

Institut für Formale Methoden der Informatik

Universität Stuttgart
Universitätsstraße 38
D-70569 Stuttgart

Bachelorarbeit Nr. 100

Autonome Selbstlokalisierung und Tracking basierend auf Mobilfunkbasisstationen

Stephan Haas

Studiengang: inf
Prüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Stefan Funke
Betreuer/in: Dipl.-Inf. Martin Seybold

Beginn am: 10. Oktober 2013

Beendet am: 10. April 2014

CR-Nummer: K.8.1

Kurzfassung

Selbstlokalisierung ist in vielen Alltagssituationen hilfreich und für eine Vielzahl von Smartphone-Anwendungen unabdingbar. Nutzt man Kartendienste wie Google-Maps auf dem Mobilfunkgerät, so geschieht die Selbstlokalisierung mithilfe von GPS oder aber basierend auf den aktuell empfangbaren Mobilfunkbasisstationen und WLAN-Accesspoints.

Der GPS-Empfang kann jedoch aufgrund von Hindernissen eingeschränkt sein und ist darüber hinaus mit einem hohen Energiebedarf verbunden. Die Positionsbestimmung über Mobilfunkbasisstationen und WLAN-Accesspoints bedeutet immer die Offenbarung der eigenen Position gegenüber Dritten. In dieser Arbeit wurde ein Verfahren implementiert, das eine autonome Bestimmung der eigenen Position ermöglicht. Dieses Verfahren benötigt weder Zugang zu anderen Diensten oder dem Internet, noch GPS-Empfang, sondern hält alle benötigten Daten lokal auf der SD-Karte des Mobilfunkgeräts. Des Weiteren ist es möglich die eigenen Positionen über einen längeren Zeitraum aufzuzeichnen und diese aufgezeichnete Route mithilfe einer Desktop-Anwendung zu visualisieren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Verwendete Komponenten	9
2.1	Mobilfunkbasisstationen	9
2.2	OpencellID	10
2.3	Android Schnittstelle	10
2.4	OpenStreetMap	11
2.5	Mapsforge	11
3	Vorstellung der implementierten Anwendungen	13
3.1	Vorstellung der Android-App	13
3.2	Vorstellung der Desktop-Anwendung	14
4	Umsetzung des Projekts	17
4.1	Einbindung der Datenbank	17
4.2	Speicherformat der Logs	18
4.3	Umgang mit fehlerhaften Datenbankeinträgen	19
4.4	Berechnung der Schätzposition	21
5	Qualitätseinschränkende Faktoren	23
5.1	Netzabdeckung des Mobilfunkanbieters	23
5.2	Android Schnittstelle	23
5.3	Implementierung des Herstellers	24
5.4	Vollständigkeit der Datenbank	24
5.5	Korrektheit der Datenbank	24
6	Evaluation	27
6.1	Tatsächlich erreichte Präzision	27
6.2	Energieverbrauch	29
7	Zusammenfassung und Ausblick	33
	Literaturverzeichnis	35

Abbildungsverzeichnis

3.1	Bildschirme der Android-App	13
3.2	Hauptfenster der Desktop-Anwendung	15
3.3	Overlay einer ganzen erfassten Route	16
4.1	Beispiel eines Fehlerhaften Datenbankeintrags (Quelle: www.opencellid.org)	20
6.1	Unterschiedlich gute Schätzungen auf Basis mehrerer Mobilfunkmasten	28
6.2	Aufzeichnung eines Streckenabschnitts auf der A8	29
6.3	Aufzeichnung eines Fußwegs in der Ulmer Innenstadt	30

Tabellenverzeichnis

6.1	Energieverbrauch	30
-----	----------------------------	----

1 Einleitung

Heutzutage ist es selbstverständlich geworden, dass man die eigene Position jederzeit mithilfe seines Smartphones bestimmen kann. Meist geschieht diese Ortung über Kartendienste von Google oder anderer Anbieter und wird mittels GPS oder auf Grundlage der aktuell empfangbaren Mobilfunkbasisstationen oder WLAN-Accesspoints erreicht. Soll die Position des Geräts über längere Zeit ermittelt werden, so ist die Selbstlokalisierung via GPS extrem energieaufwendig. Ferner kann der GPS-Empfang durch Hindernisse wie Bäume oder Hochhäuser eingeschränkt sein, was den Einsatz dieses Verfahrens erschwert.

Um die aktuelle Position mittels der empfangenen Signale von Mobilfunkbasisstationen und WLAN-Accesspoints zu bestimmen, müssen diese Informationen zunächst zur Auswertung an einen Dritten gesendet werden. Für diese gesendeten Informationen über verfügbare Signale kann der Anbieter des Dienstes nun die Positionen der Sendeanlagen ermitteln und anschließend die Position des Mobilfunkgeräts auf Basis dieser Informationen schätzen. Bei dieser Methode kann jedoch nicht nachvollzogen werden, was mit den gesendeten Positionsdaten geschieht und es muss davon ausgegangen werden, dass diese sensiblen Daten nicht gelöscht, sondern weiterverwendet werden.

Um diese Einschränkung der Privatsphäre zu vermeiden, wurde in dieser Arbeit ein Verfahren zur Selbstlokalisierung entwickelt, welches zwar ebenfalls auf Mobilfunkbasisstationen beruht, bei dem sich jedoch alle benötigten Daten auf der SD-Karte des Mobilfunkgeräts befinden. Diese Daten stammen aus dem OpenCellID-Projekt [oci] und ermöglichen die Ermittlung der Positionen der empfangenen Sendeanlagen, sodass die Preisgabe der eigenen Position an den Anbieter des Kartendienstes vermieden werden kann.

Um auch das Anzeigen der eigenen Position unabhängig von Kartendiensten zu machen, verwendet die implementierte Software einen auf OpenStreetMap [osm] basierenden Kartensatz, der sich ebenfalls auf der SD-Karte des Mobilfunkgeräts befindet.

Im Zuge dieser Arbeit wurde weiterhin eine Desktop-Anwendung entwickelt, mit der aufgezeichnete Positionsschätzungen visualisiert werden können.

Nach Erläuterung der Grundlagen, auf denen die Implementierung basiert, werden die erstellten Anwendungen vorgestellt. Im Anschluss wird die Vorgehensweise bei der Entwicklung der Anwendungen erläutert. Da die mit diesem Verfahren erreichbare Präzision stark variieren kann, werden die wesentlichen Faktoren, die die Qualität der Positionsschätzung beeinflussen geschildert.

Nach der Implementierung der Anwendungen wurden diese ausführlich getestet. Wesentliche Ergebnisse dieser Tests werden am Ende dieser Arbeit präsentiert.

Gliederung

Die Arbeit ist in folgender Weise gegliedert:

Kapitel 2 – Verwendete Komponenten: Hier werden die Grundlagen dieser Arbeit beschrieben und die wesentlichen Bausteine der erstellten Anwendungen vorgestellt.

Kapitel 3 – Vorstellung der implementierten Anwendungen: Hier werden die Funktionen der implementierten Anwendungen vorgestellt.

Kapitel 4 – Umsetzung des Projekts beschreibt Details der Implementierung und den Umgang mit aufgetretenen Problemen.

Kapitel 5 – Qualitätseinschränkende Faktoren: Hier wird erläutert, wovon die zu erwartende Präzision der Positionsschätzungen abhängt.

Kapitel 6 – Evaluation: Hier wird ausgewertet, wie gut oder schlecht die erreichbare Präzision ist und mit wie viel Energieaufwand die, in dieser Arbeit entwickelte, Methode zur Selbstlokalisierung verbunden ist.

Kapitel 7 – Zusammenfassung und Ausblick fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und stellt Anknüpfungspunkte vor.

2 Verwendete Komponenten

In diesem Kapitel werden die verwendeten Bausteine vorgestellt, die für diese Arbeit maßgeblich waren.

2.1 Mobilfunkbasisstationen

Eine wesentliche Grundlage für diese Arbeit sind die Mobilfunkbasisstationen oder Mobilfunkmasten. Eine Mobilfunkbasisstation ist eine stationäre Sende- und Empfangseinrichtung für Funksignale des Mobilfunks. Für die Übermittlung der Signale haben sich verschiedene Standards entwickelt, von denen die für diese Arbeit relevanten hier aufgelistet sind.

1. Global System for Mobile Communications (GSM)
2. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)
3. Long Term Evolution (LTE)

Diese Standards unterscheiden sich wesentlich in den von ihnen erreichbaren Übertragungsraten. GSM ist der älteste, jedoch am weitesten verbreitete Standard. Diese weite Verbreitung ist für diese Arbeit von großer Bedeutung, was später näher erläutert wird.

