


Abbildung 7: Android GPX Logger

### 3.4.3 RTKlib

Die RTKlib ist eine Open Source Software für die Umsetzung von Real Time Kinematic Anwendungen. Sie wird von Tomoji Takasu seit 2006 aktiv entwickelt. Die aktuelle Version 2.4.2 steht unter [rtklib.com](http://rtklib.com) zum Download zur Verfügung. Auf [GitHub](https://github.com) steht die Beta-Version und der Source Code zur Verfügung. Die Software besteht zum einen aus der Bibliothek mit den mathematischen Berechnungen. Zum anderen aus verschiedenen Desktop Programmen zur Nutzung von dieser Bibliothek bereitgestellten Funktionalität. Für das Post-Processing

der RAW-Daten aus den NaviLock Empfängern wurden die Programme RTKPost und RTKPlot verwendet. Den ganzen Funktionsumfang und mathematischen Modelle zu erklären würde den Umfang dieser Arbeit sprengen. Hier sei auf das Handbuch verwiesen (Takasu, 2013). Es wird nur auf die beiden verwendeten Programme und die verwendete Funktionalität eingegangen.

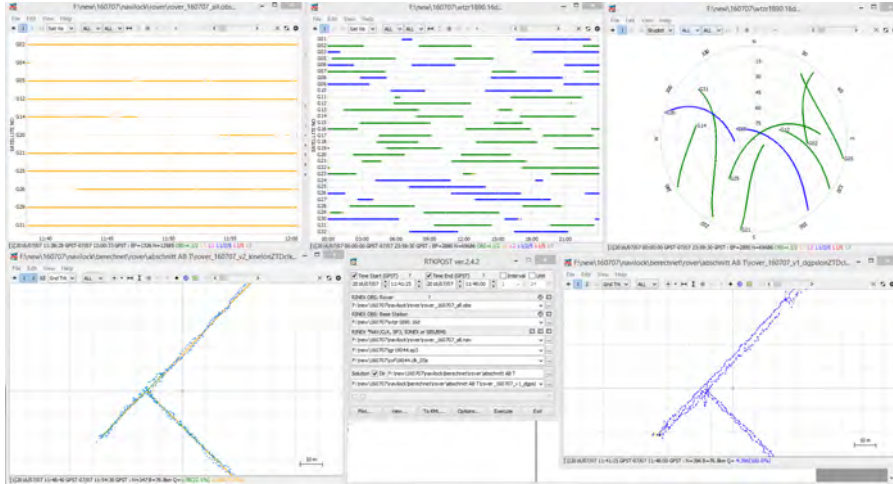


Abbildung 8: RTKlib mit mehreren Fenstern von (RTKPost und RTKPlot)

Für das weitere Verarbeiten mit der [Auswertungssoftware](#) wurden die Positionsdaten verbessert. Insgesamt entstanden so 3 verschiedene Daten für die Station und bis zu 6 verschiedene Daten des Rovers pro Strecke und Versuch.

Als Verbesserungsmodi wurden Kinematic und DGPS mit jeweils dem Sportplatz und Wettzell (WTZR) als Station genutzt. Außerdem wurde der auf Satelliten basierende Korrekturmodus, hier als *Single SBAS* bezeichnet, verwendet. Für RTKlib ist SBAS kein differenzielles System, sondern einfach eine weitere Korrekturquelle. Die DGPS und Single Modi arbeiten mit Codephasenmessungen, also den reinen Daten aus dem Signal, während der Kinematic Modus eine [Trägerphasenmessung](#) macht. Ansonsten verwenden DGPS und Kinematic präzise Uhrdaten und Korrekturen der Ionosphäre.

Das [BKG](#) hat in Wettzell im bayrischen Wald ein Observatorium. Unter vielen anderen Systeme befinden sich dort auch solche für GNSS. Wettzell wurde als weitere Station gewählt, da es ca. 75 km von Passau entfernt liegt und einen professionellen Empfänger und Antenne bietet.

In RTKPost wurden die erforderlichen Beobachtungsdaten in Form von Dateien angeben. In dem Programm RTKPlot konnte man sich die Daten ansehen ([Abbildung 8](#)). Die Ausgabe der korrigierten Positionen erfolgt in einem Textformat mit der Dateiendung *.pos*. In RTKPost wurden zusätzlich die Korrekturen zur Ionosphäre, Troposphäre, Uhrzeiten und Antennen angegeben. Diese endgültigen Kor-

rekturen wurden 18 Tage nach der Aufzeichnung vom IGS bereitgestellt und für den jeweiligen Tag des Test heruntergeladen.

#### 3.4.4 Auswertungssoftware

Die Software zum Auswerten der aufgezeichneten Daten wurde selbst in Java entwickelt. Die [Abbildung 9](#) zeigt die Oberfläche des Programms. Es sollten die Standortdaten eingelesen und danach analysiert werden. Dabei wurden die Satellitendaten, die mit dem eigenen Logger aufgezeichnet wurden, ausgewertet und Statistiken darüber erzeugt. Ebenso können auch die korrigierten Positionsdaten der RT-Klib gelesen werden und Statistiken dafür erzeugt werden.

