



Machbarkeitsstudie Honig
Hochgenaue innerstädtische Ortung mit ITS Komponenten und GNSS
ver 1.01

Ersteller
s.a.d Systemanalyse und -Design GmbH
Markus Mahler (Dipl.-Ing.)
Große Rosenstraße 21
34117 Kassel

Mail: verkehrstelematik@sad-gmbh.de
Telefon: + 49 561 316795-11
August 2025

Inhalt

1. Einleitung.....	3
1.1. Machbarkeitsstudie	3
1.2. Danksagung.....	3
2. Funktionsweise der Satellitenortung, Störgrößen und Korrektur.....	4
2.1. Funktionsweise von GNSS.....	4
2.2. Störgrößen	4
2.3. Korrekturmöglichkeiten	4
Satellitenbasierte Korrektur	5
Dead Reckoning.....	5
RTK Real Time Kinematics	5
2.4. Korrektur der Ortung für Fahrzeuge	5
3. Generierung, Verteilung und Empfang der Korrektursignale	7
3.1. Bereitstellung und Verteilung der Korrektursignale.....	7
3.2. Verarbeitung der Korrektursignale	8
3.3. Testfahrten.....	9
3.4. Bewertung der Testfahrten.....	10
4. Abschlussbemerkungen	17
5. Links und Verweise	18

Dieses Dokument ist frei verfügbar und unverändert frei weiterverteilbar.

1. Einleitung

Die Ortung von Fahrzeugen, Schiffen und Flugzeugen und weiteren Geräten mit Hilfe von GPS (Global Positioning System) ist seit vielen Jahren ein übliches und marktgängiges Verfahren. Die Bedeutung für die Wirtschaft, die ökonomische, gesellschaftliche und militärische Abhängigkeit von einer satellitengestützten Positionsermittlung ist so groß geworden, dass mittlerweile mehrere unabhängig voneinander existierende Satellitenortungssysteme von unterschiedlichen Staaten oder Staatengemeinschaften installiert wurden. Neben dem GPS-System seien hier noch Galileo, Baidou und GLONASS genannt. Die heute üblichen Empfänger können in der Regel mehrere dieser Systeme empfangen und bilden daraus die Position auf der Erde ab (zum großen Teil wird hieraus auch eine sehr genaue Zeitangabe ermittelt). Deshalb wird häufig der Begriff GNSS (Global Network Satellit System) verwendet, der meint, dass aus mehreren Satelliten eine Position ermittelt wird, wobei diese Satelliten durchaus zu unterschiedlichen Systemen gehören können.

Solange es Ortung über ein Satellitensystem gibt, ist auch die Genauigkeit der Ortung Thema der Diskussionen. Zum einen stellt sich die Frage, was sind die Störgrößen und zum anderen lag ein Fokus der Entwicklung darauf, wie die Störgrößen eliminiert oder korrigiert werden können. Einigen Anwendungen reichte die bisherige Genauigkeit vollkommen aus. Zum Beispiel ist für die Seefahrt auf hoher See eine Genauigkeit von 20m – 40m eine völlig akzeptable Größe. Andere Anwendungen, wie z.B. die Navigationssysteme im Consumer Bereich projizieren das Fahrzeug auf einer gegebenen Karte immer auf eine Straße, auch wenn die Ortung etwas daneben liegt.

In den letzten Jahren nehmen jedoch die Applikationen zu, die eine Ortungsgenauigkeit von wenigen Metern oder sogar noch genauer notwendig machen. Neben der Landwirtschaft (Smart Agriculture) und den Drohneneinsätzen ist im Bereich des innerstädtischen Verkehrs insbesondere im Zuge vom autonomen und vernetztem Fahren ein erhöhter Bedarf an hochgenauer Ortung. Als Beispiele können hier die Abbildung von ÖPNV Fahrzeugen auf maschinenlesbare Knotenpunkts Geometrien (MAP-Nachrichten) zum Zwecke der Ein- und Ausfahrtsspurfindung genannt werden oder die Ortung von Fahrzeugen auf Betriebsgeländen zum Zwecke des Betriebshofmanagements. Die GNSS-Empfänger, die hier Unterstützung leisten haben auch mittlerweile gut bezahlbare Kostengrößenordnungen erlangt. Die hohe Ortungsgenauigkeit ist allerdings auch mit einem Zusatz an Infrastrukturbereitstellung verbunden. Es muss neben einer Basisstation zur Generierung der Korrekturnachrichten auch ein Verteilmechanismus realisiert werden, der das Korrektiv an die jeweiligen Empfängerfahrzeuge, die es benötigt, übertragen.

Hier bietet sich eine Infrastruktur mittels Road Side Units (RSU) an. Sie sind dort vorhanden, wo auch die hochgenaue Ortung erwünscht ist. Die Fahrzeuge, die eine hochgenaue Ortung benötigen, haben auch eine On Board Unit, die die Signale der RSU empfangen können. Die Datenversorgungsinfrastruktur der RSU können auch die Korrekturdaten übertragen.

1.1. Machbarkeitsstudie

Dieses Dokument ist im Rahmen einer Machbarkeitsstudie entstanden, die durch die DISTRAL Initiative der Hessischen Landesregierung gefördert wurde.

<https://digitales.hessen.de/foerderprogramme/distr1>

Das Dokument ist frei verwendbar.

1.2. Danksagung

Die Machbarkeitsstudie konnte auf die Ressourcen der Stadt Kassel, Straßen und Tiefbauamt im Sinne von der Nutzung der Road Side Units zugreifen. Aus diesem Grund möchten wir uns an dieser Stelle ausdrücklich bei der Stadt Kassel für diese Unterstützung bedanken. Sie leistet einen wesentlichen Beitrag, das Thema C-ITS voranzubringen.

2. Funktionsweise der Satellitenortung, Störgrößen und Korrektur

Zur Nutzung der modernen und auf die Zukunft ausgerichteten Systemarchitektur der Stadt Kassel im Bereich Verkehrsmanagement C-ITS soll als Basisplattform für die Aussendung der Korrektursignale für die hochgenaue Ortung mittels Real Time Kinematik (RTK) dienen. Im Bereich des Autonomen und Vernetztem Fahrens (AVF) werden immer mehr Anwendungen realisiert, für die eine übliche Ortungsgenauigkeit von mehreren Metern zu ungenau ist. Insbesondere im Zulauf auf die Standorte der Road Side Units ist eine genauere Positionsbestimmung wünschenswert.

2.1. Funktionsweise von GNSS

An dieser Stelle soll nur kurz auf die Funktionsweise der Satellitenortung eingegangen werden. Es gibt eine Reihe von Publikationen, wo diese seit vielen Jahren existierende Funktionalität gut beschrieben wurde, z.B. unter [4].