Die Ortung via Mobilfunkbasisstationen setzt voraus, dass Signale, die das Mobilfunkgerät empfängt, einer eindeutigen Mobilfunkbasisstation zugeordnet werden können und dass deren Position bekannt ist. Die Zuordnung der Mobilfunkbasisstation ist dadurch möglich, dass jede dieser Stationen Kennzahlen besitzt, die diese eindeutig identifizieren. Diese Kennzahlen sind:

1. Der Mobile Country Code (MCC)
Der MCC ist eine dreistellige Nummer, die einen Mobilfunkmasten eindeutig einem Land oder einer Gruppe von Ländern zuordnet. Einigen größeren Ländern sind mehrere dieser Codes zugeordnet, wohingegen sich manche kleinere Länder einen MCC teilen.
2. Der Mobile Network Code (MNC)
Der MNC ist eine zweistellige Nummer, die innerhalb eines MCCs eindeutig einem Mobilfunknetz zugeordnet werden kann.
3. Der Location Area Code (LAC)
Der LAC ist eine bis zu zehnstellige Nummer, die innerhalb eines Mobilfunknetzes eindeutig einer bestimmten Region zugeordnet werden kann.

2 Verwendete Komponenten

4. Die CellID

Die CellID ist ebenfalls eine bis zu zehnstellige Nummer, die innerhalb einer Location Area nur einmal vergeben ist.

Diese vier Kennzahlen bilden zusammengenommen eine Art hierarchisch aufgebaute Adresse, über die sich jede Mobilfunkbasisstation auf der Welt eindeutig identifizieren lässt.

2.2 OpencellID

OpencellID ist ein Projekt, das GPS-Daten von GSM-Mobilfunkmasten kostenlos zur Verfügung stellt. Diese Daten werden von über 10.000 Benutzern weltweit mit Hilfe einer Android-Application („App“) gesammelt. Die einzelnen Messungen werden aggregiert und in einer Datenbank gesammelt, welche unter der Adresse www.opencellid.org kostenlos zur Verfügung gestellt wird. Da die Benutzer täglich neue Daten sammeln, verändert sich die Datenbank ständig. Die dieser Arbeit zugrunde liegende Datenbankversion vom 03.03.2014 enthält die Daten von circa 4,8 Millionen Mobilfunkmasten auf der ganzen Welt, davon allein etwa 840.000 in Deutschland.

In der Datenbank enthalten sind neben den, über die einzelnen Messungen gemittelten, Koordinaten eines Mobilfunkmasten auch dessen Kennzahlen. Des Weiteren enthält die Datenbank noch die Anzahl der Messungen, die zu den gemittelten Koordinaten geführt hat. Zusätzlich sind noch ein paar weitere Informationen verfügbar, beispielsweise über den Zeitpunkt des ersten Eintrags, welche aber für diese Arbeit nicht relevant sind.

Aus der Tatsache, dass die Datenbank ausschließlich von den Messungen der Nutzer gespeist wird, ergeben sich mehrere Nachteile. Zum einen ist sie keinesfalls vollständig und zum anderen handelt es sich bei den zur Verfügung gestellten Koordinaten nicht um die tatsächliche Position des Mobilfunkmasten, sondern vielmehr um eine Mittelung aller Punkte, von denen aus dieser Mast gemessen wurde.

2.3 Android Schnittstelle

Das Android Betriebssystem bietet dem Entwickler die Möglichkeit, über den sogenannten „TelephonyManager“ die verfügbaren Daten der Mobilfunkmasten in Reichweite abzufragen.

Dies kann auf zweierlei Arten geschehen. Zum einen können MCC, MNC, LAC und CellID des Masten, mit dem das Gerät derzeit verbunden ist (in der Folge Hauptmast genannt), abgefragt werden. Zum anderen ist es möglich über die Funktion „getNeighbouringCellInfo“ eine Liste der benachbarten Mobilfunkmasten anzufordern. Benachbart bedeutet in diesem Zusammenhang, dass von ihnen momentan ein Signal empfangen wird. In dieser Liste ist der Hauptmast jedoch nicht enthalten, sodass um alle verfügbaren Informationen zu erhalten, notwendigerweise beide Methoden verwendet werden müssen.

Die Daten des Hauptmasts sind, Mobilfunkempfang vorausgesetzt, immer zuverlässig und vollständig erhältlich, sodass eine Ortsschätzung, die auf Mobilfunkmasten basiert, stets mindestens einen Mast als Anhaltspunkt verwenden kann. Zu der von der Android-API zurückgegebenen Liste der benachbarten Mobilfunkmasten sind allerdings einige Anmerkungen zu machen:

1. Die Liste enthält nicht alle Mobilfunkmasten, die in Reichweite sind, sondern nur diejenigen, die zu dem Mobilfunknetz der aktuell eingelegtem SIM-Karte gehören.
2. Die Informationen zu LAC und CellID können nur für Masten ausgelesen werden, die den GSM-Standard verwenden, nicht jedoch für Masten mit UMTS oder LTE Standard.
3. Die Implementierung der Schnittstelle ist für die Gerätehersteller optional. Dies führt dazu, dass manche Hersteller, darunter auch Samsung, stets eine leere Liste zurückgeben, sodass lediglich die Information des Hauptmasts zur Ortsschätzung verwendet werden kann.

Eine weitere Möglichkeit an Informationen über verfügbare Mobilfunkmasten zu gelangen, ist die Methode „getAllCellInfo“. Diese Methode wurde jedoch bei dieser Arbeit nicht verwendet, da sie nur auf Geräten mit sehr aktuellen Androidversionen aufgerufen werden kann.

2.4 OpenStreetMap

OpenStreetMap (OSM) ist ein Projekt, welches sich zum Ziel gesetzt hat eine kostenlos und frei verfügbare Weltkarte zu erschaffen. Ähnlich wie bei OpenCellID werden die dafür benötigten Daten von einer Community zusammengetragen. Diese ist im Fall von OSM jedoch um ein vielfaches größer als die Community der Benutzer der OpenCellID-Sammel-App.

Dieses Projekt sammelt GPS-Daten von Flüssen, Häusern, Straßen, Ampeln und nahezu allen anderen unbeweglichen Objekten. Zum Teil sind sogar GPS-Daten von Mobilfunkbasisstationen in der Datenbank enthalten. Diese sind jedoch für die Selbstlokalisierung unbrauchbar, da zwar die Position des Mobilfunkmasten eingetragen ist, nicht jedoch seine Kennzahlen.

2.5 Mapsforge

Mapsforge [mf] ist eine Bibliothek, die ein schnelles Rendering von Kartendaten auf einem Android-Gerät ermöglicht. Diese Kartendaten basieren auf dem OpenStreetMap-Projekt und werden auf dem Speicher des Android-Geräts gehalten, sodass kein Internetzugang erforderlich ist um diese Karten darzustellen. Zudem bietet Mapsforge eine umfangreiche Bibliothek zum Erstellen von Overlays auf den gerenderten Karten.

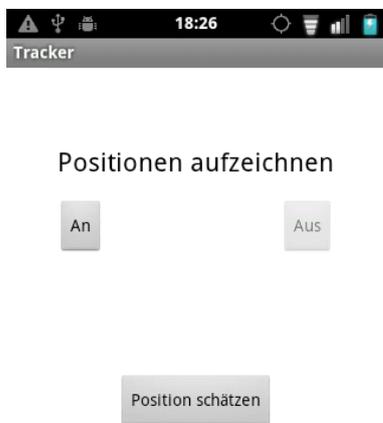
3 Vorstellung der implementierten Anwendungen

In diesem Kapitel werden sowohl die Android-App, als auch die Desktop-Anwendung vorgestellt und deren Funktionen und Benutzerschnittstellen erklärt.

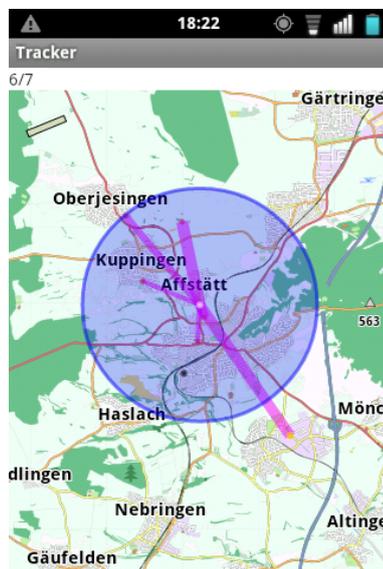
3.1 Vorstellung der Android-App

Die für diese Arbeit erstellte Android-App bietet folgende Funktionalitäten:

1. Es ist möglich eine Ortsschätzung aufgrund der momentan empfangenen Mobilfunkmasten auf einer Karte anzuzeigen. Hierbei werden auch alle Informationen, die für diese Schätzung verwendet wurden, angezeigt. Dies ermöglicht es dem Benutzer die Qualität der Schätzung einzuordnen.