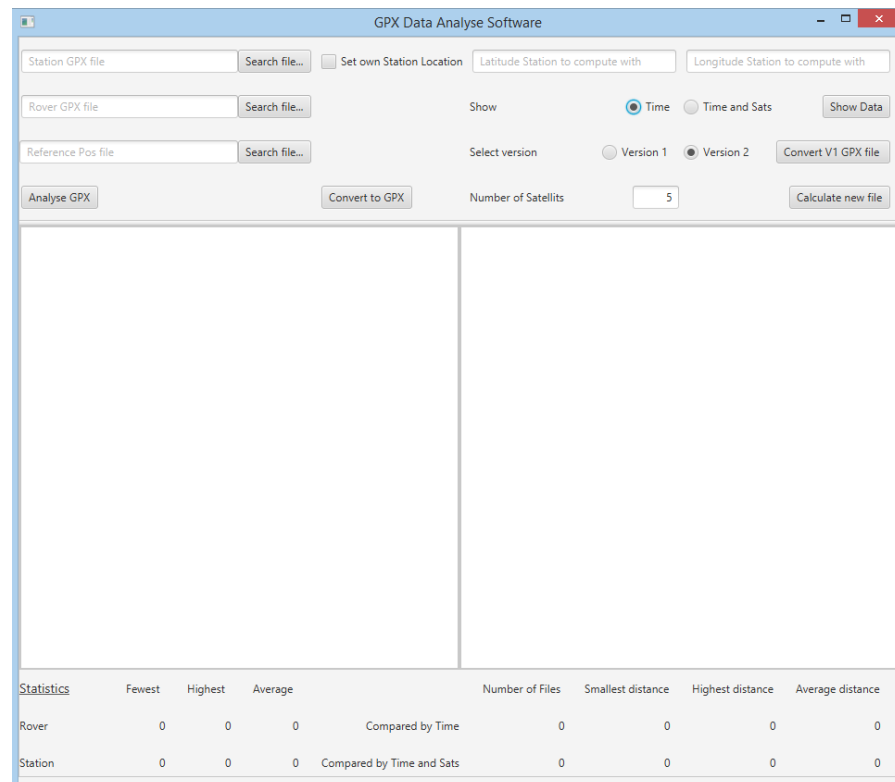


Abbildung 9: Auswertungssoftware

Erster Schritt war das Einlesen der Daten. Die aufgezeichneten Daten des Loggers lagen im XML Format vor. Die Daten aus RTKlib sind in einem einfachen Textformat gespeichert, das separat eingelesen wurde. Die Positionsinformationen mit Latitude, Longitude und Zeit wurden in Location Objekte gespeichert. Dies ist eine Klasse aus dem Android Framework, die schon viele nützliche Methoden mitliefert. Hier sei die Berechnung der Distanz zwischen zwei Punkten auf der Erdkugel zu nennen, die bei jeder Distanzberechnung im Programmablauf genutzt wird.

Im nächsten Schritt wurde die Station analysiert und von allen Punkten der Mittelwert berechnet. Dies wurde dann als die exakte

Position der Station angesehen. Zusätzlich konnte auch die Position der Station von der Oberfläche aus gesetzt werden. Dann wurde nicht die gemittelte Position verwendet.

Im dritten Schritt wurde nun die Distanz zu gemittelten oder vorgegebenen Position berechnet. Diese wurde im nächsten Schritt auf die Roverpositionen übertragen. Dies geschah aber nur, falls die Uhrzeiten im Ein-Sekunden-Intervall übereinstimmten. Wenn eine GPX-Datei gelesen wurde, wurde zusätzlich ein Satellitenvergleich gemacht. Hier wurde die Position nur korrigiert, wenn mindestens fünf gleiche Satelliten von Rover und Station empfangen wurden. Dieser Schwellwert lässt sich in der Oberfläche auch ändern. Bei der Auswertung wurde er aber auf den fünf Satelliten belassen.

Im vierten Teil wurden die korrigierten Daten ausgegeben. Einmal als Listen-Text in der Oberfläche und dann auch als GPX-Datei zum Lesen für alle anderen Programme. Die korrigierten Dateien werden in den Unterordnern *timeCorr* und *timeSatCorr* gespeichert. Zudem gibt es noch eine Schaltfläche, welche die angegebenen Dateien direkt ohne Korrektur in GPX-Dateien umwandelt. Diese werden im Unterordner *convertGpx* der eingelesenen Datei gespeichert. Die Statistiken kommen in den Unterordner *stats*. Dort werden sie in einem einfachen Textformat abgelegt.

### 3.4.5 Herausforderungen bei der Entwicklung der Programme

Die Einarbeitung in Android Programmierung ist relativ einfach, wenn man bereits mit Java gearbeitet hat. Es gibt jedoch einige Spezialfälle, wie beispielsweise in welchen Zustand die App wann und wie wechselt und ob man dann davor noch etwas tun möchte. Zum Beispiel das Abspeichern von Daten oder das Verbinden zu einem Hintergrund-Dienst (Service). Hier kann ich nur ein genaues Studium der Dokumentation empfehlen, sonst sucht man lange nach dem Fehler, wie z.B. den Grund warum man keine Verbindung mehr zum Service hat. Die Dokumentation ist zum Glück sehr ausführlich und gut strukturiert. Eine weitere Unannehmlichkeit war die Tatsache, dass ich zwischen dem ersten und dem zweiten Versuch die Android App weiterentwickelt habe. Dadurch hat sich auch die Struktur der Ausgabedatei geändert. Deshalb musste das Auswertungsprogramm mit zwei verschiedenen Versionen umgehen können. Hier muss der Benutzer die richtige Version auswählen, sonst tritt ein Fehler im Programm auf.

### 3.5 AUSWERTUNG

Im Nachfolgenden wird auf die Messergebnisse eingegangen. Um den Abstand zwischen den Messpunkten und der Referenzstrecke zu berechnen, wurde für jede Teilstrecke zwischen zwei Referenzpunkten der kürzeste senkrechte Abstand zu einer der Strecken genommen. Es wurde kein Vergleich von Uhrzeit und Abfolge der Punkte vorgenommen. Positionsschwankungen können damit zu einer anderen Referenzstrecke zugeordnet worden sein, als sie es eigentlich hätten sollen. Zur einfachen Berechnung für Mittelwert und Varianz wurden ebenfalls keine zeitlichen Faktoren miteinbezogen. Auch ob die Position links oder rechts der Strecke liegt wurde nicht berücksichtigt.

Die Referenzpunkte werden in den Abbildungen als rote Sterne gekennzeichnet. Für Android gibt es zwei verschiedene Korrekturmethode. Es wird jedes Mal eine einfache Differenz gebildet. Bei der ersten Methode wird nur die Zeit berücksichtigt, während die zweite Methode auch noch die Satelliten vergleicht. Nur wenn fünf Satelliten gleich sind, wird die Position korrigiert. Andernfalls fällt der Messpunkt weg. Das gleiche geschieht auch bei dem NaviLock-Empfänger im SBAS Modus. Nicht korrigierbare Messpunkte fallen weg. Der Single Broadcast gibt die aufgezeichneten Berechnungen zurück. DGPS und Kinematic versuchen mit Korrekturdaten und Referenzstation alle Fehler zu eliminieren.

Für die Abbildungen wurden die Kartendaten des OpenStreetMap Projekts verwendet. Diese stehen unter Copyright OpenStreetMap-Mitwirkende. Die Kartografie steht unter „Creative-Commons“-Lizenz „Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen“ 2.0 (CC BY-SA). Die Daten sind unter der Open-Database-Lizenz verfügbar. Hierzu sei auf [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org) verwiesen.

#### 3.5.1 Allgemein erfasste Daten

Aus den Aufzeichnungen gingen einige interessante Daten hervor. Diese sind in [Tabelle 4](#) aufgelistet. Darin kann man auch sehr gut erkennen, dass die Android-Geräte bei längerer Ortung an der selben Stelle, in diesem Fall die Position der Station, eine sehr gute Genauigkeit erreichen. Im Vergleich zu den NaviLock Geräten, bei denen noch das Signal korrigiert wurde, beträgt der Abstand maximal 2 m. Für ein nicht korrigiertes Signal ist das schon sehr gut. Die vom GPS-Gerät empfangene Anzahl der Satelliten waren ausreichend, um eine gute Ortung zu gewährleisten. Selbst bei der ITZ Strecke waren durchschnittlich acht Satelliten verfügbar. Allerdings fiel auch die Anzahl der Satelliten zwischen dem Gebäude auf nur noch einen Satelliten stark ab.