In einer Höhe ca. 25.000km über der Erde befinden sich Satelliten, die hochgenaue Atomuhren an Bord haben. Diese Satelliten strahlen über elektromagnetische Wellen u.a. Zeitinformationen Bahndaten aus, aus denen GNSS Empfänger auf der Erde die genaue Position und Uhrzeit aus den unterschiedlichen Signallaufzeiten ermitteln können. Es werden mindestens vier Satelliten benötigt, damit diese Bestimmung funktioniert. Bei der Erhöhung der Empfänger kann eine höhere Genauigkeit erreicht werden.

2.2. Störgrößen

Es gibt bei der Bestimmung der Position und Uhrzeit durch die übertragenen Satelliten Signale allerdings auch einige Störgrößen, die einer metergenaue oder noch genaueren Positionsbestimmung entgegen stehen.

Diese sind (Quelle Wikipedia, https://de.wikipedia.org/wiki/Globales_Navigationsatellitensystem)

Quelle	Zeitfehler	Ortsfehler
Satellitenposition	6-60ns	1-10m
Zeitdrift	0-9ns	0-1,5m
Ionosphäre	0-180ns	0-30m
Troposphäre	0-60ns	0-10m
Mehrwege-Effekt	0-6ns	0-1m

Die Störgrößen lassen sich systembedingt nicht unterdrücken oder ausschalten. Allerdings kann durch bestimmte weitergehende Messverfahren bestimmt werden, wie groß die Abweichung bedingt durch die Störgröße ist. Damit lässt sich dann eine Korrekturgröße bestimmen und es kann algorithmisch die Position exakter bestimmt werden.

2.3. Korrekturmöglichkeiten

Die Korrekturmöglichkeiten unterteilen sich grob in die folgenden Kategorien:

- Satellitenbasierte Korrektur
- Korrektur durch weitere Sensoren im GNSS Empfänger
- Korrekturnachrichten, die durch eine Referenz Basisstation generiert werden

Satellitenbasierte Korrektur

Satellitengestützte Korrektursysteme (*Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS)*), sind das europäische [EGNOS](#), das US-amerikanische [WAAS](#), das japanische [MSAS](#) und das indische [GAGAN](#), die die Korrektursignale über geostationäre Satelliten abstrahlen. Das chinesische System [Beidou](#) befindet sich noch im Aufbau, das indische System [IRNSS](#) noch in Planung.

Im Wikipedia steht unter dem Suchbegriff EGNOS [6] folgende einleitende Sätze:

European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) ist ein europäisches Differential Global Positioning System (DGPS) als Erweiterungssystem zur Satellitennavigation. Es steigert regional begrenzt auf Europa die Positionsgenauigkeit von GNSS und ist funktionell und protokollmäßig voll kompatibel zu dem amerikanischen WAAS, dem japanischen MSAS und dem indischen GAGAN, die ihre Korrekturdaten ebenfalls über Satelliten verteilen (Satellite Based Augmentation System, SBAS). Der Empfang von EGNOS setzt eine Sichtverbindung zu einem geostationären Satelliten im Süden voraus.

Neben Daten zur Verbesserung der Positionsgenauigkeit informiert EGNOS auch über die Integrität des GNSS: Innerhalb von 6 Sekunden erfahren die Nutzer des *Safety-of-Life*-Dienstes, wenn die Positionierungssysteme falsche Daten ausstrahlen oder der Empfang stark gestört ist. Der *Safety-of-Life*-Dienst kommt zum Einsatz, wenn korrekte Positionsangaben lebenswichtig sind, wie zum Beispiel im Flugverkehr.

[...]

Dead Reckoning

Dead Reckoning wird auch unter dem deutschen Begriff Koppelnavigation oder Koppelung geführt. Diese Methode der Ortsbestimmung ist eine ergänzende Methode von GNSS und setzt Beschleunigungssensoren voraus. Sie kommt in modernen GNSS-Empfängern dann zur Anwendung, wenn der Empfang der Satellitensignale kurzzeitig nicht möglich ist, z.B. bei der Fahrt durch einen Tunnel oder einem anderen Gebiet mit der Abschattung ähnlichem. Die Ortsbestimmung wird zum letzten gültigen GNSS-Empfang mittels Geschwindigkeitsmessung und Fahrtmessung fortgesetzt und ist mehrere hundert Meter sehr genau (Messfehler kleiner 5%).

RTK Real Time Kinematics

Der Begriff RTK steht für Real Time Kinematic und steht für die Echtzeitkorrektur für sich bewegende Objekte, wie z.B. Fahrzeuge oder Drohnen. Mit Hilfe dieser Korrekturmethode ist es möglich, Ortungsgenauigkeiten auf weit unter einem Meter zu erreichen und die GNSS-Drift bei stehenden Empfängern auf ein Minimum, d.h. also unter einem Meter, zu begrenzen. Diese hohe Genauigkeit wird allerdings nur dadurch erreicht, dass zu dem eigentlichen GNSS Signal noch ein externes Korrektursignal aus einer zweiten Quelle (Basis Station) eingespeist wird. Ausserdem muss der GNSS-Empfänger RTK-fähig sein, d.h. er muss in der Lage sein, das empfangene GNSS-Signal mit dem Korrektursignal anzureichern und ein korrigiertes Signal zu erstellen. Die Basisstation, die das Korrektursignal liefert, darf nicht allzu weit von dem zu korrigierenden Empfänger entfernt sein. Als Richtwert gilt hier zwischen 10km – 30km Entfernungsabstand zwischen Basisstation und Empfänger (Rover). Je weiter sie entfernt ist, desto schlechter ist die Korrektur. Bei einer Entfernung von 30 km und mehr geht man davon aus, dass es keine Korrektur mehr gibt.

2.4. Korrektur der Ortung für Fahrzeuge

Die heutigen üblichen Empfänger haben in der Regel die SBAS Korrektur eingebaut und verwenden diese. In Europa wird damit auf das EGNOS System gesetzt. Hängt die Güte des Einsatzfall der Positionsbestimmung von der Positionierungsgenauigkeit ab, sind gerade im innerstädtischen Einsatzfall weitere Korrekturmöglichkeiten der Positionsbestimmung sehr wünschenswert. Gerade

die Drift des Signals bei stehenden Fahrzeugen und auch die Extrapolation der Position bei abgeschatteten oder verdeckten Satelliten führen zu Effekten, die immer wieder Schwierigkeiten bereiten und die am besten eliminiert werden.