(a) Startbildschirm der App



(b) Kartenbildschirm der App

Abbildung 3.1: Bildschirme der Android-App

3 Vorstellung der implementierten Anwendungen

2. Ein permanentes Aufzeichnen der Mobilfunkmasten in Reichweite ist ebenfalls möglich. Diese Aufzeichnungen werden verschlüsselt auf der SD-Karte des Geräts abgespeichert und können mit der Desktop-Anwendung geöffnet werden.

Wenn die App gestartet wird, erscheint zunächst der Startbildschirm, der in Abbildung 3.1 (a) dargestellt ist. Hier hat der Benutzer die Möglichkeit, das Aufzeichnen der Positionen ein- und auszuschalten oder durch Betätigen des unteren Buttons die Karte aufzurufen.

Entscheidet sich der Benutzer dafür die Karte aufzurufen, erscheint nach einer kurzen Ladezeit, in der die Datenbank nach den Koordinaten der verfügbaren Mobilfunkmasten durchsucht wird, der Ausschnitt einer Mapsforge-Karte (Siehe Abbildung 3.1 (b)).

Auf dieser Karte befinden sich eine Reihe verschiedener Overlays, die jeweils eine bestimmte Information enthalten. Der große blaue Kreis, der um die aktuell geschätzte Position geschlagen ist, soll dem Benutzer vermitteln, dass die ermittelte Position keine perfekte Schätzung, sondern nur eine grobe Annäherung ist.

Der gelbe Punkt stellt die Position des Mobilfunkmasts dar, mit dem das Gerät aktuell verbunden ist. Die roten Punkte stellen die Positionen der anderen Mobilfunkmasten in Reichweite dar. Der weiße Punkt befindet sich an der aktuell geschätzten Position.

Falls der GPS-Empfänger des Gerätes aktiviert ist, befindet sich darüber hinaus an der Position, die von der GPS-Schnittstelle als aktuelle Position angegeben wird, ein schwarzer Punkt. Diese GPS-Position wird lediglich zu Evaluationszwecken angezeigt und wird von der Android-App sonst nicht benötigt. Die magentafarbenen Linien verbinden jeweils einen Mobilfunkmast und den aktuellen Schätzpunkt. Hierbei ist die Dicke der Linie proportional zur empfangenen Signalstärke des Masts.

Des Weiteren ist in der linken, oberen Ecke eine Anzeige angebracht, die dem Benutzer einen Einblick geben soll, warum eine Schätzung gerade besonders viele oder auch wenige Mobilfunkmasten miteinbezieht.

In der Anzeige steht:

Die Anzahl der Masten für die ein Eintrag in der Datenbank gefunden wurde „/“ Die Anzahl der Masten in Reichweite

Letzteres soll dem Benutzer Aufschluss darüber geben, ob tatsächlich wenige Mobilfunkbasisstationen empfangen werden oder ob andere Gründe zu einer eventuell schlechten Schätzung führen.

Die Karte kann mittels intuitiver Gesten über den Touchscreen verschoben werden. Ebenso lässt sich das Zoomlevel der Karte einfach einstellen.

3.2 Vorstellung der Desktop-Anwendung

Mit der Desktop-Anwendung soll der Benutzer der Android-App die aufgezeichneten Routen, die er gegangen oder gefahren ist, visualisieren können und somit nachvollziehen, wo er ungefähr gewesen

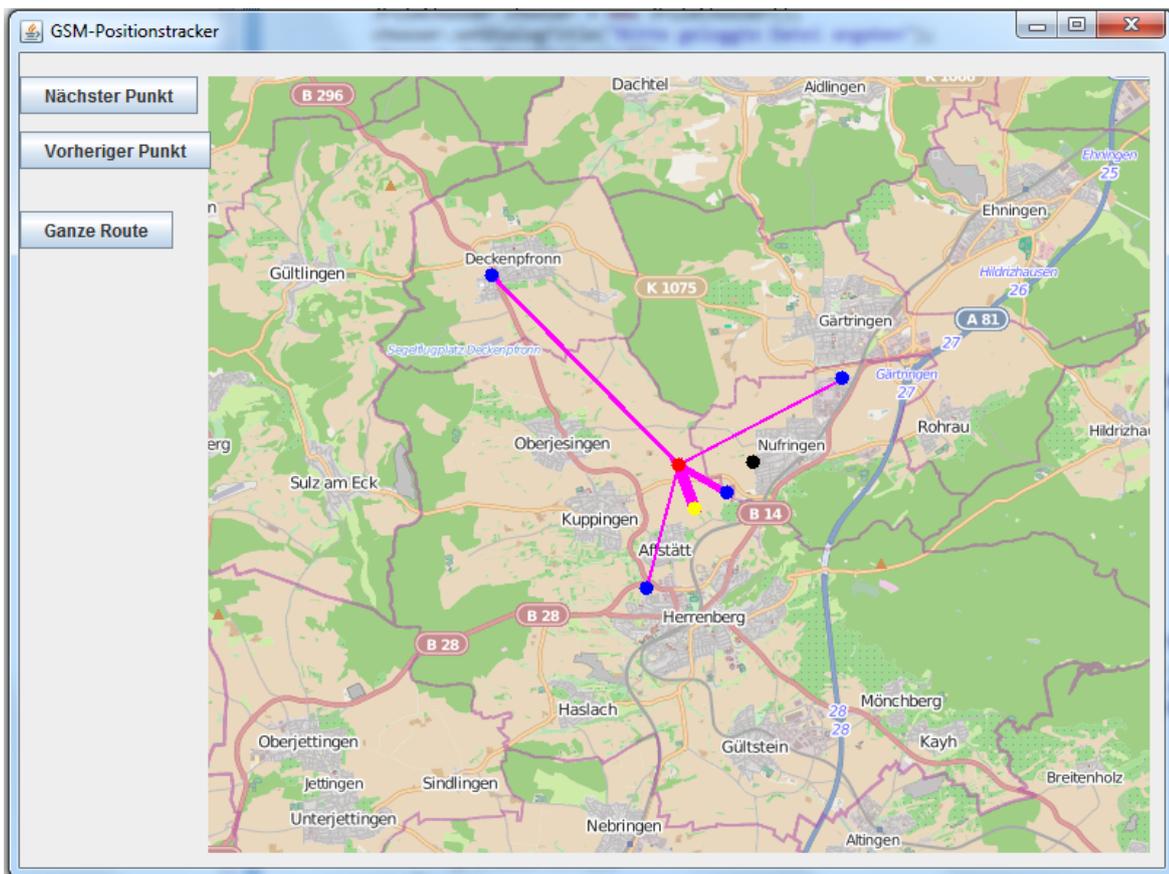


Abbildung 3.2: Hauptfenster der Desktop-Anwendung

ist.

Beim Start der Anwendung wird der Benutzer zunächst aufgefordert, das Verzeichnis anzugeben, in welchem sich die Datenbank befindet. Anschließend wird er mit einem weiteren Dialogfenster dazu aufgefordert, die Logdatei, die er gerne auswerten möchte, zu bestimmen. Diese wird hierbei automatisch in einen separaten Ordner kopiert, welcher der Anwendung als Archiv dient.

Hat der Benutzer sowohl eine Datei, als auch ein Verzeichnis angegeben, in dem sich eine korrekt formatierte Datenbank befindet, erscheint das Fenster, welches den Kern der Benutzerschnittstelle der Desktop-Anwendung darstellt, siehe Abbildung 3.2. Auf der rechten Seite befindet sich eine Karte, die auf die erste Schätzposition in der angegebenen Logdatei zentriert ist. Des Weiteren sind auf der Karte die, von der Android-App bekannten, Overlays des ersten Schätzpunktes der Datei eingezeichnet. Bei der Karte handelt es sich um eine OpenStreetMap Karte. Um diese Karte darzustellen werden die benötigten Kartenausschnitte als „Kacheln“ bei Bedarf von einem Kartenserver des Projekts heruntergeladen.

Auf der linken Seite des Fensters befinden sich einige Buttons, die es dem Benutzer ermöglichen, durch das Logfile zu navigieren.