Tabelle 4: Daten aus den Aufzeichnungen

Quelle	Max Sats	$\emptyset$ Sats	Low Sats
Android Rover	14	8	1
Android Station	14	11	8

Stations	Latitude	Longitude
Android am 07.07	48,335384695	13,265367049
NaviLock am 07.07	48,335390221	13,265356957
Android am 20.07	48,33542679	13,265335227
NaviLock am 20.07	48,33540230	13,265338340

Tabelle 5: Android in T-Form

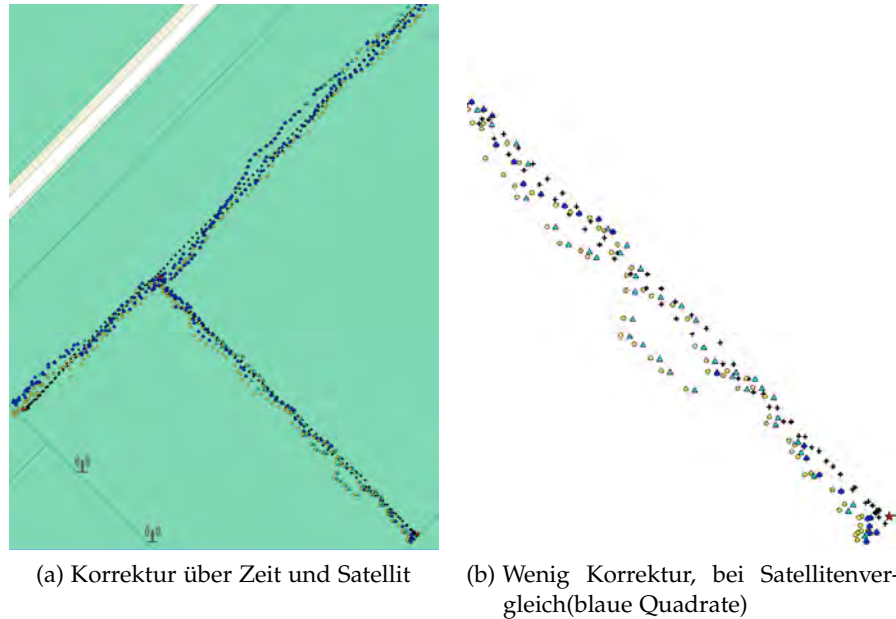
Methode	Mittelwert	Varianz
Rover	0,927	0,528
Rover korrigiert	0,855	0,541
Rover korr. Sats	0,853	0,528

(Alle Angaben in Meter zur Referenz)

### 3.5.2 Versuch 1

In diesem Versuch wurde der Sportplatz in einer T-Form abgelaufen. Die Karte zeigt, dass bei der Korrektur der Werte unter Berücksichtigung, dass die selben Satelliten zur Berechnung verwendet wurden, einige Teile der Strecke (siehe [Abbildung 10b](#)) nicht korrigiert wurden. In diesem Bereichen wurden nicht genug Satelliten empfangen, sodass es nicht für fünf gleiche Satelliten gereicht hat. Im Vergleich in [Abbildung 12](#) zeigt sich dann, wie die sich die Korrekturen auswirken. Man sieht klar, wie oft hintereinander die Position des Rovers mit der selben Richtung und Distanz korrigiert wurde. Ohne die Filter der Station, würde die Position sich öfters ändern. Das kann man an den RAW-Daten des NaviLock-Empfängers sehen (*Single Broadcast*). Die Korrektur ist mal mehr, mal weniger gut. Dies belegt auch die [Tabelle 5](#) mit den Werten von Mittelwert und Varianz. Die Werte unterscheiden sich nur im einstelligen Zentimeter-Bereich.



Abbildung 10: Android Wegpunkte in T-Form <sup>1</sup>

Als nächstes werden die NaviLock Aufzeichnungen näher betrachtet. Die Strecke wurde zur selben Zeit mit dem Android-Gerät (siehe oben) abgelaufen. Was hier besonders auffällt, ist der Unterschied zu *Single SBAS* und *Single SBAS Station* (siehe [Tabelle 6](#)). Dieser resultiert aus der Tatsache, dass RTKlib Positionen, zu denen keine SBAS Informationen vorliegen, nicht verbessert. Ähnlich zu der Android Methode mit den Satellitenkorrekturen. Diese Punkte fallen einfach aus der Korrektur der Strecke raus. So hat die normale Aufzeichnung 349 Messpunkte, während die korrigierte SBAS Strecke nur 296 hat. *Single SBAS Station* verwendet die SBAS-Aufzeichnungen der Station und schafft es damit 329 Punkte zu korrigieren. Bei den *DGPS* und den *Kinematic* Modi fielen nur zwei Datenpunkte weg. Insgesamt lässt sich sagen, dass sich mit den NaviLock RAW-Daten und den Korrekturen bis auf 40 cm genaue Strecken, ablaufen lassen. Wobei man hier immer erwähnen sollte, dass die Referenzstrecke nicht genau vermessen wurde. Weiter oben im Abschnitt [Aufbau](#) wurden dazu weitere Details genannt. An der Varianz kann man aber ablesen, wie gleichmäßig die Durchführung war. Im *Kinematic* Modus betrug der Abstand zur Referenz nicht mehr als 50 cm. Dies ist für die gesamte Strecke ein sehr geringer Wert. Im Vergleich zum *Single SBAS* Modus erreicht der *Kinematic* Modus eine sehr gute Verbesserung (siehe [Abbildung 11](#)).



Tabelle 6: NaviLock Werte in T-Form mit vers. Auswertungsvarianten

Methode	Mittelwert	Varianz
Single (Broadcast)	0,771	0,544
Single (SBAS)	0,904	0,419
Single (SBAS Station)	0,779	0,382
DGPS	0,811	0,36
DGPS (mit WTZR)	0,552	0,166
Kinematic	0,405	0,065
Kinematic (mit WTZR)	0,389	0,057

(Alle Angaben in Meter zur Referenz)