Bedingt durch die (technische) Weiterentwicklung sind die modernen GNSS-Empfänger mit entsprechenden Korrekturmöglichkeiten preislich so attraktiv geworden, dass sie nicht mehr nur in speziellen Einzelfällen eingesetzt werden können, sondern mittlerweile in den Geräten für den professionellen Einsatz mit Ortungsfunktion Einzug gehalten haben. Es gibt auch eine Reihe von Baugruppen, die eine Nachrüstung von bestehender Hardware möglich machen. Ebenso können eigene Basisstationen kostengünstig eingerichtet und betrieben werden, die entsprechende Korrektursignale (RTCM Nachrichten über das NTRIP-Protokoll) erzeugen und weiterverbreiten können.

Für den innerstädtischen Betrieb, z.B. für die Fahrzeuge des ÖPNV ist sowohl eine Extrapolation der Position bei abgeschatteten Satellitensignal als auch eine Korrektur über eine benachbarte Basisstation sehr sinnvoll.

Bedingt durch die aufkommende stärkere Verbreitung der Empfänger, die die Korrektursignale von Basisstationen verarbeiten können, wird jetzt zunehmend die Frage interessant, wie kann eine Infrastruktur aussehen, die dieses standardisierte Korrektursignal zur Verfügung stellt.

3. Generierung, Verteilung und Empfang der Korrektursignale

Grundsätzlich ist eine Systemarchitektur wie im folgenden Übersichtsbild sinnvoll und möglich.

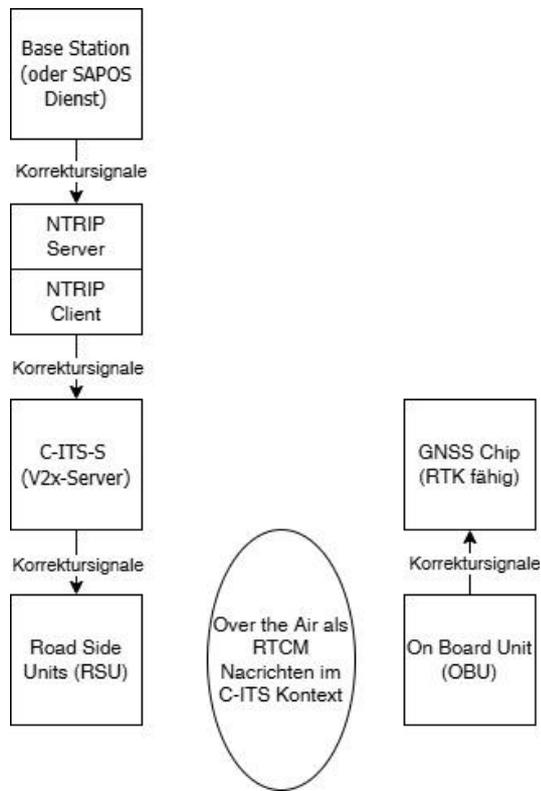


Abbildung 1: Systemarchitektur RTCM Nachrichten im C-ITS Kontext

Hinweis zur obigen Abbildung: nicht jedes Kästchen ist eine eigene Applikation oder ein eigenes Gerät. Die Darstellung soll nur die logischen Einheiten in dieser gewählten Systemarchitektur aufzeigen.

3.1. Bereitstellung und Verteilung der Korrektursignale

Für die Bereitstellung des Korrektursignals sind zwei unterschiedliche Varianten denkbar. Eine Möglichkeit wäre es, das Korrektursignal vom offiziellen SAPOS Dienst der Hessischen Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation zu beziehen (gibt es nicht nur in der Hessischen Landesverwaltung sondern in den anderen Landesverwaltungen auch). Zur Zeit ist dieser Bezug kostenfrei, in der Regel hochverfügbar und von der eingemessenen Basisstation, die das Korrektursignal generiert, sehr genau. Geprüft werden müsste unter Umständen noch, ob die Bedingungen für diesen Abruf, der technisch auf einen Endanwender beschränkt ist, untersagt, diese Daten an viele Endanwender weiterzugeben. Da direkt in der Innenstadt von Kassel eine Basisstation für SAPOS betrieben wird, sollte die Genauigkeit für das gesamte Stadtgebiet gegeben sein. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, eine eigene Basisstation aufzubauen und zu betreiben.

Die von der Basisstation bereitgestellten Korrektursignale würden mittels einer Internetverbindung über das NTRIP-Protokoll abgeholt werden. Die RTCM Nachrichten, die letztendlich die Korrekturdaten beinhalten werden aufbereitet und über das bestehende städtische MQTT System an die Road Side Units verteilt. Die RSU's nehmen die Korrekturnachrichten entgegen und strahlen sie über den Weg aus, der auch für die anderen ETSI Nachrichten vorgesehen ist, nämlich über den Weg des DSRC (Distance Short Range Communication) über IEEE 802.11p (WLANp).