Um dies zu tun, hat der Benutzer verschiedene Optionen. Er kann sich die Messungen Punkt für

3 Vorstellung der implementierten Anwendungen

Punkt inklusive aller Overlays anzeigen lassen, indem er wiederholt auf den Button „Nächster Punkt“ klickt. Um etwaiges versehentliches Klicken rückgängig machen zu können, kann der Benutzer auch mit Klick auf den Button „Vorheriger Punkt“ den zuletzt gesehenen Punkt erneut aufrufen. Sollte das Ende der Datei erreicht sein oder versucht werden, sich den vorherigen Punkt des ersten Eintrags anzeigen zu lassen, so wird der Benutzer mit einem Label darauf hingewiesen. Sollte eine fehlerhafte Messung in der Datei enthalten sein, so wird dies ebenfalls über das Label mitgeteilt. Mit Klick auf den Button „Ganze Route“ erscheinen auf der Karte alle Ortsschätzungen vom Anfang der Datei, bis zu dem Zeitpunkt, an dem sich in der Datei die Zeile befindet, welche signalisiert, dass ab dort eine neue Messreihe beginnt. Um hierbei die Übersicht zu bewahren, werden nicht alle Overlays der Messungen angezeigt, sondern lediglich die geschätzten Positionen und, falls verfügbar, die GPS-Positionen zu den Messzeitpunkten (siehe Abbildung 3.3). Durch erneuten Klick auf den Button „Ganze Route“ erscheint das Overlay der jeweils nächsten erfassten Route.

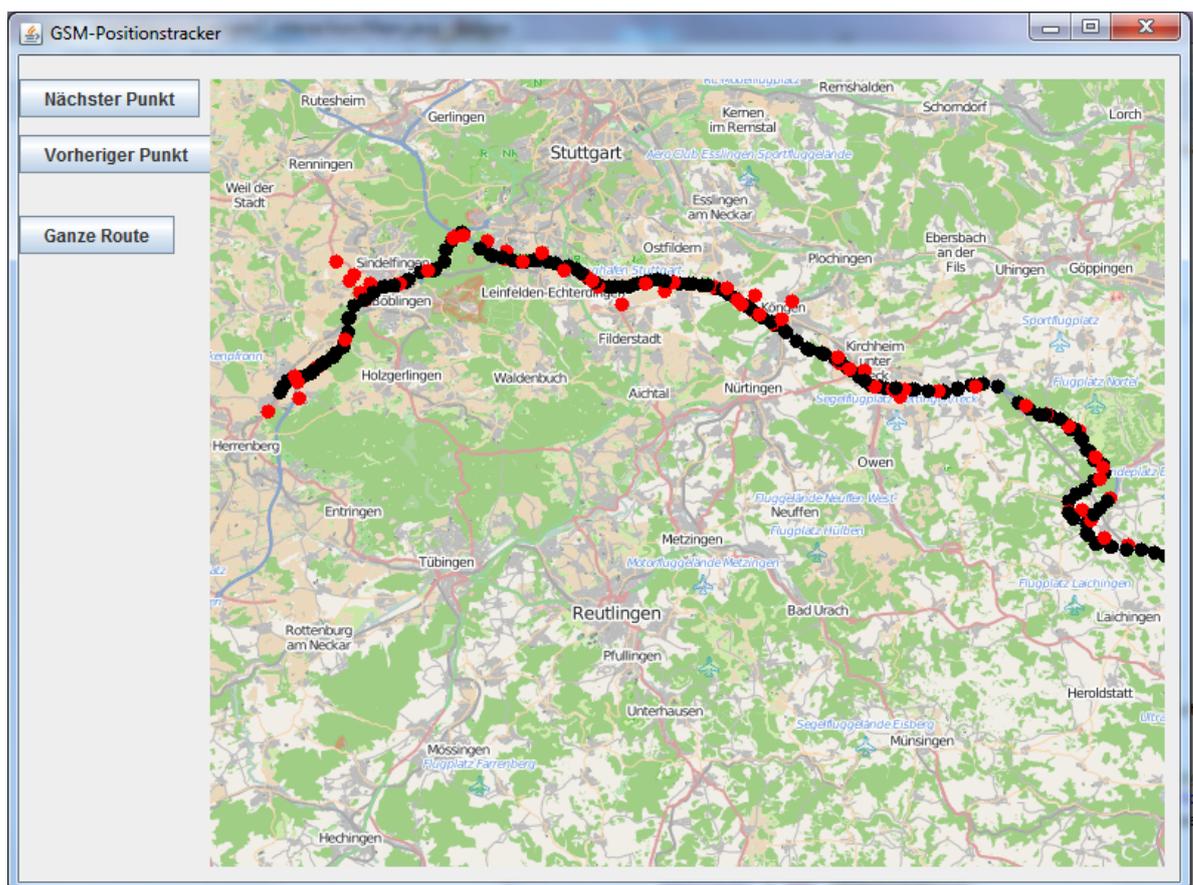


Abbildung 3.3: Overlay einer ganzen erfassten Route

4 Umsetzung des Projekts

In diesem Kapitel wird auf einige Komponenten der Applikationen näher eingegangen und es werden die Lösungsansätze für aufgetretene Probleme vorgestellt.

4.1 Einbindung der Datenbank

Das Android SDK bietet die Möglichkeit, eine Datenbank direkt als SQLite-Datenbank zu importieren. Bei diesem Ansatz wird die gesamte Datenbank in den Hauptspeicher geladen und es kann mit Hilfe von SQL-Befehlen auf sie zugegriffen werden. Üblicherweise stehen jeder Android-App 32MB Arbeitsspeicher zur Verfügung. Die OpenCellID-Datenbank ist jedoch über 400MB groß und kann daher auf diese Weise leider nicht eingebunden werden. Um dieses Problem zu umgehen und gleichzeitig einen schnellen Zugriff auf beliebige Daten sicherzustellen, wurde die Datenbank in drei Schritten vorverarbeitet, sodass ein anderes Zugriffsverfahren angewendet werden kann.

1. Schritt: Jedem Mobilfunkmast in der Datenbank wurde eine eindeutige Kennzahl zugewiesen, bestehend aus dem zugehörigen MCC, MNC, LAC und seiner CellID. Hierbei wurden sowohl der Location Area Code, als auch die CellID mit führenden Nullen auf die maximale Länge dieser Kennzahlen gebracht. Dies ist notwendig, um Eindeutigkeit zu erreichen. Anderenfalls hätten LAC = 111 CellID = 11 und LAC = 11, CellID = 111 den gleichen Code.

Beispiel: Angenommen ein Mast steht in Deutschland (MCC = 262), gehört zum T-Mobile Netz (MNC = 01) hat den Location Area Code 17754 und die CellID 550432. Die maximale Länge von LAC und CellID betrage zehn Ziffern. Daraus ergibt sich der eindeutige Code des Masten als: 2620100000177540000550432. Somit hat jeder dieser Codes exakt die Länge von 25 Ziffern.

2. Schritt: Die Datenbankeinträge werden nach dem in Schritt 1 generierten Code aufsteigend sortiert.
3. Schritt: Die sortierte Datenbank wird in 4096 Dateien zerstückelt, wobei jede Datei gleich viele Einträge enthält. Hierbei wird jeder Datei der Code (Schritt 1) ihres ersten Eintrags als Name (im weiteren Verlauf Schlüssel genannt) zugewiesen. Parallel dazu wird eine weitere Datei erstellt, in der sämtliche Schlüssel aufsteigend aufgelistet werden.

Beim Start der Android-App wird zunächst aus den in der Schlüsseldatei enthaltenen Schlüsseln ein Binärbaum erstellt, wobei jedes Blatt einem Schlüssel entspricht und in jedem inneren Knoten der kleinste Schlüssel seines linken Unterbaums und der kleinste Schlüssel seines rechten Unterbaums steht.

Eine Anfrage an die Datenbank sieht so aus, dass für eine Kombination MCC, MNC, LAC, CellID die dafür in der Datenbank hinterlegten Koordinaten des Handymasts ausgegeben werden sollen.

Um eine solche Anfrage zu bearbeiten, wird zunächst wie in Schritt 1 ein Code erstellt und anschließend, startend bei der Wurzel, der Baum nach diesem Code wie folgt durchsucht:

Wenn der Code kleiner ist als der kleinste Wert des rechten Unterbaums, durchsuche den linken Unterbaum, sonst durchsuche den rechten Unterbaum.

Sobald ein Blatt erreicht wird, wird die Datei, die den Schlüssel als Namen hat, nach dem Code zeilenweise durchsucht und falls dieser gefunden wird, erhält man als Ergebnis die Koordinaten des Mobilfunkmastes, dem dieser Code entspricht.