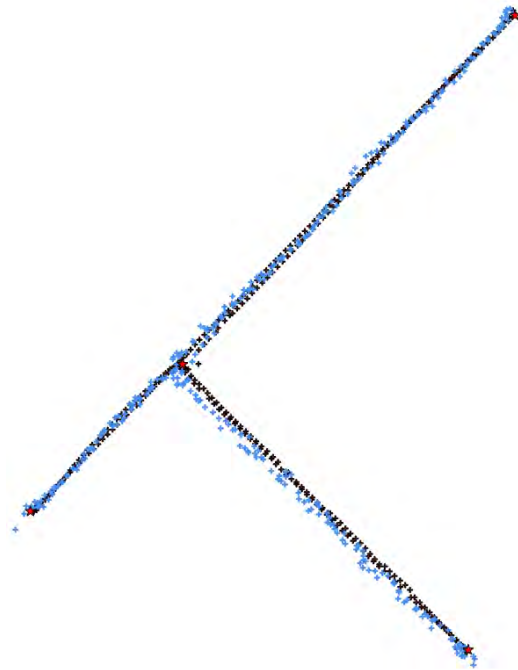
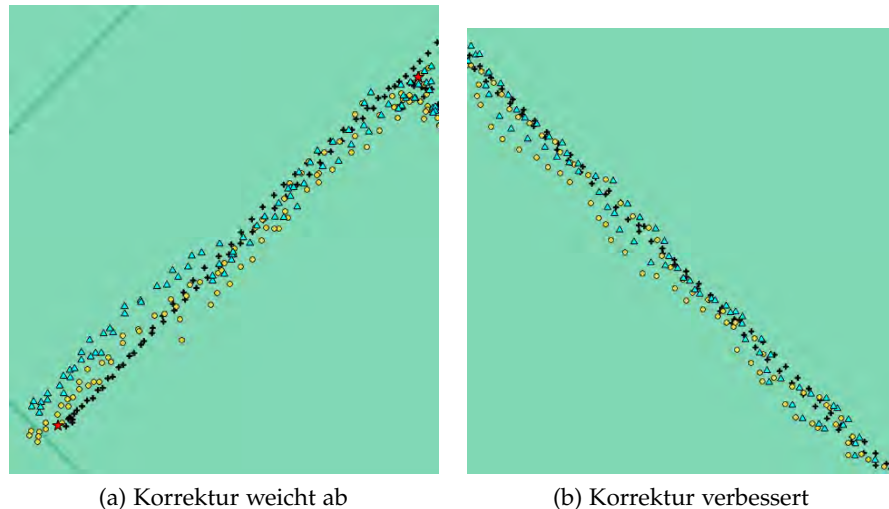


Abbildung 11: NaviLock Wegpunkte in T-Form - *Single SBAS Station* (blaue Kreuze), *Kinematic WTZR* (schwarze Kreuze)

Tabelle 7: Android Werte in T-Form bei dem sich das Gerät in der Hosentasche befand

Method	Mittelwert	Varianz
Rover	2,148	5,471
Rover korrigiert	2,637	7,683
Rover korr. Sats	2,325	5,960

(Alle Angaben in Meter zur Referenz)

Abbildung 12: Vergleich zwischen Android (gelbe Kreise), Android Korrigiert (blaue Dreiecke) und NaviLock (schwarzes Plus)<sup>1</sup>

Bei einem weiteren Versuch wurde das Android-Gerät in der Hosentasche platziert. Das Ergebnis ist merklich schlechter. Zum einen ist das Gerät näher am Körper, weshalb der Empfang der Satelliten stärker abgeschirmt wird. Zum anderen ist das Gerät ständig in Bewegung. Der Beschleunigungssensor schlägt durch die Beinbewegung in mehrere Richtungen aus. Eine Filterung der Positionsangaben, wie sie vermutet wird, ist über diesen Beschleunigungssensor nicht mehr möglich. Es wird nur die GPS-Berechnung weiter gegeben. Hier bringt die Korrektur absolut keine Verbesserung (nicht als Abbildung). Richtung dem Fluss In (rechts unten, in [Abbildung 13](#)) wird die Strecke sogar um einige Meter weg von der Referenz korrigiert. Die Berechnung mit den Satelliten macht genau in diesem Bereich keine Korrekturen, d. h. auch keine Fehler, weshalb sich die Werte in [Tabelle 7](#) in diesem Korrekturmodus so verbessern. Insgesamt ist die unkorrigierte Aufzeichnung in jedem Fall besser. Sie weicht aber stark von der NaviLock Topstrecke *Kinematic WTZR* ab.

Tabelle 8: Android Strecke als Rechteck

Methode	Mittelwert	Varianz
Rover	1,636	0,956
Rover korrigiert	1,817	1,004
Rover korr. Sats	1,687	0,883

(Alle Angaben in Meter zur Referenz)

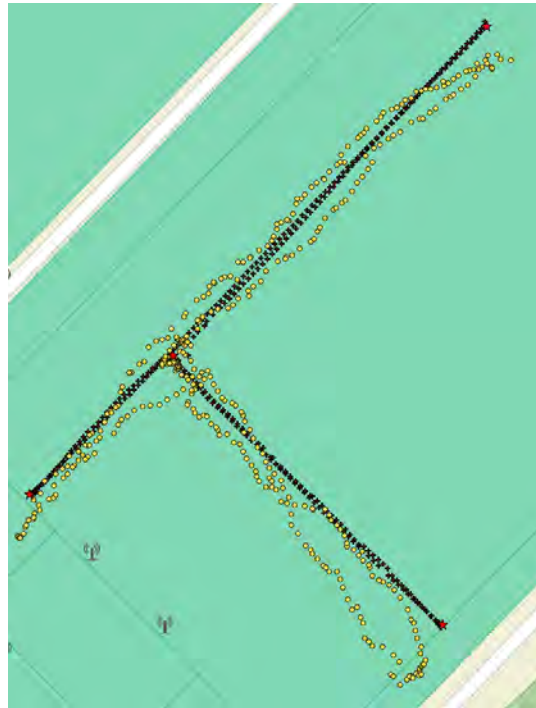


Abbildung 13: Android Wegpunkte in T-Form (Hosentasche) im Vergleich mit NaviLock *Kinematic* WTZR<sup>1</sup>

### 3.5.3 Versuch 2

Hier wurde ein Rechteck entlang der Rasenkante des Sportplatz abgelaufen. Der Eckpunkt auf dem Feld war die Station. Die einfache Differenz bringt auch hier keine Verbesserung. Die Methode mit dem Vergleich über die Satelliten lässt wiederholt große Teile der Strecke aus. Die [Abbildung 14](#) zeigt den Unterschied zur korrigierten NaviLock *Kinematic* Strecke. Diese Genauigkeit des NaviLock Empfängers erreicht das Android Gerät bei weitem nicht.



