

Positionsbestimmung mit GNSS – Stand der Technik und Grenzen

1. Einleitung

Die Positionsbestimmung mit Hilfe eines Globalen Navigationssatellitensystems (GNSS) ist eine der technischen Grundlagen für die Suche nach gestohlenen Fahrrädern im Projekt FindMyBike. Die hierbei eingesetzten Fahrrad-Tracker nutzen im Allgemeinen das Global Positioning System (GPS) zur Positionsbestimmung. Nachfolgend werden in diesem Sammelband zuerst häufig verwendete Begriffe erläutert und anschließend GNSS sowie insbesondere GPS ausführlich beschrieben.

2. Begriffsbestimmungen

GNSS (Globales Navigationssatellitensystem, engl. *global navigation satellite system*) ist der Oberbegriff für satellitengestützte Systeme mit denen Positionsbestimmung und Navigation betrieben werden kann. Jedes dieser Systeme nutzt mehrere mit Atomuhren bestückte Satelliten, die auf feststehenden Bahnen die Erde umkreisen und die jeweilige eigene Position und die Uhrzeit aussenden. Die Empfänger dieser Signale können mittels der Kenntnis der Signallaufzeiten, Zeitvergleiche und trigonometrischen Berechnungen die eigene Position ermitteln.⁴ Neben dem seit den 70er Jahren eingesetzten und bis heute sehr häufig verwendeten US-amerikanischen GPS sind als weitere GNSS auch das russische GLONASS⁵, das chinesische Beidou sowie das europäische GALILEO verfügbar.

1 Alexander Vollmar war in dem Projekt FindMyBike Wissenschaftlicher Mitarbeiter für die Forschungsfragen aus dem Bereich Informatik.

2 Kevin Kober war in dem Projekt FindMyBike studentische Hilfskraft im Bereich Informatik.

3 Prof. Dr. Gudrun Görlitz hat das Projekt FindMyBike für den Bereich Informatik geleitet.

4 Klaußmann/Malik (2018), S. 282.

5 Глобальная навигационная спутниковая система; russisch für "Globales Navigationssatellitensystem".

Das seit den 70er Jahren vom US-Militär entwickelte **NAVSTAR GPS** (*Navigational Satellite Timing and Ranging - Global Positioning System*) und seit einiger Zeit nur noch als GPS bezeichnete System⁶, ist das US-amerikanische GNSS. Die Abkürzung *GPS* wird teilweise als Synonym für Navigationssatellitensysteme benutzt.

Positionsbestimmung bezeichnet die Ermittlung der Position eines Objekts innerhalb eines Koordinatensystems (meist als geographische Länge und Breite, zum Teil noch um die jeweilige Höhe ergänzt). Hierbei wird keine Aussage getroffen, ob es sich bei dem bestimmten Ort um die eigene oder eine entfernte Position handelt. In der Fachliteratur werden in diesem Zusammenhang verschiedene Begriffe verwendet, für die jedoch keine einheitlichen und allgemeingültigen Definitionen bestehen. In diesem Sammelband werden die Begriffe *Positionsbestimmung*, *Ortbestimmung* und *Lokalisierung* synonym verwendet. Unter *Ortung* wird die Bestimmung der Position eines *entfernten* Objekts verstanden. Der in englischsprachigen Texten häufig genutzte Begriff *Geolocation* bezeichnet ebenso meist die Positionsbestimmung. Hingegen wird im Deutschen unter *Geolokation* in der Regel das Schließen auf die Position einer Person bzw. eines mit dem Internet verbundenen Gerätes mit Hilfe von Zusatzinformationen, die zu der entsprechenden IP-Adresse verfügbar sind, verstanden.

(GPS-)Tracker sind Ortungsgeräte, die an bewegliche Objekte zur Überwachung ihrer jeweiligen Positionen angebracht werden. Diese Geräte ermitteln kontinuierlich die jeweils eigene, aktuelle Position mittels GPS und leiten sie an das ortende System weiter. Der Prozess des Erfassens von Positionsdaten über die Zeit wird als *Tracking* bezeichnet.