Das Traversieren des Baums ist extrem schnell möglich, da nur $\log(4096) = 12$ Knoten besucht werden müssen. Für das vollständige zeilenweise Durchsuchen der im Blatt des Baums gefundenen Datei, sind bei der aktuellen Größe der Datenbank etwa 1000 Leseoperationen notwendig, sodass eine Anfrage an die Datenbank sehr schnell beantwortet wird. Selbst bei vielen Mobilfunkmasten in Reichweite und somit vielen Datenbankabfragen ist die Antwortzeit für eine Positionsschätzung in Messungen stets unter einer halben Sekunde geblieben.

4.2 Speicherformat der Logs

Um die Daten, die mit der Android-App erfasst werden, in der Desktop-Anwendung benutzen zu können, werden diese über den Umweg einer Datei von der App an die Desktop-Anwendung weitergegeben.

Für diese Daten wurde ein Speicherformat verwendet, bei dessen Entwicklung drei Punkte im Fokus standen. Zunächst einmal sollten die Daten möglichst einfach zu verwenden sein. Weiterhin sollten nach Möglichkeit alle verfügbaren Daten abgespeichert werden. Denn je mehr Daten der Desktop-Anwendung zur Verfügung stehen, desto mehr Funktionalität und Präzision kann mit der Anwendung erreicht werden. Des Weiteren sollten die Daten durch eine Verschlüsselung vor Unbefugten gesichert sein, um die darin enthaltenen Standortsverläufe vertraulich zu halten.

Um all diesen Ansprüchen gerecht zu werden, wurde folgendes Format für die Sicherung der Daten verwendet:

Zeitpunkt, Geschätzte Position, # Masten, GPS-Flag, {Mobilfunkmast}, (GPS-Position)

Hierbei bedeuten:

Zeitpunkt: Der Unix-Timestamp des Android-Geräts zum Zeitpunkt der Aufzeichnung der Messdaten

Geschätzte Position: Die gemittelte (Siehe Mittelung) Position der Mobilfunkmasten im Format Längengrad, Breitengrad

Masten: Die Anzahl der Masten, von denen zum Messzeitpunkt ein Signal empfangen wurde und für die auch MCC, MNC, LAC und CellID ermittelt werden konnten

GPS-Flag: Ein Bool'scher Wert, der angibt ob zusätzlich zur geschätzten Position auch eine GPS-Position mitgeschrieben wurde

{Mobilfunkmast}: Hier stehen dem Wert von # Masten entsprechend viele Mobilfunkmasten im Format MCC, MNC, LAC, CellID, Signalstärke

(GPS-Position): Falls der Wert der GPS-Flag = 1 ist, steht hier die GPS-Position des Gerätes zum

Messzeitpunkt.

Die einzelnen Größen werden, durch Kommata getrennt, zusammengefügt, anschließend verschlüsselt und als Zeile in die Log-Datei geschrieben. Somit entspricht jede Zeile einer geloggtten Datei genau einer Messung.

Um verschiedene Messreihen in der Log-Datei speichern zu können, wird zu Beginn einer jeden Aufzeichnung eine spezielle Zeile eingefügt. Dies ermöglicht es der Anwendung einen zusammenhängenden „Messweg“ als Ganzes anzuzeigen. Sollte ein Fehler auftreten oder sollten keine Masten und somit auch keine Schätzung verfügbar sein, so wird ebenfalls eine spezielle Zeile als Fehlerindikator eingefügt.

4.3 Umgang mit fehlerhaften Datenbankeinträgen

Zum Teil befinden sich mehrere Mobilfunkmasten mit gleichen Kennzahlen, jedoch verschiedenen Koordinaten in der OpencellID-Datenbank.

Um einen Hinweis darauf zu erhalten, welcher der Standorte am ehesten der realen Position des Masten entsprechen könnte, wurde in dieser Arbeit die Anzahl der Messungen, aufgrund derer die jeweilige Position zustande kam, als Kriterium herangezogen. Grundlage dieses Ansatzes ist die Vermutung, dass die Wahrscheinlichkeit einer korrekten Messung größer ist, als die Wahrscheinlichkeit einer fehlerhaften Messung. Somit sollten Einträge, die auf vielen Messungen basieren eher dazu tendieren korrekt zu sein als Einträge für identische Kennzahlen mit weniger Evidenz.

Diese Anzahl der Messungen könnte dazu verwendet werden bei mehreren Einträgen mit den selben Kennzahlen alle Masten aus der Datenbank zu löschen, mit Ausnahme desjenigen, für den die meisten Messungen existieren.

Da die Anzahl der Messungen jedoch vermutlich nicht immer einen korrekten Rückschluss auf die tatsächliche Position eines Masten zulässt und somit eventuell der korrekte Eintrag zugunsten eines unkorrekten Eintrags gelöscht werden könnte, wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, Einträge zu löschen.

Stattdessen wurde die Datenbank zusätzlich zur in Abschnitt 4.1 geschilderten Sortierung absteigend nach der Anzahl der Messungen je Mast sortiert. Beim Auslesen eines Masts aus der Datenbank, wird die jeweilige Datei zeilenweise nach den Kennzahlen durchsucht, was dazu führt, dass bei mehreren Einträgen für identische Kennzahlen nun immer der Mast mit den meisten Messungen zurückgegeben wird, da dieser in der Datei weiter vorne gelistet ist. Somit konnte das Kriterium der Messpunktzahl angewendet werden, ohne Einträge zu löschen, welche später eventuell benötigt werden könnten.

Die Positionen der Mobilfunkmasten in der OpencellID-Datenbank entsprechen, wie in 2.2 erwähnt, nicht immer den tatsächlichen Positionen und befinden sich mitunter sogar nichtmals in deren Nähe.

In Abbildung 4.1 ist ein solcher Fehlerhafter Datenbankeintrag zu sehen. Der schwarz markierte Mast befindet sich laut Datenbank mitten im Atlantischen Ozean. Diese Position ist die Mitte zwischen den zwei schwarz eingezeichneten Punkten, an denen die Sensorik des Mobiltelefons, auf dem die Sammel-App lief, festgestellt hat, dass von besagtem Mast ein Signal empfangen wird. Die eine