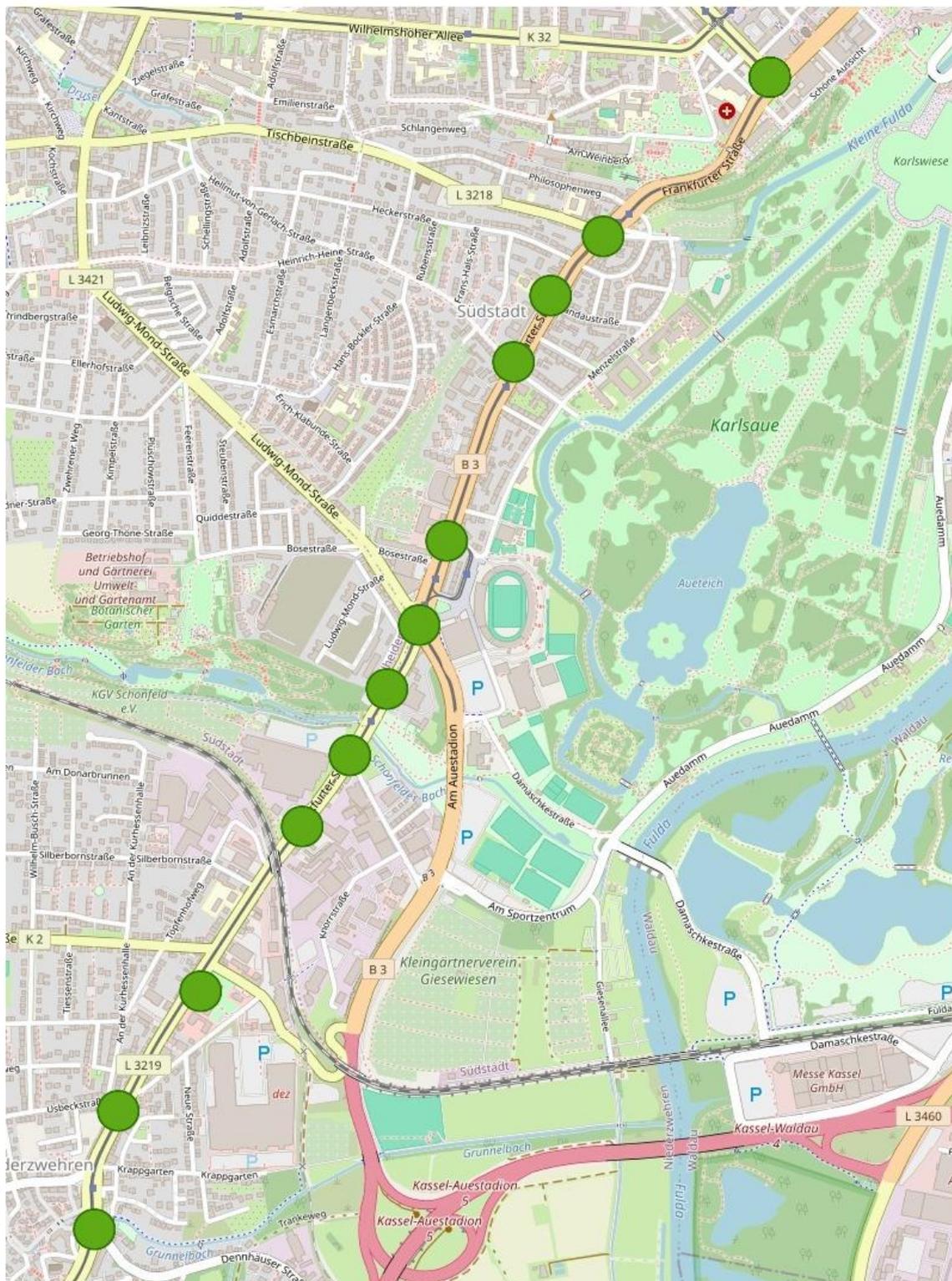


Abbildung 2: Teststrecke in Kassel, Frankfurter Straße. Die grünen Kreise sind Road Side Units, Streckenlänge ca. 3,5 km

3.2. Verarbeitung der Korrektursignale

Die von den Road Side Units ausgestrahlten Korrektursignale stehen im Empfangsbereich der RSU allen Empfängern zur Verfügung. Jede On Board Unit (oder andere 802.11p Empfänger) kann die Nachrichten empfangen und sie dem GNSS-Empfänger zur Verfügung stellen.

3.3. Testfahrten

Bei den Testfahrten wurde ein ZED-F9P Chip der Firma u-Blox verwendet, jeweils mit und ohne Korrektursignal. Das Korrektursignal wurde als RTCM Nachrichten nach ISO DIN 19091 von einer On Board Unit (OBU) empfangen und an den GNSS Chip weitergegeben.

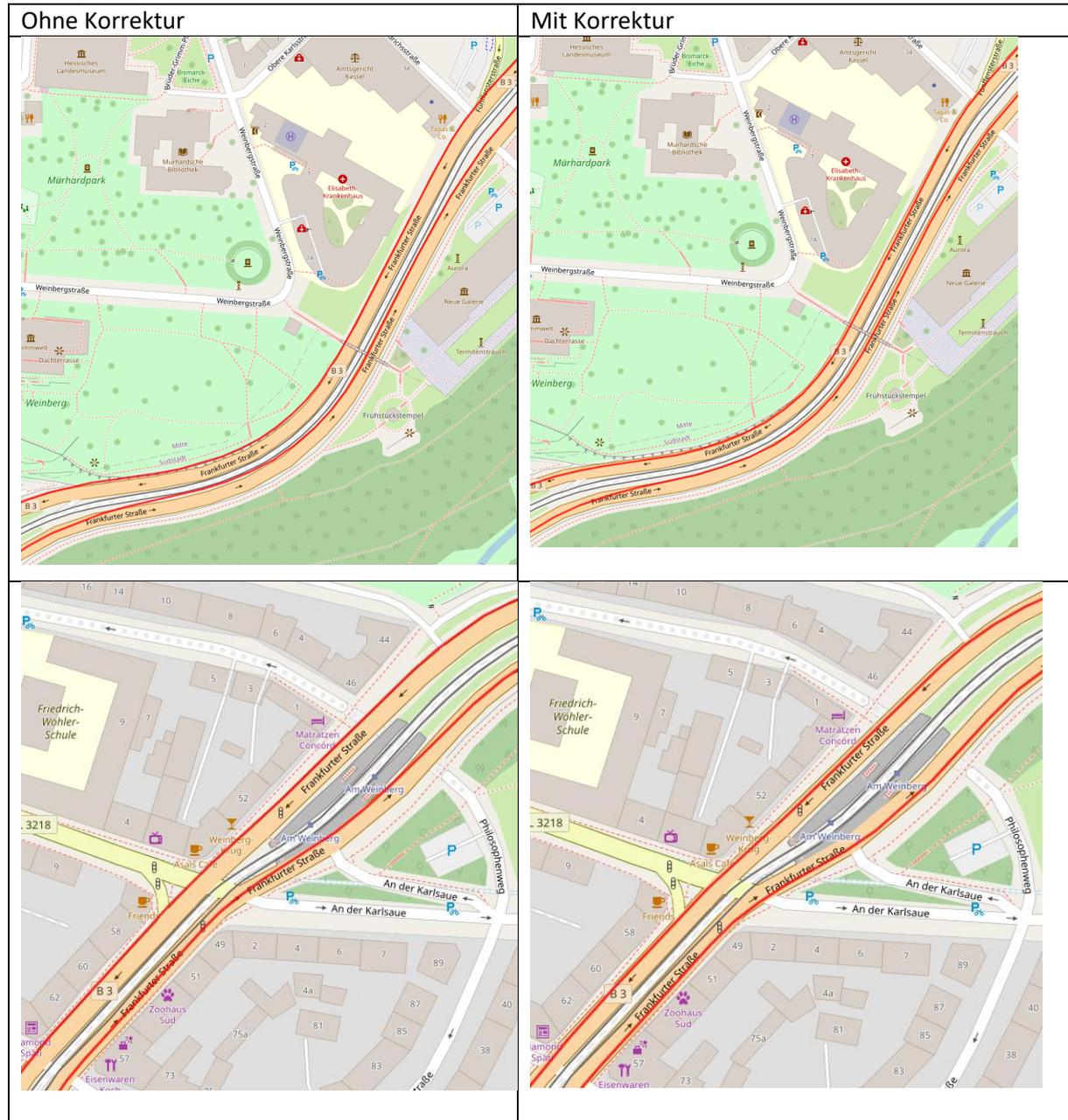
Es wurden Testfahrten ohne Verwendung des Korrektursignals gemacht und Testfahrten, bei denen der GNSS-Chip das Korrektursignal verwendet hat.