3. Globale Navigationssatellitensysteme – GNSS

Alle globalen Navigationssatellitensysteme funktionieren nach den Grundprinzipien, welche erstmalig bei GPS angewandt wurden: Die Nutzer*innen empfangen mittels eines Empfangsgerätes Signale der GNSS-Satelliten, aus denen sich die jeweilige Position und gegebenenfalls auch die Geschwindigkeit berechnen lassen. Die Ortsbestimmung wird durch Berechnung der Distanz anhand der Signallaufzeit zwischen Satelliten und Empfangsgerät realisiert, wobei die Satellitenpositionen in den übertragenen Signalen enthalten sind. In Kombination mit mehreren Satelliten lässt sich mittels Triangulation die Position auf der Erdoberfläche bestimmen. Prinzipiell werden zur Positionsbestimmung drei Satelliten benötigt. Da allerdings eine Ungenauigkeit der Uhrzeit im Emp-

6 Bauer 2018, S. 297.

fangsgerät gegenüber der Atomuhrzeit des Satelliten besteht, wird ein vierter Satellit zur Zeitsynchronisation hinzugezogen, wodurch eine Ortsbestimmung im Meterbereich erzielt werden kann.⁷

Die heute genutzten GNSS bestehen aus drei verschiedenen Subsystemen: Die auf festgelegten Bahnen kreisenden zugehörigen Satelliten bilden das sogenannte (*Welt*-)Raumsegment. Das Bodensegment (auch Kontrollsegment genannt) setzt sich aus den Steuer- und Kontrolleinrichtungen auf der Erde, die für den Betrieb des Gesamtsystems notwendig sind, zusammen. Die zivilen und militärischen Anwender*innen des GNSS mit ihren verschiedenen Empfangsgeräten (an Bord von Fahr- oder Flugzeugen, auf Schiffen bzw. als mobile Handgeräte) bilden das Benutzersegment.⁸

Bezogen auf die Satellitenkonstellationen eines GNSS müssen, um eine Live-Ortung ständig und überall zu ermöglichen, die folgenden Aspekte beachtet werden: Große Bahnhöhen haben den Vorteil, dass die Zahl der benötigten Satelliten vergleichsweise gering ist. Geneigte Bahnen sind vorteilhaft gegenüber Polbahnen, da hierdurch sowohl die Polgebiete abgedeckt werden können, als auch keine Satellitenhäufungen an den Polen entstehen. Die Gleichverteilung der Satelliten erlaubt die vollständige Abdeckung der Erde bei relativ wenigen Satellitenkontakten.⁹

Die Bestimmung der Position mittels GNSS ist ein passives Verfahren, bei dem keine zentrale Datenbankabfrage notwendig ist, um die jeweiligen Geokoordinaten des Empfängers zu bestimmen. Dies hat den Vorteil, dass nur der Empfänger weiß, wo er sich befindet und dass keine Daten zur Positionsbestimmung kommuniziert werden müssen.¹⁰ GNSS benötigen eine freie Sichtverbindung zu mehreren Satelliten, um zuverlässig zu funktionieren. Im Außenbereich kann diese beispielsweise durch Wolken, Bäume, Tunnel oder Hochhäuser unterbrochen sein. In Gebäuden ist die Möglichkeit eines zuverlässigen GNSS-Empfangs sehr gering.

4. Global Positioning System – GPS

Das Global Positioning System ist das GNSS, welches heute von den meisten Navigationssystemen und Trackern genutzt wird. Es wurde seit den 1970er-Jah-

7 Bauer 2018, S. 67–68.

8 Klußmann/Malik 2018, S. 12; Zogg 2014, S. 45.

9 Bauer 2018, S. 201.

10 Schelewsky 2014, S. 9.

ren vom US-Verteidigungsministerium zu militärischen Zwecken entwickelt und am 17. Juli 1995 vollständig ausgebaut in Betrieb genommen.¹¹