4 Umsetzung des Projekts

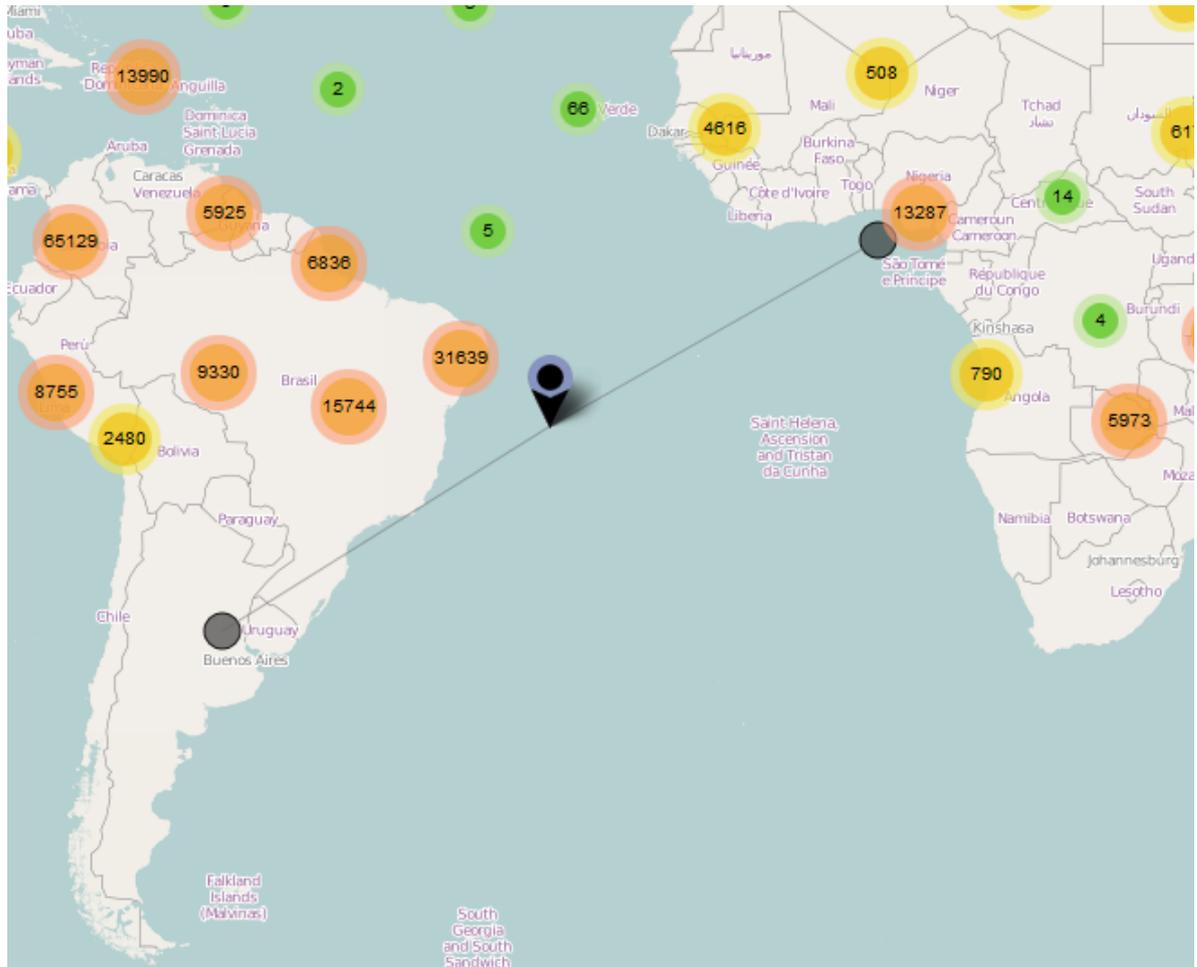


Abbildung 4.1: Beispiel eines Fehlerhaften Datenbankeintrags (Quelle: www.opencellid.org)

Messung fand in Argentinien, die andere Messung vor der Afrikanischen Küste statt. Um solche fehlerhaften Masten zu erkennen und einen Einfluss solcher Masten auf die Positionsschätzung auszuschließen, wurde folgendes Verfahren verwendet: Als erster Schritt wird für jeden Masten die jeweilige Entfernung zum derzeitigen Schätzwert ermittelt. Sollte eine dieser Entfernungen mehr als 30 Kilometer betragen, kann davon ausgegangen werden, dass mindestens ein Mast fehlerhaft in der Datenbank eingetragen ist, da die maximale Reichweite eines Masten ca. 30 Kilometer beträgt. Abhängig von der Anzahl der Masten, die für die Positionsschätzung zur Verfügung stehen wird dann wie folgt verfahren:

1. Fall: Es sind zwei Masten vorhanden, von denen die Position bekannt ist:
In diesem Fall wird als neue Schätzposition derjenige Mast angegeben, der näher an der letzten Schätzposition liegt, falls eine solche existiert. Wenn diese vorausgegangene Schätzposition nicht existiert, werden beide Masten für die Positionsschätzung verwendet, da nicht entschieden werden kann, welcher Eintrag fehlerhaft ist.

2. Fall: Es sind mehr als zwei Masten vorhanden, von denen die Position bekannt ist:
Der Mast, der die größte Entfernung zur aktuellen Schätzposition hat, wird entfernt und die Schätzposition wird neu berechnet. Anschließend werden die Entfernungen neu berechnet und im Falle einer erneuten Abweichung von mehr als 30 Kilometern wird das Verfahren erneut angewendet.

Falls nur die Position eines einzelnen Masten bekannt ist, erübrigt sich die Distanzbestimmung, weil die Schätzposition in diesem Fall identisch zur Position des Mobilfunkmasten ist. Das heißt jedoch auch, dass der Einfluss eines Fehlers in der Datenbank nur dann aus der Positionsschätzung herausgehalten werden kann, wenn mehrere Masten für die Schätzung verwendet werden.

Selbst in diesem Fall können Fehler nur erkannt und korrigiert werden, wenn die korrekten Masten überwiegen.

4.4 Berechnung der Schätzposition

Um eine Positionsschätzung vornehmen zu können, müssen notwendigerweise zunächst die Koordinaten mindestens eines empfangenen Mobilfunkmasten verfügbar sein. Für den Fall, dass lediglich die Koordinaten von genau einem Masten zur Verfügung stehen, entspricht die Schätzposition genau diesen Koordinaten.

Interessant wird die Berechnung der Schätzposition erst bei mehreren verfügbaren Koordinaten. In diesem Fall spielen, zusätzlich zu den Koordinaten der Masten, die empfangenen Signalstärken eine entscheidende Rolle.

Da in der Datenbank keine Informationen über die Reichweite oder die Leistung der jeweiligen Mobilfunkbasisstationen enthalten sind, müssen diese in dieser Arbeit als für alle Masten identisch angenommen werden. Die Schätzposition wird daher als gewichtetes Mittel über die Signalstärken angenommen. Als Formel ausgedrückt bedeutet dies:

$$\text{Längengrad} = \frac{\sum_{\text{Masten } i} (\text{Längengrad}(i) * \text{Signalstärke}(i))}{\sum_{\text{Masten } i} \text{Signalstärke}(i)}$$

Analog erfolgt die Berechnung des Breitengrades.

5 Qualitätseinschränkende Faktoren

In diesem Kapitel werden die vielzähligen Faktoren erläutert, die einen Einfluss auf die Präzision der Schätzung mithilfe von GSM-Mobilfunkbasisstationen haben.

Diese Faktoren kommen auf ganz unterschiedlichen Ebenen zum Tragen und werden hier in der Reihenfolge vorgestellt, in der sie auftreten oder in der man sich mit ihnen befassen muss.

5.1 Netzabdeckung des Mobilfunkanbieters

Um Positionsschätzungen aufgrund von Mobilfunkbasisstationen durchzuführen, werden trivialerweise eben diese Stationen benötigt. Weiterhin ist ersichtlich, dass die Präzision der Schätzung mit einer zunehmenden Anzahl an verfügbaren Masten eher zu- als abnimmt. Daher ist die fundamentalste Einschränkung der erreichbaren Präzision die Anzahl der Mobilfunkmasten, in deren Reichweite sich das Gerät tatsächlich befindet.

Wie in Abschnitt 2.3 geschildert, kann man sich von dem Android-Gerät nur diejenigen Mobilfunkmasten ausgeben lassen, die zum Netz des Anbieters gehören, dessen SIM-Karte in dem Smartphone benutzt wird. Daher ist die Menge der Mobilfunkmastdaten, die maximal an einer Position verfügbar sind, offensichtlich nach oben durch die Anzahl der in der Gegend befindlichen Masten des Mobilfunkanbieters beschränkt. Dies führt dazu, dass die Android-App für zwei Geräte mit unterschiedlichen SIM-Karten an einer identischen Position in der Regel zwei verschiedene Schätzungen liefern wird, die in ihrer Qualität ebenfalls völlig unterschiedlich sein können.

5.2 Android Schnittstelle

Bevor man sich über die Qualität der Daten Gedanken machen kann, muss man zunächst Daten erhalten haben. Diese Daten können ausschließlich von der Hardware des Geräts erfasst werden und auf diese Hardware kann nur mittels der Android-API zugegriffen werden. Aus diesem Grund spielt diese eine entscheidende Rolle für die Qualität der Schätzung.

Die API beschränkt die Qualität der Messungen erheblich dadurch, dass das Ermitteln des LAC und der CellID benachbarter Mobilfunkmasten nur für GSM-Masten, nicht jedoch für UMTS- oder LTE-Masten möglich ist. Hierdurch wird ein nicht unerheblicher Teil der an sich verfügbaren Mobilfunksignale für die Auswertung unbrauchbar.

5.3 Implementierung des Herstellers

Ein weiterer limitierender Faktor, dem die Menge der verfügbaren Masten unterliegt, ist die Implementierung der Android-Schnittstellen durch den Gerätehersteller.

Wie bereits in Abschnitt 2.3 geschildert, sind die Hersteller von Android-Geräten nicht verpflichtet, die für die Positionsbestimmung mittels Mobilfunkmasten wesentliche Schnittstelle, nämlich die „GetNeighbouringCellInfo“, tatsächlich zu implementieren. Dies führt dazu, dass einige Hersteller, darunter leider auch Samsung, diese Schnittstelle so implementieren, dass sie stets eine leere Liste zurückgibt.

Wenn diese Liste jedoch leer ist, kann die Positionsschätzung nur auf Grundlage eines einzelnen Masten erfolgen und ist somit inhärent sehr unpräzise. Da ein Mobilfunkmast bis zu 30 Kilometer Reichweite hat und bei nur einem verfügbaren Masten nicht davon ausgegangen werden kann, dass man sich näher an diesem einen Masten befindet, kann in diesem Fall keine höhere Genauigkeit garantiert werden.