Abbildung 14: Android Wegpunkte als Rechteck entlang der Rasenkante im Vergleich mit NaviLock *Kinematic* WTZR



Abbildung 15: NaviLock *Single Broadcast* Aufzeichnungen im Vergleich mit *Kinematic* WTZR (schwarzes Plus)<sup>1</sup>

Die NaviLock Resultate sind wie auch schon vorher bei der T-Strecke sehr gut. Lediglich der DGPS mit der Sportplatz Station fällt ein wenig auf. Hier sind erhöhte Schwankungen zu verzeichnen. Wenn man die eigene Station mit der aus Wettzell ersetzt, verbessert sich das Ergebnis deutlich (siehe [Tabelle 9](#)). In [Abbildung 15](#) kann man die deutliche Varianz der unkorrigierten *Single Broadcast* Messpunkte im Vergleich mit den *Kinematic* Modus erkennen. Trotzdem sind die Aufzeichnungen im *Single Broadcast* besser als die des unkorrigierten Android-Systems (Vergleich [Abbildung 14](#) mit [Abbildung 15](#)).

Tabelle 9: NaviLock Werte als Rechteck

Methode	Mittelwert	Varianz
Single (Broadcast)	0,968	0,643
Single (SBAS)	0,942	0,664
DGPS	1,054	0,596
DGPS (mit WTZR)	0,737	0,324
Kinematic	0,785	0,282
Kinematic (mit WTZR)	0,748	0,260

(Alle Angaben in Meter zur Referenz)

Tabelle 10: Android Strecke um das ITZ Gebäude

Methode	Mittelwert	Varianz
Rover	1,636	0,956
Rover korrigiert	1,817	1,004
Rover korr. Sats	1,687	0,883

(Alle Angaben in Meter zur Referenz)

#### 3.5.4 Versuch 3

Der letzte Versuch war zugleich der Spannendste. Hier galt es bei schlechten Ortsbedingungen trotzdem eine gute Ortung zu erreichen. Teilweise waren Streckenabschnitte unter dem Gebäude und damit keine oder zu wenig Satelliten für eine Ortung verfügbar. Das Android System hat hier trotzdem gut erkennbar das Gebäude abgebildet ([Abbildung 17a](#)). Was man von den NaviLock Empfänger nicht behaupten kann. Zumindest visuell nicht (siehe [Abbildung 17b](#)). Die Vermutung ist, dass das Android Gerät bei schlechtem Empfang anfängt mit seinen Filtern zu optimieren so lange dies möglich ist. Damit bleiben die Positionen fortlaufend und springen nicht, wie in der unkorrigierten Version des NaviLock Empfänger herum.

Die nähere Betrachtung belegt, dass die Android Strecke sich immer mehr innerhalb des Gebäudes befindet. Die Korrektur ([Abbildung 16](#)) hilft, wie auch auf dem Sportplatz, nur bedingt. In der Abbildung sind die Korrekturdaten als blaue Kreise gekennzeichnet. Die Ecke im unteren Bildrand wird deutlich verbessert. An anderen Stellen ist dies jedoch nicht mehr der Fall. Rechts im Bild bewegen sich die Korrekturen immer mehr in das Gebäude hinein anstatt hinaus. Auch wird der Start (am linken Bildrand) sehr weit nach Norden verschoben (blaue Kreise über dem P-Zeichen), weshalb die korrigierten Werte in der [Tabelle 10](#) sich überhaupt nicht verbessern.



Abbildung 16: Android Wegpunkte (Gelb) um das ITZ Gebäude im Vergleich mit den korrigierten Punkten (Blau)<sup>1</sup>

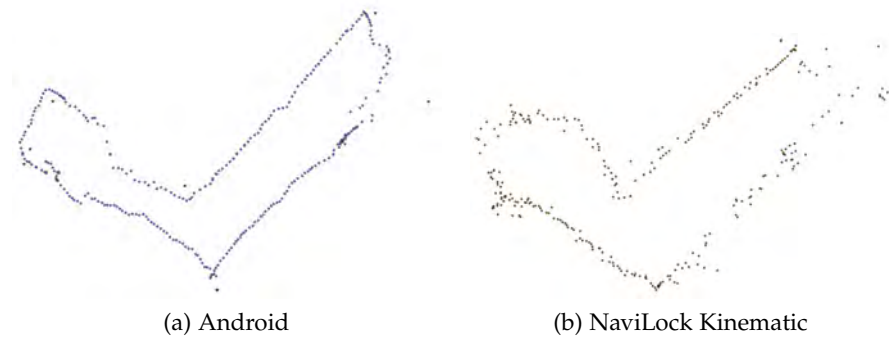


Abbildung 17: Android Wegpunkte um das ITZ Gebäude im Vergleich mit NaviLock Kinematic

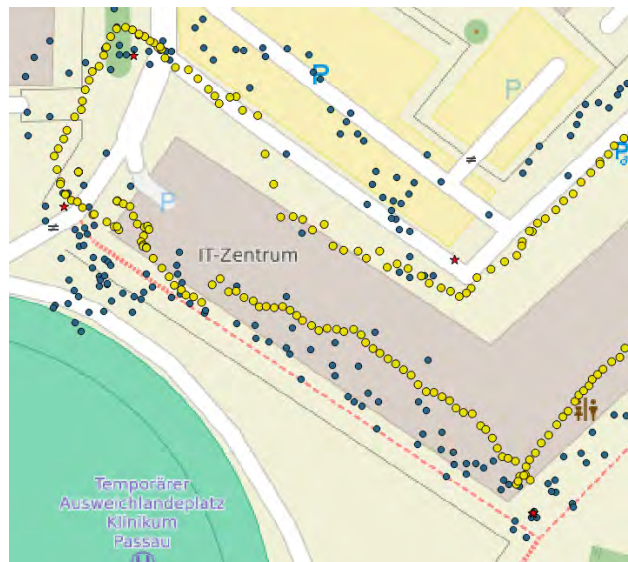


Abbildung 18: Android (Gelb) vs. Single Broadcast (Blau)<sup>1</sup>

Tabelle 11: NaviLock Werte um das ITZ Gebäude

Methoden	Mittelwert	Varianz
Single (Broadcast)	2,889	6,257
Single (SBAS)	2,261	4,793
Single (SBAS Station)	2,409	4,752
DGPS	2,927	7,061
DGPS (mit WTZR)	2,612	6,633
Kinematic	2,438	6,636
Kinematic (mit WTZR)	2,315	6,377

(Alle Angaben in Meter zur Referenz)

Beim NaviLock erhöhen sich die Messwerte deutlich im Vergleich zu den vorherigen Versuchen. In [Tabelle 11](#) zeigen alle Auswertungsmethoden eine hohe Varianz. Die Methoden *Single SBAS* reduzieren stark die Anzahl der verbesserten Punkte von 314 auf 83 oder auf 195, bei der Methode *Single SBAS Station*. Dies führt zu einem besseren Mittelwert und einer geringeren Varianz, aber insgesamt zu keinem guten Korrekturergebnis. DGPS und Kinematic korrigierten beide 294 Messpunkte.