Für das Global Positioning System werden insgesamt 31 Satelliten eingesetzt, welche die Erde in einer Höhe von 20.180 km auf sechs verschiedenen Bahnen umkreisen. Die Neigung der Satellitenbahnen beträgt 55° zum Äquator, wodurch abhängig von der Position und den Empfangsbedingungen bei nicht beschränkten Sichtverhältnissen von jedem Punkt der Erde GPS-Signale meist gleichzeitig von sechs bis zehn, mindestens aber von vier Satelliten empfangen werden können. Die einzelnen Satelliten haben jeweils vier Atomuhren an Bord und umkreisen die Erde in ca. zwölf Stunden. Als Referenzsystem für GPS dienen die geozentrischen Koordinaten der weltweit verteilten Bodenstationen sowie die GPS-Systemzeit, welche ausschließlich von den Atomuhren des Bodensegments erzeugt wird.¹²

4.1 *Selective Availability*

GPS befindet sich im Besitz der Regierung der USA und wird von den Luftstreitkräften der USA (United States Air Force) betrieben.¹³ Dies bedeutet, dass die Regierung der USA alleine entscheidet, ob und in welchem Umfang es der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt wird. Das System wurde von Beginn an als *Dual-Use-System* entwickelt, d.h. es kann sowohl militärisch als auch zivil genutzt werden. Der Dienst für militärische Zwecke, der „*Precise Positioning Service*“ (PPS), darf nur von autorisierten Stellen verwendet werden, während der zivile Dienst, der „*Standard Positioning Service*“ (SPS), von der Allgemeinheit frei nutzbar ist.¹⁴

Aus politischen Gründen wurde ein Jahr vor dem Erreichen der vollständigen Betriebsbereitschaft der Zugang zum zivilen Standard Positioning Service eingeschränkt. Im Betriebszustand der *Selective Availability*, der „ausgewählten Verfügbarkeit“, bestimmt der Systembetreiber welches GPS-Genauigkeitspotential für die nicht-militärische Nutzung verfügbar ist. Durch verfälschte Satellitenbahndaten und künstliches Verrauschen der Trägersignale wurde die potenzielle Genauigkeit der Ortsbestimmung in Echtzeit verschlechtert.¹⁵

Bei der Positionsbestimmung mit GPS muss wie bei jeder Messung mit Fehlern gerechnet werden. Diese Fehler lagen bis zum Abschalten der künstlichen Signalverschlechterung mittels *Selective Availability* bei ca. 50 bis 100

11 Bauer 2018, S. 297.

12 Bauer 2018, S. 298ff; Zogg 2014, S. 9.

13 Department of Defense & NAVSTAR GPS 2008) S. 1.

14 Zogg 2014, S. 9; Bauer 2018, S. 297ff.

15 Bauer 2018, S. 314–315.

Metern.¹⁶ Nach dem Abschalten der Selective Availability am 2. Mai 2000 kann bei der zivilen Nutzung von GPS von einer erreichbaren Genauigkeit von vier Metern im quadratischen Mittel (*root mean square*) bzw. von 7,8 Metern in 95% aller Messungen ausgegangen werden.¹⁷ Weiterhin könnte im Bedarfsfall die künstliche Verschlechterung der GPS-Signale global oder auch nur regional (z.B. in einem Krisengebiet) wieder eingeschaltet werden.¹⁸

4.2 Genauigkeit und Fehleranfälligkeit von GPS

Die Positionsbestimmung mit GPS ist aus den unterschiedlichen Gründen häufig ungenau und fehleranfällig. Bei schlechten Bedingungen können Fehler von bis zu 100 Metern gegenüber der tatsächlichen Position auftreten, wogegen die Genauigkeit im besten Fall zwischen drei und zehn Metern liegt.¹⁹ Nachfolgend werden Fehlerquellen, die einen besonders starken Einfluss auf das Messergebnis haben, kurz beschrieben.