5.4 Vollständigkeit der Datenbank

In den vorherigen Punkten wurden verschiedene Faktoren beschrieben, die die Quantität der zur Verfügung stehenden Mobilfunkmasten beeinflussen. Für die Positionsbestimmung können jedoch nur diejenigen dieser Masten verwendet werden, die auch in der OpencellID-Datenbank enthalten sind, weil nur dort das Matching zwischen den Kennzahlen des Mobilfunkmasten und seiner vermuteten Position geschieht.

Aufgrund der Tatsache, dass die Datenbankeinträge nur dadurch zustande kommen, dass ein Benutzer der OpencellID-App an einem bestimmten Punkt bestimmte Masten empfängt, sind auch nur diejenigen Mobilfunkmasten in der Datenbank enthalten, die sich in der Nähe von solchen Messungen befanden. Deshalb variiert die Vollständigkeit der Datenbank erheblich abhängig davon, in welchem Gebiet man sich befindet. Weiterhin kann die Datenbankabdeckung für ein Gebiet ebenfalls stark vom Mobilfunkanbieter abhängen, da die Sammel-App von OpencellID auch nur die von der Android-Schnittstelle zur Verfügung gestellten Daten erfassen kann. Somit kann ein Benutzer der Sammel-App nicht alle Masten in einem Gebiet erfassen, sondern ausschließlich die des Anbieters des eigenen Geräts.

Hierdurch kann es im Extremfall passieren, dass die Abdeckung in der Datenbank für Masten eines Anbieters A erheblich besser ist, als die der Masten von Anbieter B, obwohl die tatsächliche Abdeckung mit Mobilfunkmasten von Anbieter B in diesem Gebiet deutlich besser ist, als die von Anbieter A.

5.5 Korrektheit der Datenbank

Wie in Abschnitt 2.2 erläutert, sind die Koordinaten eines Eintrags in der OpencellID-Datenbank in der Regel nicht die tatsächlichen Koordinaten des Mobilfunkmasten, sondern lediglich Schätzungen. Diese Schätzungen basieren auf den von Benutzern der OpencellID-Sammel-App gesammelten Daten. Die Koordinaten eines Mobilfunkmasten in der Datenbank kommen also durch das Aggregieren aller

Messpositionen zustande, von denen aus ein Signal des Masten empfangen werden konnte. Diese Abweichungen der Positionen in der Datenbank von den realen Positionen führen zwangsläufig dazu, dass die Selbstlokalisierung aufgrund dieser Daten ebenfalls unpräzise wird. Extreme Abweichungen etwa wie in Abbildung 4.1 können mittels der aus Abschnitt 4.3 bekannten Fehlererkennung erkannt und aus der Schätzung herausgehalten werden. Für kleinere Abweichungen (im einstelligen Kilometerbereich) ist dies jedoch nicht möglich. Diese „kleineren“ Abweichungen entstehen jedoch auf natürliche Art und Weise bei der Sammlung von Positionsdaten eines Masten, da sich die Benutzer der Sammel-App meistens auf Straßen bewegen und somit Mobilfunkmasten in der Datenbank dazu neigen, näher an den vielbefahrenen Straßen zu liegen, als das in der realen Welt der Fall ist.

6 Evaluation

In diesem Kapitel wird zunächst die Präzision des vorgestellten Selbstlokalisierungsverfahrens evaluiert. Anschließend wird der Energieverbrauch dieser Methode mit dem Energieverbrauch einer kontinuierlichen Positionsakquisition via GPS verglichen.

6.1 Tatsächlich erreichte Präzision

Bei der tatsächlich erreichten Präzision muss zwischen verschiedenen Szenarien unterschieden werden.

6.1.1 Schätzung auf Basis eines einzelnen Masten

Wie bereits beschrieben kann es aus mehreren Gründen oftmals vorkommen, dass nur ein Mobilfunkmast für die Positionsschätzung zur Verfügung steht. In solchen Szenarien kann selbst für den Fall, dass der Eintrag des verfügbaren Mobilfunkmasten in der Datenbank korrekt ist, keine bessere Qualitätsschranke als die 30 Kilometer garantiert werden, die der maximalen Reichweite eines Mobilfunkmasten entsprechen.

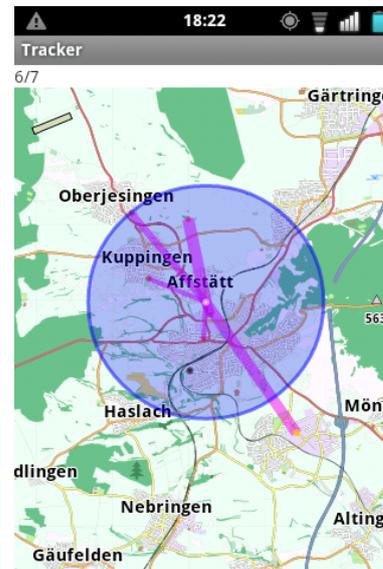
In der Praxis zeigt sich jedoch, dass eine nur auf einem Mobilfunkmasten basierende Schätzung meist nicht mehr als fünf Kilometer von der tatsächlichen Position abweicht. Wenn sich das Mobilfunkgerät zum Zeitpunkt der Schätzung in direkter Nähe zu der Position befindet, die in der Datenbank für den verfügbaren Mobilfunkmasten eingetragen ist, kann es sogar dazu kommen, dass Schätzposition und reale Position übereinstimmen. Dies geschieht jedoch äußerst selten und wird hier nur der Vollständigkeit wegen erwähnt.

6.1.2 Schätzung auf Basis mehrerer Masten

Wie in Abbildung 6.1 erkennbar kann die Präzision der Positionsschätzung in Szenarien mit mehreren verfügbaren Mobilfunkmasten zwar erfreulich gut sein, jedoch kann eine Präzision im Bereich unter einem Kilometer auch in diesen Fällen nicht garantiert werden. Grundsätzlich zeigt sich in der Praxis, dass Schätzungen auf Basis mehrerer Mobilfunkmasten erwartungsgemäß dazu tendieren näher an die tatsächliche Position des Mobilfunkgeräts heranzukommen.



(a) Gute Präzision, circa 100 Meter



(b) Schlechte Präzision, circa 1.5 Kilometer

Abbildung 6.1: Unterschiedlich gute Schätzungen auf Basis mehrerer Mobilfunkmasten

6.1.3 Nachvollziehbarkeit eines Routenverlaufs

Ein Routenverlauf, der mittels der Android-App aufgezeichnet wurde kann mithilfe der Desktop-Anwendung visualisiert werden. Auf dieser Makroebene ist nicht die Präzision einer einzelnen Messung entscheidend, sondern die Frage ob eine aufgezeichnete Route nachvollzogen werden kann. Abbildung 6.2 zeigt die Auswertung einer Messreihe auf der A8. Hierbei handelt es sich bei den schwarzen Punkten um die GPS-Positionen, bei den roten Punkten um die mithilfe des neuen Verfahrens geschätzten Positionen. Es ist erkennbar, dass die gefahrene Route trotz abweichender Schätzpositionen recht gut nachvollzogen werden kann.

Abbildung 6.3 zeigt die Auswertung einer Messreihe eines Fußwegs in der Ulmer Innenstadt mit den bekannten farbigen Punkten. Hier ist festzustellen, dass eine Rekonstruktion der Route auf Basis der geschätzten Positionen völlig ausgeschlossen ist.

Diese zwei gezeigten Beispiele spiegeln sehr gut wider, in welchen Fällen ein Tracking der Route sinnvoll ist und in welchen nicht. Grundsätzlich ist bei längeren Strecken eine erfreulich gute Rekonstruktion der Route möglich, wohingegen die Daten für eine Rekonstruktion von Kurzstrecken aufgrund ihrer hohen Ungenauigkeit ungeeignet sind.



Abbildung 6.2: Aufzeichnung eines Streckenabschnitts auf der A8

6.2 Energieverbrauch

Um eine Aussage über den Energieverbrauch machen zu können wurde die Android-App in zwei Messreihen je fünf Stunden auf einer Autofahrt durchgängig ausgeführt. Bei der einen Messreihe wurde die aktuelle Position periodisch mittels GPS erfasst, bei der anderen Messreihe mittels des vorgestellten, auf Mobilfunkbasisstationen basierenden, Verfahrens.

Auf jeder Fahrt wurde die App auf zwei Geräten parallel ausgeführt. Beim einen Gerät handelt es sich um ein Xperia der Marke Sony Ericson, beim anderen um ein Samsung S4 Mini. Ersteres ist ein eher älteres Modell, wohingegen das Samsung auf einem recht aktuellen Stand der Technik ist.