In [Abbildung 19](#) erkennt man die Streuung der Punkte gut. Sie sind im Vergleich zu den Android-Messpunkten in [Abbildung 18](#) (in Gelb) ohne erkennbare Struktur. Den halben Meter Unterschied zwischen *Single Broadcast* und *Kinematic WTZR*, kann man nicht sofort in [Abbildung 20](#) sehen. Fast alle größeren Ausreißer wurden zum Gebäude hin korrigiert.

NaviLock und Android hatten große Probleme zwischen den Gebäudeteilen des ITZs. Hier häuften sich die Messpunkte ungewöhnlich, als der Empfang sich stark verschlechterte. Zu sehen ist dies in fast allen Abbildungen leicht rechts auf halber Höhe.





Abbildung 19: NaviLock *Single Broadcast* Wegpunkte um das ITZ Gebäude<sup>1</sup>



Abbildung 20: NaviLock *Single Broadcast* (gelbes Dreieck) vs. *Kinematic WTZR* (lila Kreis)<sup>1</sup>



#### 4.1 HARDWARE

Natürlich verbessern sich die Empfänger stetig weiter. Die neuen Smartphones können mehr als nur ein GNSS empfangen. Auch die Outdoor-Geräte (bspw. von Garmin) bekommen hardwareseitig die Möglichkeit mehr als nur die seit vielen Jahren etablierten Systeme zu unterstützen. Auch BeiDou und Galileo werden zusehends unterstützt<sup>12</sup>, obwohl diese sich noch im Aufbau befinden.

Die neuen externen GPS-Geräte haben bessere Antennen, sind leistungsfähiger in der Anzahl der zu verarbeitenden Signale und empfangen ebenfalls mehr GNSS. Beispielsweise das aktuelle Gerät von NaviLock, das NL-8012U. Im Vergleich zu dem verwendeten Gerät kann dieses 72 anstatt 50 Signale von Satelliten gleichzeitig empfangen, hat eine höhere Update-Rate und unterstützt GLONASS und BeiDou. Eine extra Antenne kann die Signalqualität maßgeblich beeinflussen und kostet weniger im Vergleich zu Profiempfangsgeräten.

Mit der ständigen Erneuerung der GNSS oder der Ergänzung und Zusammenarbeit der Systeme untereinander, wie dies QZSS mit dem GPS macht, werden auch die GNSS-Geräte umfassender und genauer. Damit lässt sich allgemein sagen, dass die Signalqualität mit neueren Geräten und in Zukunft steigen sollte.

#### 4.2 TESTS

Tests mit neueren Empfängern könnten neue Erkenntnisse zur Genauigkeit liefern. Des Weiteren könnten Tests von verschiedenen Geräteherstellern Genauigkeitsunterschiede zwischen den Geräten aufzeigen. Ein Test könnte Highend-Smartphones mit billigeren Geräten vergleichen und dazu ein Ranking aufstellen, wie es die größeren Mobilfunk-Magazine mit Akku- und Empfangsqualität schon länger machen. Ebenfalls könnten die verschiedenen GNSS mit neuen Geräten auch untereinander verglichen werden.

Testszenerarien gibt es beliebig viele. Ziel war es ein paar repräsentative Teststrecken zu finden, an denen sich verschiedenste Teilaspekte der Positionsbestimmung zeigen. Abseits der gewählten Szenarien, gibt es zudem interessante Erweiterungen, die den Umfang dieser Arbeit hätten beliebig vergrößern können. Beispielsweise könnte eine Teststrecke durch den Wald Ergebnisse für die Genauigkeit

---

<sup>1</sup> Qualcomm, 2016.

<sup>2</sup> <https://www.bq.com/en/aquaris-x5plus>

beim Wandern oder Joggen liefern. Die Geschwindigkeit kann ebenfalls beliebig verändert werden. Zusätzlich könnte man sich zum Beispiel Armbanduhren ansehen, die einen GNSS-Empfänger besitzen und untersuchen, wie diese sich gegen die Smartphones oder andere GNSS-Empfänger schlagen. Die Teststrecken könnte man nach Häufigkeit der Anwendungsszenarien aussuchen, falls man Informationen über solche Häufigkeiten besitzt.

Ebenfalls kann man untersuchen, welche Position des Gerätes für den Nutzer die beste Genauigkeit liefert. Typischerweise trägt man seinen GNSS-Empfänger am Arm oder in der Hosentasche als vor dem Oberkörper. Hier hat man im Versuchstest schon gesehen, dass die Hosentasche keine so guten Ergebnisse liefert wie das Tragen vor dem Oberkörper.

Anwendungsszenarien gibt es also genügend. Die Abschlussarbeiten bringen immer wieder neue Aspekte der Positionsoptimierung hervor, trotz der seit 1995 existierenden Technologie.

### 4.3 SOFTWARE

In der neuen Android Version 7 (API 24) wird erstmals das `Android.Location Package` seit API 3 grundlegend geändert, sodass alle GNSS separat angesprochen werden können.

Durch die rasante Verbreitung von mobilem Internetzugängen, finden Korrekturdaten ihren Weg schneller zu den mobilen Endgeräten. Mit zunehmender Rechenleistung ist nicht nur Post-Processing auf dem Smartphone möglich, sondern auch Real Time-Processing Anwendungen. Somit steht die korrigierte Position schon beim Aufzeichnen am Rover zur Verfügung. Ein Problem stellt die Android API dar, die noch keine RAW-Daten zurückliefert. Professionelle Vermessungsgeräte sprechen ihre verbauten Chips direkt an und verwenden gleichzeitig das Android System für die leichte Erweiterung um Applikationen.

Mit der Portierung der RTKlib Software auf Android, können auch über Bluetooth externe GNSS-Empfänger an Tablet oder am Smartphone betrieben werden und gleichzeitig die Korrekturdaten über das mobile Internet des Gerätes beziehen. Hier müssten Tests zeigen, wie gut diese schon existente Lösung funktioniert.

Es gibt, wie in dieser Arbeit gezeigt, vielfältige Erweiterungen der Tests durch andere Hardware, andere Szenarien oder neuere Software, sodass man in diesen Bereichen weitere Nachforschungen anstellen könnte.

## FAZIT

Mit der Lokalisierung über Assistent-GPS ist es auch bei schlechtem Empfang möglich, die Position schnell zu ermitteln. So finden die Android Geräte schnell ihre Position. Für Aufzeichnungen als Aktivitätstracker eignen sich die hier getesteten Android-Systeme gut. Besonders auf freien Flächen ohne große Störfaktoren, wie Bäume oder Gebäude, liefern sie zuverlässige Ergebnisse ohne Korrekturaufwand, besonders im ruhenden Modus.