4.2.1 Satellitenbahnen

Die Bahnen der GPS-Satelliten werden von fünf Monitorstationen auf der Erde ständig überwacht und vorherberechnet. Bei der Vorausberechnung der Bahnen treten jedoch Abweichungen zu den realen Satellitenbahnen auf. Der Hauptgrund für diese Abweichungen besteht darin, dass das Schwerfeld der Erde nicht vollständig homogen ist. Hierdurch stellen die Satellitenbahnen keine vollkommen gleichmäßigen Ellipsen dar, sondern weichen von dieser Idealform ab.²⁰ Die Position eines GPS-Satelliten ist zum Zeitpunkt der Signalausstrahlung damit in der Regel nur auf ca. einen bis fünf Meter genau bekannt.²¹

4.2.2 Atmosphärische Fehler

Bei der Positionsbestimmung wird die Geschwindigkeit der Satellitensignale als konstant angesehen. Auf dem Weg vom Satelliten zum Empfänger durchläuft das Signal jedoch verschiedene Schichten der Atmosphäre und wird dabei mehrfach gebrochen. Die Verzerrungen sind hierbei umso stärker je näher der Satellit über dem Horizont steht.²²

16 Schüttler 2014, S. 82.

17 Department of Defense & NAVSTAR GPS 2008, S. B-17.

18 Zogg 2014, S. 52–53.

19 Schelewsky 2014, S. 9.

20 Schüttler 2014, S. 81–82.

21 Zogg 2014, S. 91.

22 Schelewsky 2014, S. 9.

Satellitensignale breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. In der Troposphäre (0 bis ca. 15 km Höhe) werden diese durch die Erhöhung der Dichte und der Luftfeuchte herabgesetzt. Es wird versucht diesen Einfluss mittels eines einfachen Modells basierend auf Standardatmosphäre und Standardtemperatur zu korrigieren. In der Ionosphäre (60 bis 1000 km Höhe) sind die Gasmoleküle durch die Sonneneinstrahlung tagsüber stark ionisiert (d.h. durch die einfallende Strahlung werden die Elektronen aus den Gasmolekülen gelöst; es entstehen positiv geladene Ionen sowie freie Elektronen). Durch die Ionisierung, die zeit- aber auch ortsabhängig und inhomogen ist, wird in diesem Teil der Atmosphäre ebenso die Ausbreitungsgeschwindigkeit verringert. Der Einfluss dieses Effekts kann zumindest teilweise mit geophysikalischen Korrekturmodellen behoben werden.²³

4.2.3 Einfluss der Satellitengeometrie

Die Stellung der Satelliten (die sogenannte *Satellitengeometrie*) beeinflusst darüber hinaus die Genauigkeit der Positionsbestimmung. Wenn die Satelliten aus Sicht des Empfängers zu dicht beieinanderstehen oder der Höhenwinkel nur sehr gering ist (kleiner als 15 Grad), lässt sich die Position nur noch ungenau bestimmen.²⁴

Der Einfluss der Satellitengeometrie ist von der entsprechenden Situation abhängig. So kann es sein, dass sich durch Abschattung im Gebirge nur wenige Satelliten im Empfangsbereich befinden und so die jeweilige Satellitengeometrie vom Empfänger als ungünstig angesehen werden muss. In solchen Situationen sollten die Positionsangaben von GPS-Empfängern durch die Nutzenden immer kritisch eingeschätzt werden.²⁵

Langzeitmessungen haben ergeben, dass der horizontale Fehler (d.h. die Abweichung in der Ebene) infolge von unterschiedlichen Satellitengeometrien (in 95% aller Messungen) bei weniger als 7,4 m liegt.²⁶

4.2.4 Mehrwegeeffekte

Die von den GPS-Satelliten ausgesendeten Signale gelangen nicht nur auf direktem Weg zur Antenne des Empfangsgerätes, sondern auch indirekt durch Reflexionen an Objekten in der Umgebung der Empfangsantenne. Hierbei überlagern sich die direkt einfallenden und die reflektierenden Signale.²⁷