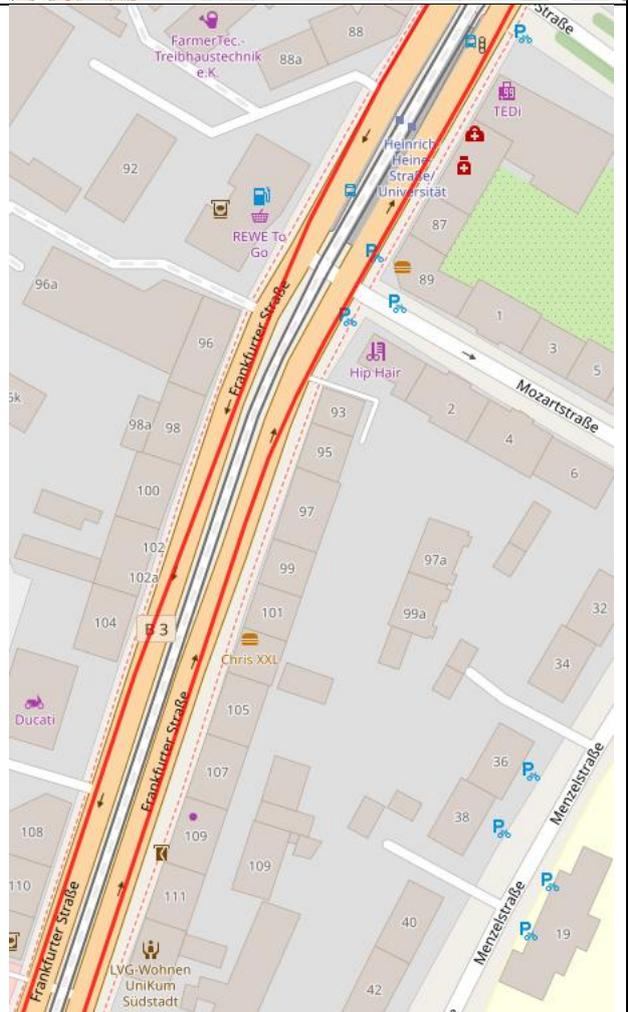
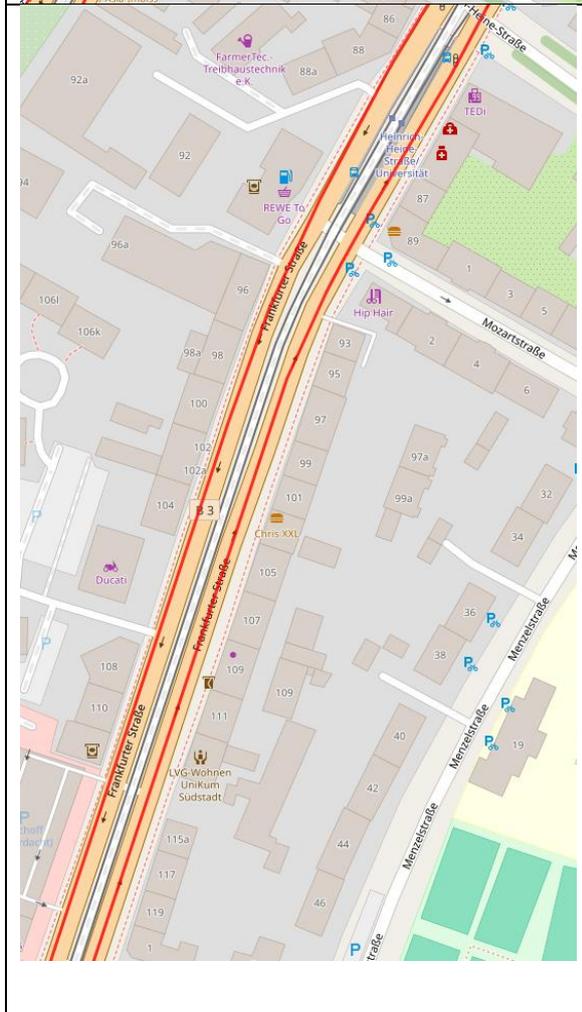
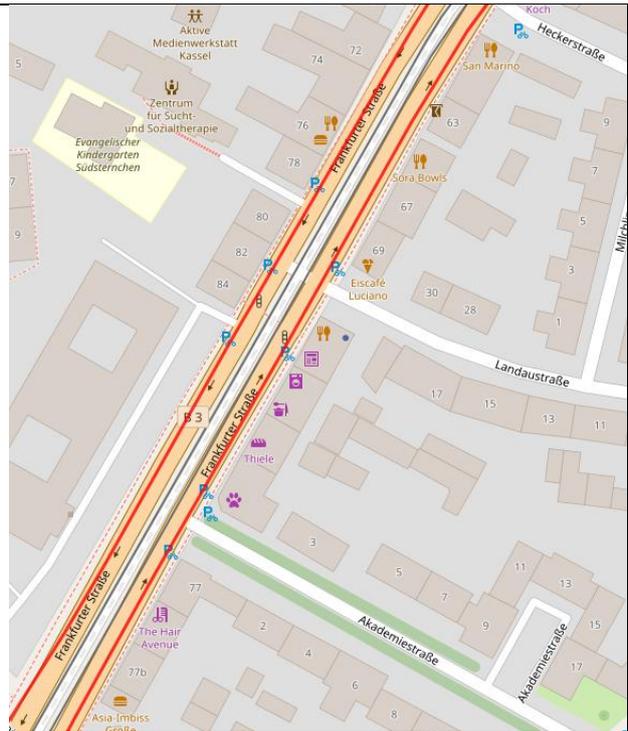
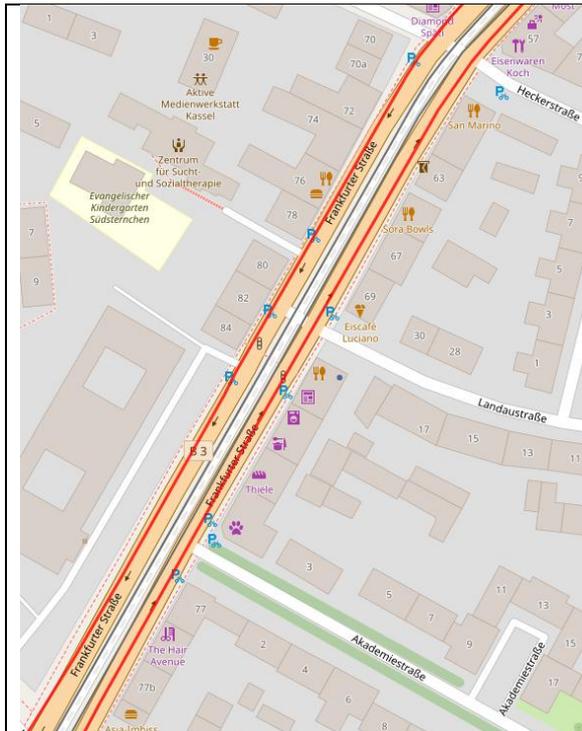