Eine einfache Differenzbildung nur mittels Android Geräten und aktivierter Filterung bringt wenig bis gar nichts. Sehr oft ändert sich die Position der Station über mehrere Sekunden bis Minuten überhaupt nicht. Dies führt nur zu einem Verschieben der Rover Wegpunkte über weite Streckenintervalle in die selbe Richtung und Distanz. Was meist nicht den aktuellen Fehler widerspiegelt. Schade ist hier, dass nicht nur bei schlechtem Empfang gefiltert und/oder ein Beschleunigungssensor hinzugezogen wird und dass sich diese Filterung nicht abschalten lässt. Nur eine Filterung lässt die relativ gleichmäßigen Positionen erklären. Was aber nicht heißt, dass die Positionen nicht der Referenzstrecke nahe kamen. Vielmehr war es oft bei schlechtem Empfang visuell näher am eigentlichen Ziel bzw. in seiner geometrischen Form nicht schlechter, als die RAW-Empfänger von NaviLock. Man konnte die Strecke ITZ bei den Android-Geräten besser erkennen. Genauer an der Referenz waren trotzdem noch die RAW-Empfänger.

Das Beispiel der RAW-Empfänger zeigt aber, dass auch in nicht vorher initial lokalisierten Gebieten gute Verbesserungen mittels Korrekturdaten zu einem geringen Preis möglich sind. Gebäude oder hohe Bäume lassen jedoch den Mittelwert und die Varianz zu der Referenzstrecke stark ansteigen, wie man an der Strecke ITZ sehen kann. Bei den anderen Strecken auf freier Fläche sind aber Positionsbestimmungen entstanden, die laut Karte sehr nahe an denen der tatsächlichen abgelaufenen Wege herankommen, wenn nicht sogar diese exakt wiedergeben.

Besonders die vielen Arten der Verbesserungen und die verschiedenen Quellen und Qualitäten der Korrekturdaten, lassen die Kombinationsmöglichkeiten schnell ansteigen. Die DGPS Methode korrigiert für eine Codephasenmessung erstaunlich gut an die Frequenzmessung im Kinematic-Modus heran. Bei beiden Methoden wurden präzise Uhrdaten, im Intervall von fünf Sekunden, und Ionosphäre-Korrekturen verwendet.

Es lässt sich also sagen, dass sich mit differentiellen GNSS und RAW-Daten gute Ergebnisse erreichen lassen. Dazu ist nicht einmal eine eigene Referenzstation in der Nähe nötig, falls man auf einen der Korrekturdienste zugreifen kann.

Teil III

ANHANG



## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

---

Abbildung 1	Frequenzbänder des GPS Systems, Quelle: ublox, 2009 . . . . .	8
Abbildung 2	Genutzte Frequenzbänder der verschiedenen GNSS, Quelle: qzss.go.jp . . . . .	8
Abbildung 3	Schichten der Ionosphäre und dessen Elektro- nengehalt, Quelle: Bauer, 2003, S. 111 . . . . .	15
Abbildung 4	Effekt einer guten und schlechten Satelliten- konstellation . . . . .	17
Abbildung 5	Anwendung der Vektorverschiebung auf die einzelnen Punkte, Quelle: mathe-lexikon.at . . .	18
Abbildung 6	Prinzip der Trägerphasenmessung, Quelle: u- blox, 2009 . . . . .	20
Abbildung 7	Android GPX Logger . . . . .	28
Abbildung 8	RTKlib mit mehreren Fenstern von (RTKPost und RTKPlot) . . . . .	29
Abbildung 9	Auswertungssoftware . . . . .	30
Abbildung 10	Android Wegpunkte in T-Form <sup>1</sup> . . . . .	34
Abbildung 11	NaviLock Wegpunkte in T-Form - <i>Single SBAS</i> <i>Station</i> (blaue Kreuze), <i>Kinematic WTZR</i> (schwar- ze Kreuze) . . . . .	35
Abbildung 12	Vergleich zwischen Android (gelbe Kreise), An- droid Korrigiert (blaue Dreiecke) und Navi- Lock (schwarzes Plus) <sup>1</sup> . . . . .	36
Abbildung 13	Android Wegpunkte in T-Form (Hosentasche) im Vergleich mit NaviLock <i>Kinematic WTZR</i> <sup>1</sup> . .	37
Abbildung 14	Android Wegpunkte als Rechteck entlang der Rasenkante im Vergleich mit NaviLock <i>Kine- matic WTZR</i> . . . . .	38
Abbildung 15	NaviLock <i>Single Broadcast</i> Aufzeichnungen im Vergleich mit <i>Kinematic WTZR</i> (schwarzes Plus) <sup>1</sup> 38	
Abbildung 16	Android Wegpunkte (Gelb) um das ITZ Ge- bäude im Vergleich mit den korrigierten Punk- ten (Blau) <sup>1</sup> . . . . .	40
Abbildung 17	Android Wegpunkte um das ITZ Gebäude im Vergleich mit NaviLock <i>Kinematic</i> . . . . .	40
Abbildung 18	Android (Gelb) vs. <i>Single Broadcast</i> (Blau) <sup>1</sup> . .	40
Abbildung 19	NaviLock <i>Single Broadcast</i> Wegpunkte um das ITZ Gebäude <sup>1</sup> . . . . .	42

---

<sup>1</sup> ©OpenStreetMap-Mitwirkende, Karten: CC BY-SA

Abbildung 20	NaviLock <i>Single Broadcast</i> (gelbes Dreieck) vs. <i>Kinematic WTZR</i> (lila Kreis) <sup>1</sup> . . . . .	42
--------------	---	----

## TABELLENVERZEICHNIS

---

Tabelle 1	Eine vereinfachte Darstellung des Gleichungssystems mit dem die Position eines GNSS Benutzers bestimmt wird . . . . .	6
Tabelle 2	Die Frequenzbänder aller GNSS . . . . .	9
Tabelle 3	Die Tabelle zeigt die typischerweise erreichbaren Genauigkeiten von GPS-Systemen an. Der Tabelleninhalt stammt aus der Quelle u-blox, 2009 . . . . .	16
Tabelle 4	Daten aus den Aufzeichnungen . . . . .	33
Tabelle 5	Android in T-Form . . . . .	33
Tabelle 6	NaviLock Werte in T-Form mit vers. Auswertungsvarianten . . . . .	35
Tabelle 7	Android Werte in T-Form bei dem sich das Gerät in der Hosentasche befand . . . . .	36
Tabelle 8	Android Strecke als Rechteck . . . . .	37
Tabelle 9	NaviLock Werte als Rechteck . . . . .	39
Tabelle 10	Android Strecke um das ITZ Gebäude . . . . .	39
Tabelle 11	NaviLock Werte um das ITZ Gebäude . . . . .	41