23 Zogg 2014, S. 103–104.

24 Schelewsky 2014, S. 10.

25 Schüttler 2014, S. 86.

26 Zogg 2014, S. 96.

27 Bauer 2018, S. 132.

Die Stärke dieses Effekts ist dabei abhängig von der Beschaffenheit der reflektierenden Oberflächen (z.B. Glas und Beton im Gegensatz zu Rasen oder Fels), der Weglängendifferenz zwischen dem direkten und dem indirekten Weg zum Empfänger sowie der jeweils eingesetzten Technik des Empfängers. Durch Abschätzung der verschiedenen Einflussgrößen kann der Fehler durch Mehrwegeeffekte normalerweise auf maximal fünf Meter reduziert werden.²⁸ So kann durch Auswahl einer Mess-Position, die frei von Reflexionen ist, einer guten Antenne und des Messzeitpunktes der jeweilige Einfluss des Mehrwegempfangs zum Teil kompensiert werden.²⁹

4.2.5 Uhrenfehler

Die Ermittlung der Entfernung zu den GPS-Satelliten erfolgt durch das jeweilige GPS-Empfangsgerät. Hierbei wird die Zeitspanne bestimmt, die das GPS-Signal vom Satelliten bis zum Empfänger benötigt. Wenn diese Zeit mit der Signalausbreitungsgeschwindigkeit multipliziert wird, kann die Entfernung daraus errechnet werden. Obwohl die Satelliten Atomuhren mit sich führen, besteht eine Abweichung zwischen der Satelliten-Zeit und der des Bodensegments. Ein Zeitfehler von nur zehn Nanosekunden führt hierbei zu einem Fehler von ca. drei Metern.³⁰

4.3 GPS-Ergänzungen

Zur Verminderung der unterschiedlichen Defizite von GPS wurden verschiedene Ergänzungen entwickelt. Nachfolgend werden zwei dieser Verfahren, eines zur Erhöhung der Genauigkeit der Ortsbestimmung (DGPS) und ein weiteres zur Reduzierung der Zeit bis zur ersten Positionsbestimmung durch einen GPS-Empfänger (A-GPS) erläutert.

4.3.1 Differential GPS – DGPS

Differential GPS ist ein Verfahren, das zur Erhöhung der Genauigkeit der Positionsbestimmung mit GPS unter Zuhilfenahme von Korrekturdaten dient.

Um die oben beschriebenen Fehler, die bei der Positionsbestimmung mit GPS auftreten, beheben oder zumindest verringern zu können, wird an einer Referenzstation, deren Koordinaten geodätisch festgelegt wurden und die damit als *richtig* angesehen werden können, eine Ortsbestimmung mit GPS durchgeführt. Die so ermittelte Position ist hingegen als *fehlerbehaftet* einzustufen. Der

28 Schüttler 2014, S. 86.

29 Zogg 2014, S. 104.

30 Zogg 2014, S. 103.

dabei beobachtete Fehler wird bestimmt und den Nutzer*innen in der Umgebung dieser Referenzstation mitgeteilt. Die Nutzer*innen gleichen dann mittels geeigneter Algorithmen den bei ihnen zu erwartenden Fehler entsprechend aus. Dieses Verfahren ist umso genauer, je näher sich der*die Nutzer*in an der jeweiligen Referenzstation befindet. Mittels DGPS können nahezu alle oben aufgeführten Fehler ausgeschaltet werden. So ist es möglich bei entsprechender Nähe zu einer Referenzstation alle Satelliten und ihre Bahnen betreffenden Fehler sowie die atmosphärischen Störungen herauszurechnen.³¹

Die Genauigkeit einer horizontalen Positionsbestimmung kann mit Hilfe von DGPS von ca. zwölf Metern³² auf einen Bereich von 0,3 bis 2,5 Meter verbessert werden. Für das Gebiet der Geodäsie kann dieser Wert durch ein weiteres Verfahren (Vermessung der Trägerwelle) noch bis auf einige Millimeter verringert werden.³³