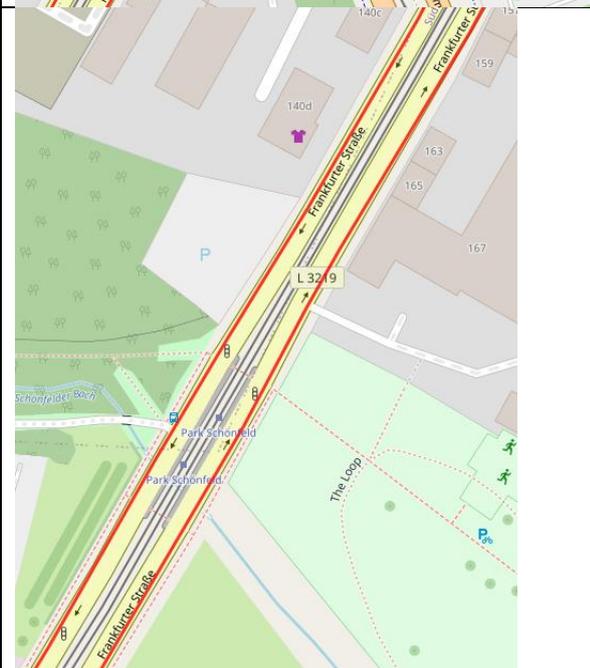
Abbildung 3: Überblick Teststrecke Frankfurter Straße in Kassel

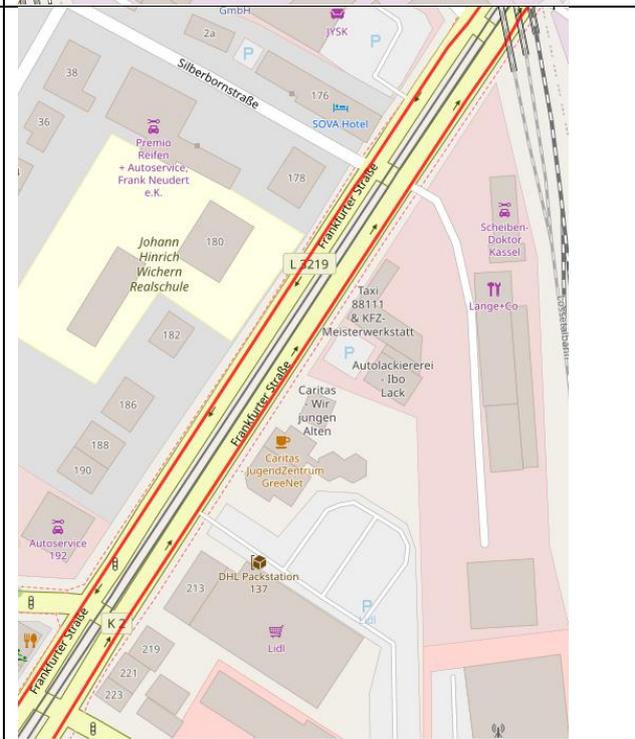
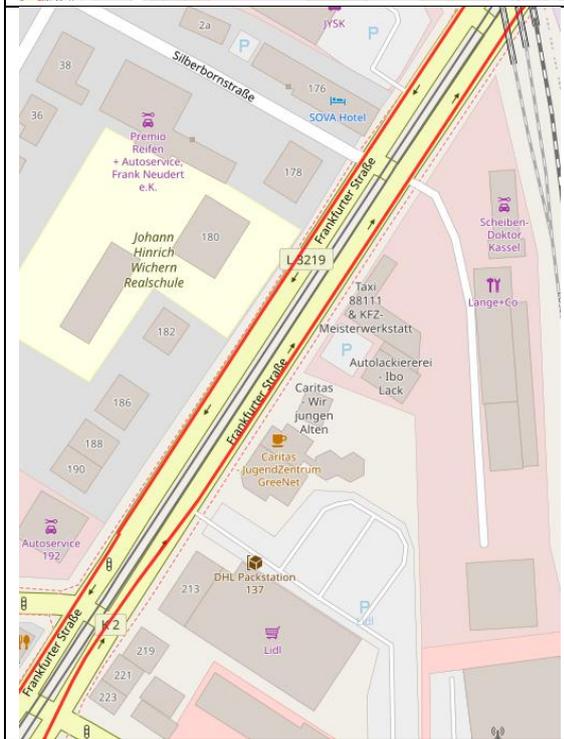
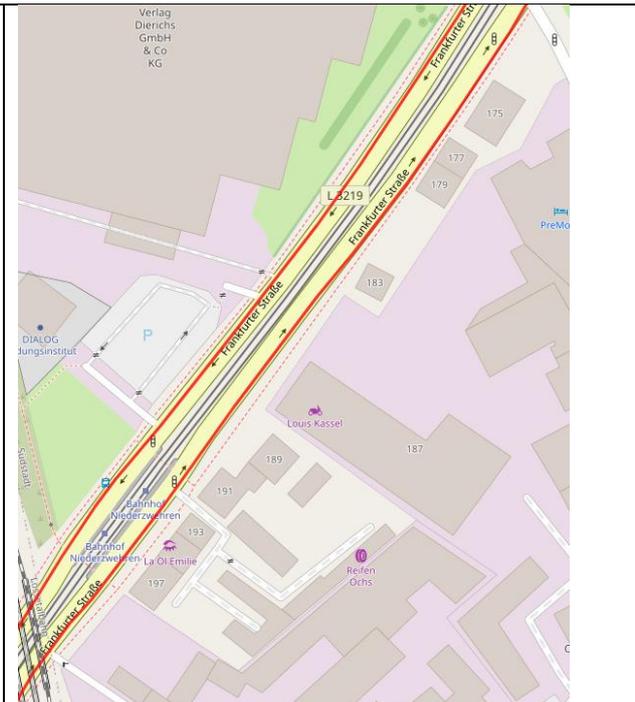
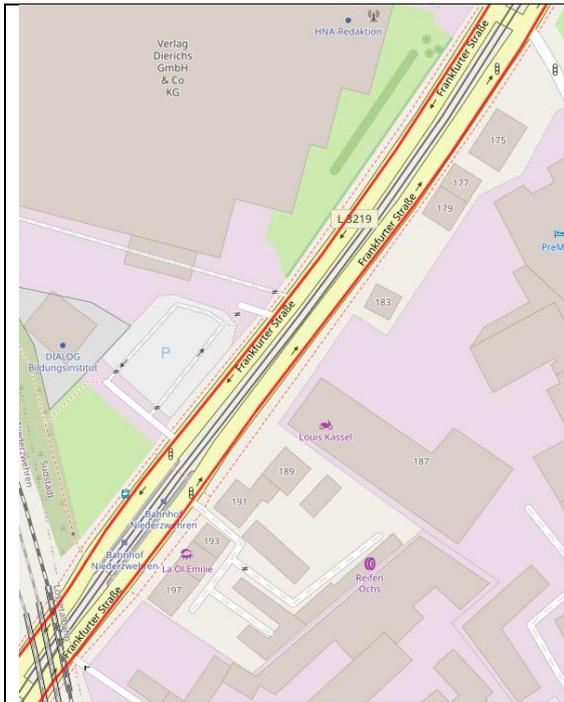
3.4. Bewertung der Testfahrten