## GLOSSAR

---

BeiDou	ist das chinesische Satelliten Ortungssystem. <a href="#">5</a> , <a href="#">12</a>
EGNOS	ist das europäische SBAS. Die Abkürzung steht für European Geostationary Navigation Overlay Service. <a href="#">9</a> , <a href="#">18</a> , <a href="#">19</a>
Galileo	ist das zivile europäische Satelliten Ortungssystem. <a href="#">5</a>
GLONASS	ist das russische Satelliten Ortungssystem. <a href="#">5</a> , <a href="#">6</a>
GNSS	Global Navigation Satellit System ist ein auf der ganzen Erde empfangbares Ortungs- und Navigationssystem. <a href="#">5</a> , <a href="#">43</a>
GPS	ist das amerikanische Satelliten Ortungssystem. <a href="#">5</a> , <a href="#">6</a>
OmniSTAR	bietet kommerziellen Korrekturdaten weltweit über Satellit an. <a href="#">9</a>
Orbit	ist die Umlaufbahn eines Objektes um einen Punkt und definiert sich aus der Distanz zu diesem und den Koeffizienten der Bahn. Dieser Begriff wird meist auch für ganze Bereiche mit verschiedenen Höhen benutzt. <a href="#">6</a>
Rover	ist ein GNSS Empfänger der sich typischerweise bewegt und dessen Signal korrigiert wird. <a href="#">6</a> , <a href="#">17</a> , <a href="#">25</a>
RTCM	Das Radio Technical Commission for Maritime Services mit seinem Komitee SC-104 entwickelte 1985 den RTCM SC-104 Standard. Ursprünglich nur für Marinezwecke gedacht, hat sich das Format heute für Echtzeitsysteme etabliert. <a href="#">19</a>
SBAS	ein Satellite-Based Augmentation Systems liefert Korrekturdaten für die Empfänger. Diese Daten sind meist regional optimiert. <a href="#">17</a> , <a href="#">19</a>
Station	ist eine stationäre Referenzstation, die Korrektursignale für andere Geräte bereitstellt. <a href="#">6</a> , <a href="#">17</a> , <a href="#">25</a>

WAAS ist das amerikanische SBAS. Die Abkürzung steht für Wide Area Augmentation System. Es liefert, wie EGNOS, Korrekturdaten über Satellit an die Empfänger. [9](#), [18](#)

## ACRONYMS

---

API Application Programming Interface  
BKG Bundesamt für Kartographie und Geodäsie  
DGPS Differential Global Satelit System  
DOP Dilution Of Precision  
EDAS EGNOS Data Access System  
EU Europäische Union  
HAL Hardware Abstraction Layer  
IGS International GNSS Service  
NTRIP Networked Transport of RTCM via Internet Protocol  
OS Open Service  
PRN Pseudo Random Noise Number  
RMS Root Mean Square  
RINEX Receiver Independent Exchange Format  
SAR Search and Rescure  
TEC Total Electron Content  
VTEC Vertical Total Electron Content

## LITERATUR

---

- Bauer, Manfred (2003). *Vermessung und Ortung mit Satelliten*. 5. Herbert Wichmann Verlag.
- Cabinet Office National Space Policy Secretariat, Government Of Japan (2016). *What is the Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)?* English. URL: [http://qzss.go.jp/en/overview/services/sv02\\_why.html](http://qzss.go.jp/en/overview/services/sv02_why.html).
- Dach, Rolf u. a. (2015). *Bernese GNSS Software Version 5.2*. 5.2. Astronomical Institute University of Bern (AIUB). URL: [ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BERN52/DOCU/DOCU52\\_vol2.pdf](ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BERN52/DOCU/DOCU52_vol2.pdf).
- Diessongo, Toho Herman (2014). „Präzise Positionierung mit Einfrequenz-Empfängern unter Nutzung der Potenziale des Galileo E5 Alt-BOC (15, 10)-Breitband-Signals“. Dissertation. Neubiberg: Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik.
- ESA (2016). *Fantastic four: November's Galileos reach Europe's Spaceport*. URL: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo/Launching\\_Galileo/Fantastic\\_four\\_November\\_s\\_Galileos\\_reach\\_Europe\\_s\\_Spaceport](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Launching_Galileo/Fantastic_four_November_s_Galileos_reach_Europe_s_Spaceport).
- Google (2016). *Android Location API*. URL: <https://developer.android.com/reference/android/location/package-summary.html>.
- GPSWorld (2016). „GPS World Almanac“. In: *GPS World Almanac*. URL: [http://gpsworld.com/wp-content/uploads/2016/08/GPS\\_AUG16\\_Almanac.pdf](http://gpsworld.com/wp-content/uploads/2016/08/GPS_AUG16_Almanac.pdf).
- Hauschild, André (2010). „Precise GNSS Clock-Estimation for Real-Time Navigation and Precise Point Positioning“. Diss. Technische Universität München. URL: <http://mediatum.ub.tum.de/node?id=976453>.
- IGS (2016). *International GNSS Service*. URL: <http://www.igs.org/>.
- Pajares, Manuel Hernandez u. a. (2008). „The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998“. In: *Journal of Geodesy* 83.3, S. 263–275. DOI: 10.1007/s00190-008-0266-1. URL: [https://www.researchgate.net/publication/225695408\\_The\\_IGS\\_VTEC\\_maps\\_A\\_reliable\\_source\\_of\\_ionospheric\\_information\\_since\\_1998](https://www.researchgate.net/publication/225695408_The_IGS_VTEC_maps_A_reliable_source_of_ionospheric_information_since_1998).
- Pakalski, Ingo (2016). *Google veröffentlicht fertiges Nougat*. Golem. URL: [www.golem.de/news/android-7-0-google-veroeffentlicht-fertiges-nougat-1608-122838.html](http://www.golem.de/news/android-7-0-google-veroeffentlicht-fertiges-nougat-1608-122838.html).
- Psiaki, Mark L. und Todd E. Humphreys (2016). „GPS Lies“. In: *IEEE Spectrum*, S. 26. URL: <http://spectrum.ieee.org/telecom/security/protecting-gps-from-spoofers-is-critical-to-the-future-of-navigation>.

- Qualcomm (2016). *Qualcomm Announces Broad Support for Galileo Across Snapdragon Processor and Modem Portfolios*. URL: <https://www.qualcomm.com/news/releases/2016/06/21/qualcomm-announces-broad-support-galileo-across-snapdragon-processor-and>.
- Takasu, Tomoji (2013). *RTKlib Manual*. URL: [http://www.rtklib.com/prog/manual\\_2.4.2.pdf](http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf).
- u-blox (2009). *GPS Essentials of Satellite Navigation Compendium*. English. u-blox. URL: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/GPS-Compendium\\_Book\\_%28GPS-X-02007%29.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/GPS-Compendium_Book_%28GPS-X-02007%29.pdf).

## ERKLÄRUNG

---

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Ausführungen, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind als solche gekennzeichnet. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

*Passau, Oktober 2016*

---

Maximilian Götz