Zur Verbreitung der Korrektursignale werden verschiedene Systeme eingesetzt. In den USA wird hierbei das Wide Area Augmentation System (WAAS) eingesetzt. Ein entsprechender Dienst existiert in Europa, der *European Geostationary Navigation Overlay Service* (europäischer geostationärer Überlagerungsservice, EGNOS). Die Zusatzinformationen, die von EGNOS bereitgestellt werden, können von den meisten modernen GPS-Empfängern verarbeitet werden.³⁴

4.3.2 Assisted GPS – A-GPS

Assisted GPS ist ein Verfahren mit dessen Hilfe sich die Zeit für die erste Positionsbestimmung nach dem Start eines GPS-Geräts deutlich reduzieren lässt. Um eine Position genau bestimmen zu können, müssen einem Empfangsgerät die exakten Bahndaten (*Ephemeriden*) der jeweilig genutzten Satelliten bekannt sein. Die Zeit bis zur Bestimmung der ersten Position (*Time To First Fix*, TTFF) dauert um ein Vielfaches länger je nachdem wie lange der GPS-Empfänger abgeschaltet war. Denn durch eine Abschaltung verfügt das Gerät über keine aktuellen Daten. Ist das Gerät weniger als vier Stunden ausgeschaltet, sind die Ephemeriden-Daten, die es zuvor gespeichert hat, noch gültig³⁵. Wenn also die Bahndaten, die das Empfangsgerät gespeichert hat, veraltet sind und vom Satelliten neu bezogen werden müssen, dauert die Positionsbestimmung deutlich länger. Zur Beschleunigung dieses Prozesses werden beim A-GPS Hilfs-

31 Mansfeld 2014, S. 215f; Schüttler 2014, S. 90–91.

32 Zogg 2014, S. 103.

33 Schüttler 2014, S. 90–91.

34 Schüttler 2014, S. 97.

35 Eine typische TTFF-Zeit wäre bei einem Kaltstart 44 Sekunden. Siehe Zogg 2010, S. 19.

daten über zusätzliche Datenübertragungswege (z.B. GSM, Internet) genutzt. Die Hilfsdaten umfassen insbesondere die Ephemeriden der GPS-Satelliten, die Satellitenkonstellationen (der sogenannte Almanach) sowie Zeitinformationen. Mit Hilfe dieser Daten kann die TTFF auf bis zu eine Sekunde reduziert werden.³⁶

Literatur

- Bauer, Manfred* (2018) Vermessung und Ortung mit Satelliten - Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme. Berlin, Offenbach: Wichmann.
- Department of Defense & NAVSTAR GPS* (2008) Global Positioning System - Standard Positioning Service - Performance Standard. Washington DC.: <https://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf> (letzter Aufruf: 28.03.2019).
- Klußmann, Niels; Malik, Armin* (2018) Lexikon der Luftfahrt. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Schelewsky, Mark* (2014) Tracking mit Smartphones: Einführung in die Technik und Stand der Forschung. In: Schelewsky, Marc; Jonuschat, Helga; Bock, Benno; Stephan, Korinna (Hrsg.) (2014): Smartphones unterstützen die Mobilitätsforschung. Neue Einblicke in das Mobilitätsverhalten durch Wege-Tracking. Wiesbaden: Springer Vieweg. S. 5-23.
- Schüttler, Tobias* (2014) Satellitennavigation – Wie sie funktioniert und wie sie unseren Alltag beeinflusst. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Mansfeld, Werner* (2004) Satellitenortung und Navigation - Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag.
- Zogg, Jean-Marie* (2010) Satelliten, wo seid ihr? – Assisted-GPS zur schnellen und genauen Satellitennavigation. In: Elektronik wireless, 10/2010, S. 18-21.
- Zogg, Jean-Marie* (2014):GPS und GNSS: Grundlagen der Ortung und Navigation mit Satelliten. http://www.zogg-jm.ch/Dateien/Update_Zogg_Deutsche_Version_Jan_09_Version_Z4x.pdf; Revision vom 20. Mai 2014, zuletzt Aufruf: 28.03.2019.

36 Zogg 2010, S. 18ff.