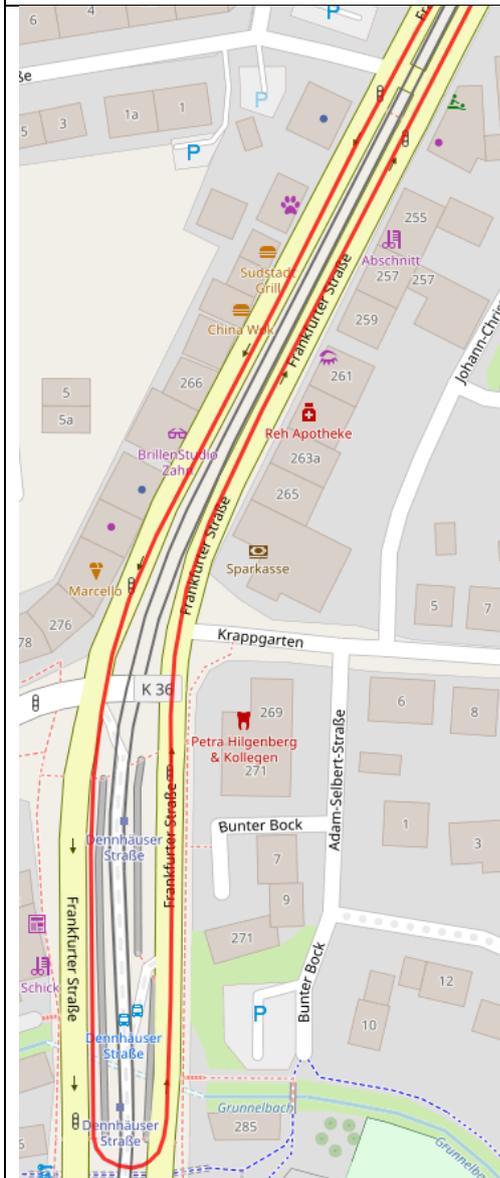
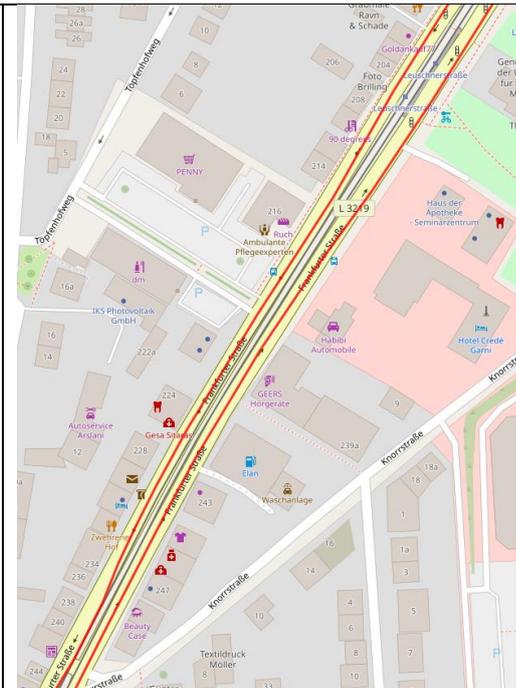
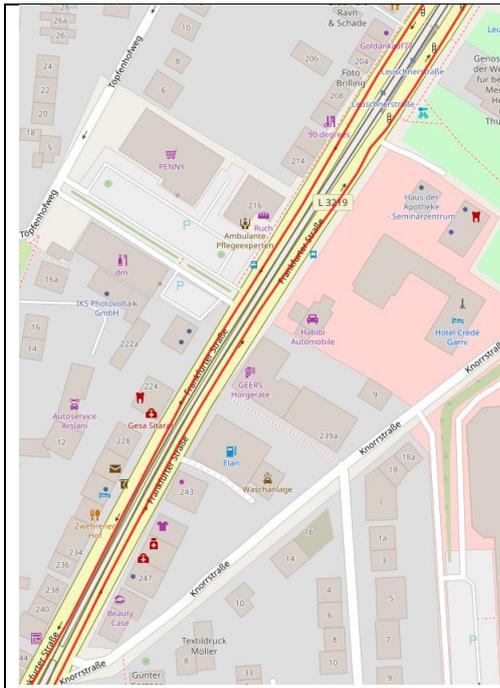
In der zugrunde liegenden Machbarkeitsstudie sind folgende Fragen untersucht worden: Ist es möglich, in einem geographische zusammenhängenden Gebiet, in dem Road Side Units verbaut sind, über die Road Side Units in einem Broadcast-Verfahren Korrekturnachrichten des Formats RTCM kontinuierlich so auszustrahlen, dass sie für eine Positionskorrektur mittels RTK verwendet werden können. Ist es möglich, diese Nachrichten mittels geeigneter Empfängerhardware zu empfangen (konkret mit einer On Board Unit OBU) und dem RTK fähigen GNSS so zur Verfügung zu stellen, dass er damit eine Positionskorrektur vornehmen kann.











Bemerkungen und Bewertungen der Fahrten

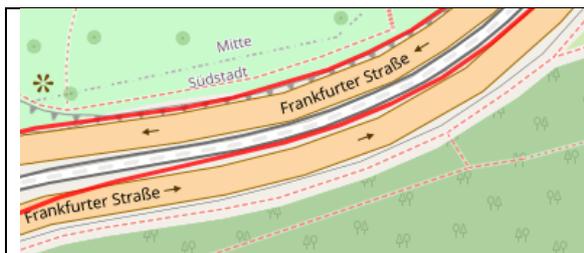
Die Ausstrahlung der RTCM Nachrichten als kontinuierlicher Korrekturdaten Stream ist gut gelungen. Die Nachrichten konnten von der Fahrzeug-OBU gut empfangen und an den RTK-fähigen GNSS Chip weitergegeben werden. In dem während der Testfahrten aufgezeichneten Logdatei der Aufzeichnung konnte man sehen, dass ein kontinuierlicher Strom an RTK-Nachrichten vorhanden war und der Chip immer im Korrekturmodus gearbeitet hat (fixed).

Die Strecke war gut mit Road Side Units ausgestattet, die auch in kurzen Abständen zueinander verteilt waren (300m - 500m).