Um tatsächlich ausschließlich die für die Selbstlokalisierung notwendige Energie zu ermitteln, wurde bei den Geräten das Display nicht eingeschaltet und alle anderen Verbraucher, soweit möglich, deaktiviert.

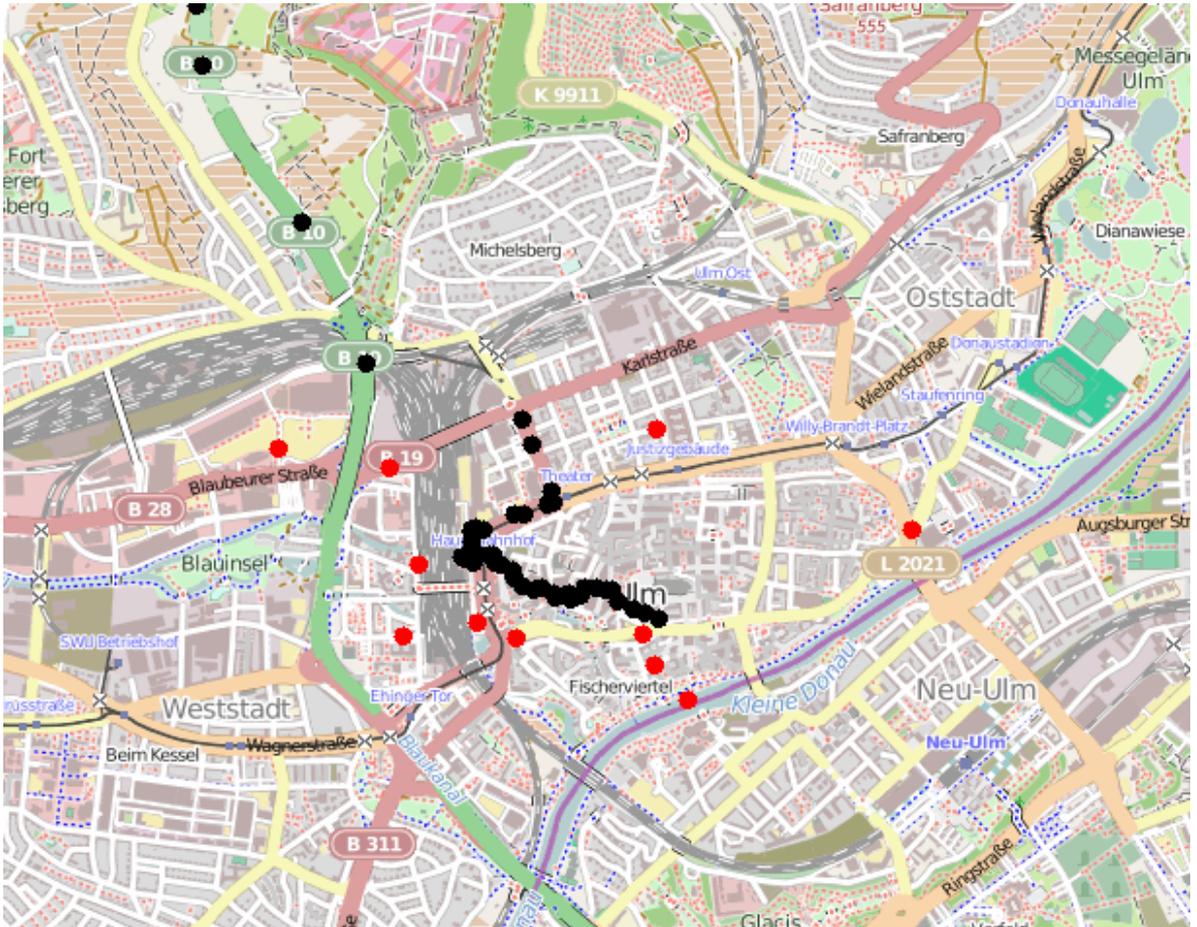


Abbildung 6.3: Aufzeichnung eines Fußwegs in der Ulmer Innenstadt

Gerät	GPS	Mobilfunkmasten
Sony Xperia	65%	0.5%
Samsung S4 Mini	2%	-

Tabelle 6.1: Beanspruchung des Akkus durch fünf Stunden periodische Positionsakquisition

In Tabelle 6.1 ist abgebildet, wie viel Energie, in Prozent des Akkuvolumens des jeweiligen Geräts durch fünf Stunden periodischer Positionsakquisitionen verbraucht wurde.

Die Zahlen stammen aus der Sensorik der Geräte, die eine Aufschlüsselung des Energieverbrauchs je Anwendung ermöglicht. Bei der Positionsbestimmung via Mobilfunkbasisstationen auf dem Samsung-Gerät war der Energieverbrauch in Relation zum Akkuvolumen so gering, dass er von der Sensorik nicht aufgeführt wurde.

Diese Zahlen belegen, dass die hier vorgestellte Methode zur Positionsermittlung mit einem erheblich geringeren Energiebedarf realisierbar ist, als die herkömmliche GPS-Methode.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine Android-App vorgestellt, die eine autonome Selbstlokalisierung auf Basis von Mobilfunkbasisstationen ermöglicht. Die dafür verwendeten Komponenten wurden vorgestellt und die Berechnung der Schätzpositionen wurde beschrieben. Des Weiteren wurde eine Desktop-Anwendung zur Visualisierung aufgezeichneter Positionsschätzungen vorgestellt.

Anschließend wurde auf Einschränkungen verschiedenster Natur hingewiesen, denen die Präzision der Positionsschätzungen unterliegt. Zum Abschluss wurde die tatsächlich erreichte Präzision evaluiert und eine vergleichende Analyse des Energiebedarfs geliefert. Während sich die Präzision der Selbstlokalisierung im Allgemeinen leider auf einem sehr niedrigen Niveau befindet, kann sie bei guten Bedingungen bis auf wenige hundert Meter genau sein.

Die Rekonstruktion längerer aufgezeichneter Strecken ist sehr gut möglich, wohingegen kurze Strecken kaum rekonstruierbar sind.

Ausblick

Die Evaluation hat gezeigt, dass eine autonome Selbstlokalisierung mithilfe von Mobilfunkbasisstationen mit sehr geringem Energieaufwand realisierbar ist. Jedoch lässt die Präzision der auf diese Weise ermittelten Positionsschätzungen zu wünschen übrig. Um diese Präzision zu erhöhen, könnte anstelle der hier verwendeten unpräzisen Open-Source-Datenbank eine kommerziell erworbene Datenbank verwendet werden, welche die realen Positionen der Mobilfunkmasten und keine fehlerhaften Einträge enthält. Idealerweise sollte diese Datenbank zusätzlich zu den Standorten der Masten auch deren Reichweite und maximale Signalstärke enthalten, damit diese bei der Positionsschätzung ebenfalls mit einfließen können.

Bei weiterer Verbreitung von Android-Geräten mit höheren Betriebssystemversionen könnte auch die Nutzung der neueren Android-Schnittstelle „getAllCellInfo“ interessant werden. Eventuell können über diese Schnittstelle auch die Kennzahlen von Mobilfunkmasten mit höheren technischen Standards als GSM erfasst werden und somit mehr Mobilfunkmasten in die Positionsschätzung miteinbezogen werden.

Für eine bessere Rekonstruierbarkeit der aufgezeichneten Routen könnte ein Algorithmus zum Mapmatching unpräziser Positionsschätzungen verwendet werden [EFH⁺ 11]

Literaturverzeichnis

[EFH⁺11] J. Eisner, S. Funke, A. Herbst, A. Spillner, S. Storandt. Algorithms for Matching and Predicting Trajectories. In *13th Meeting on Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX)*, S. 84–95. 2011. (Zitiert auf Seite 33)

[mf] Mapsforge. URL www.mapsforge.org. (Zitiert auf Seite 11)

[oci] OpenCellID. URL www.opencellid.org. (Zitiert auf Seite 7)

[osm] OpenStreetMap. URL www.openstreetmap.org. (Zitiert auf Seite 7)

Alle URLs wurden zuletzt am 09. 04. 2014 geprüft.

Erklärung

Ich versichere, diese Arbeit selbstständig verfasst zu haben. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt und alle wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommene Aussagen als solche gekennzeichnet. Weder diese Arbeit noch wesentliche Teile daraus waren bisher Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens. Ich habe diese Arbeit bisher weder teilweise noch vollständig veröffentlicht. Das elektronische Exemplar stimmt mit allen eingereichten Exemplaren überein.

Ort, Datum, Unterschrift