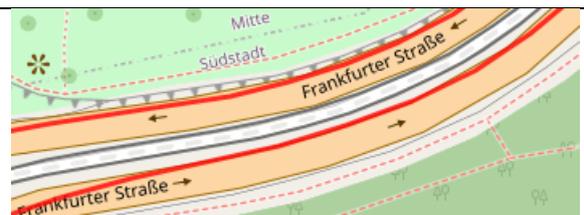
In möglichen weiteren Arbeiten könnte noch überprüft werden, inwieweit sich Empfangslöcher bemerkbar machen, d.h. geographische Punkte, bei denen kein RSU-Empfang vorhanden ist und damit auch keine Korrekturdaten zur Verfügung stehen. Bezogen auf ein Stadtgebiet und die Verwendung im Bereich ÖPNV-Beschleunigung sind die Korrekturen der Positionen insbesondere im Bereich der Lichtsignalanlagen interessant. Dort sind aber auch Road Side Units verbaut. Die Häuser entlang der Frankfurter Straße sind, mit wenigen Ausnahmen abgesehen, in der Regel vier geschossig gebaut. Damit ist zwar eine Häuserschlucht vorhanden, aber die Anzahl der frei zu empfangenen Satelliten ist immer ausreichend für ein gutes Ortungssignal.

Differenzbetrachtung

Im folgenden noch einige Stellen, an denen das Korrektursignal sehr gut half, die Positionsbestimmung zu verbessern.



Ohne Korrekturdaten liegt die Aufzeichnung etwas neben der Fahrspur



Mit Korrekturdaten liegt die Aufzeichnung exakt auf der gefahrenen Spur.



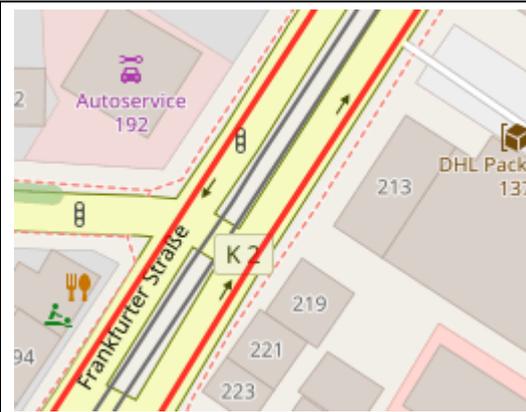
Ohne Korrekturdaten ist an dieser Stelle eine leichte GNSS-Drift zu sehen



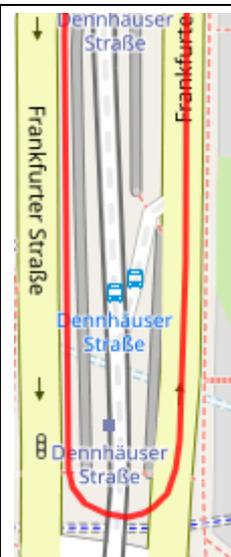
Mit Korrekturdaten liegt die Aufzeichnung exakt auf der gefahrenen Spur.



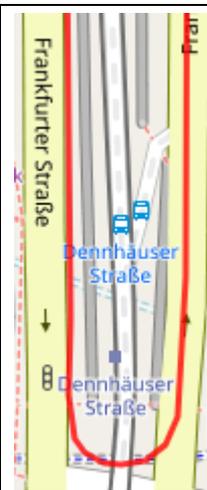
Ohne Korrekturdaten ist an dieser Stelle eine leichte GNSS-Drift zu sehen



Mit Korrekturdaten liegt die Aufzeichnung exakt auf der gefahrenen Spur.



Ohne Korrekturdaten ist die Aufzeichnung leicht neben der Fahrspur



Mit Korrekturdaten liegt die Aufzeichnung exakt auf der gefahrenen Spur.

4. Abschlussbemerkungen

Das Ziel der Machbarkeitsstudie war es, die Möglichkeit zu prüfen, inwieweit die RTCM Korrekturnachrichten für das RTK Verfahren über eine Road Side Unit (RSU) oder ein Netz von RSU's ausgestrahlt werden können, um sie in Fahrzeugen (oder anderen Verwendungen) zur Positionskorrektur herannehmen zu können. Die Nachricht RTCM gehört zu den ETSI G5 C-ITS Nachrichten, die in der Norm (DIN CEN ISO / TS 19091 Intelligente Transportsysteme – Kooperative IST – Nutzung von V2I und I2V-Kommunikation für Anwendungen bezogen auf Signalanlagen an Kreuzungen) aufgeführt sind. Der Schwerpunkt der Machbarkeitsstudie lag nicht darauf, die aufgezeichneten Fahrzeugpositionen mit und ohne RTK-Korrektur miteinander zu vergleichen und zu diskutieren.

Bei den Versuchsfahrten wurden natürlich die Fahrten mit RTK und ohne RTK miteinander verglichen. Zweck war es, herauszufinden, ob es neben der Log Datei des GNSS-Chips auch noch andere Hinweise gibt, ob sich die beiden Aufzeichnungen der Fahrten unterscheiden.

Grundsätzlich funktioniert die Ausstrahlung der RTCM Nachrichten und die weitere Verarbeitung in der RTK Positionskorrektur gut. Die gewählte Strecke war allerdings auch gut durch die RSU's ausgeleuchtet. Inwieweit die Korrektur noch bei Funklöchern bzw. bei vereinzelt RSU's noch funktioniert, wenn der RTCM Stream erst abreißt und dann wieder einsetzt, wurde hier nicht untersucht, weil die Ressourcen der Machbarkeitsstudie stark beschränkt waren.

Ein besonderer Dank geht an die Stadt Kassel, Straßen – und Tiefbauamt, Abteilung Verkehrsmanagement, die es erlaubt haben, für die Machbarkeitsstudie die städtischen RSU's zu nutzen. Ohne eine solche Kooperation und Unterstützung sind oft die Untersuchungen und die Weiterentwicklungen im Mobilitätsbereich überhaupt oder nur unter ganz starken Einschränkungen möglich.

5. Links und Verweise

[1] <https://www.oxts.com/de/rtk/>

[2] <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/>

[3] https://de.wikipedia.org/wiki/Radio_Technical_Commission_for_Maritime_Services

[4] https://de.wikipedia.org/wiki/Globales_Navigationssatellitensystem

[5] https://de.wikipedia.org/wiki/Satellitenpositionierungsdienst_der_deutschen_Landesvermessung

[6] https://de.wikipedia.org/wiki/European_Geostationary_Navigation_Overlay_Service

[7] <https://de.wikipedia.org/wiki/Koppelnavigation>

ISO DIN 19091: 2017(E): Kapitel 6.6. Broadcast GNSS Augmentation details

SAE J2735 DSRC Message List: #28 rcmCorrections