

Signalstärken-Matching und Map-Aiding-Methoden zur Positionsbestimmung von Mobilfunkteilnehmern in Echtzeit für Verkehrsprognosen

Alexander Beetz, Renate Czommer und Volker Schwieger

Zusammenfassung

Für moderne Verkehrssteuerung und modernes Verkehrsmanagement sind die Erfassung des aktuellen Verkehrs und eine verlässliche Verkehrsprognose unerlässlich. Gebräuchliche Methoden der Verkehrsdatenerfassung sind die Aufzeichnung lokaler Schleifendaten sowie GPS-basiertes Floating Car Data (FCD). Diese Methoden werden nun durch Floating Phone Data (FPD) ergänzt. FPD basiert auf Positionen von Mobilfunkteilnehmern, welche durch geeignete Map-Aiding-Methoden auf das digitale Straßennetzwerk eingepasst werden. Durch die erforderliche Verfügbarkeit von allen Mobilfunkteilnehmern zu einem Zeitpunkt muss die Positionsbestimmung zentral und netzwerkseitig geschehen und nicht auf Seite des Mobilfunkgerätes. Das heißt, es müssen keine Modifikationen am Mobilfunkgerät selbst durchgeführt werden, um dieses anhand von Mobilfunkdaten zu orten. Alle erforderlichen Daten werden anonymisiert vom Mobilfunkbetreiber gesammelt und vorverarbeitet. Dieser netzwerkseitige Ansatz wurde in einem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Projekt »Datenoptimierung für integrierte Telematik« (Do-iT) von April 2005 bis Ende März 2009 erforscht.

Summary

The basis of modern traffic control and management is the acquisition of the current traffic state and a reliable traffic prediction. Traditionally, local loop data and GPS-based floating car data (FCD) are the methods for traffic state acquisition. These methods are currently extended by so-called floating phone data (FPD) basing on positions of mobile phones that are matched on the digital road network with suitable map-aiding methods. Due to the required availability of all mobile phone positions at a time and at one computing centre, the positioning method has to be network-based and not handset-based. That means, it is not necessary to make any adaptations on mobile phones to compute positions with mobile phone data. All required data is collected and preprocessed by mobile phone providers anonymously. The network-based approach was investigated within the project »Data Optimisation for integrated Telematics« (Do-iT) granted by the German Federal Ministry of Economics and Technology from April 2005 up to March 2009.

Schlagworte: Mobilfunkortung, Map-Aiding, Verkehrslageerfassung, Signalstärkenmatching, Kalman Filter

1 Stand der Technik

Grundlegende Lokalisierungsverfahren mithilfe von Mobilfunkdaten werden bereits in Wiesmann (2000) vorgestellt und beschrieben. Da für die Umsetzung z.T. Modifikationen am Mobilfunkgerät selbst oder innerhalb der Netzinfrastruktur vorgenommen werden müssen, findet bei Wunderlich (2001) eine Einteilung dieser Verfahren statt, die auf Grundlage der Modifikation beruht. Eine weitere Verfeinerung dieser Unterteilung findet man in Jonssen & Olavesen (2002). Auf Grundlage dieser Lokalisierungsverfahren und der Einbeziehung von Straßendaten lassen sich im nächsten Schritt Floating Phone Data (FPD) generieren. Erste Erfahrungen, die mit Floating Phone Data gemacht wurden, wiesen darauf hin, dass Mobilfunkgeräte eine weitere preiswerte Möglichkeit zur Verkehrszustandserfassung darstellen. So zeigte das System RoDIN24 der Firma Applied Generics (inzwischen zu TomTom gehörend), dass Positionen von telefonierenden Verkehrsteilnehmern bestimmt und daraus Informationen über Geschwindigkeiten im Straßennetz abgeleitet werden können. Im Projekt »INTERMEZZO« wurde dieses System in der Praxis getestet, jedoch wurde nach bisherigen Erkenntnissen die Qualität dieser Ergebnisse nicht hinreichend validiert. Weitere Projekte, wie z.B. das EU-Projekt »STRIP« (vgl. Ygnace 2001) in Frankreich folgten, bei dem vielversprechende Ergebnisse zum Durchdringungsgrad und zur Korrelation zwischen FPD und Schleifendaten erzielt wurden. Schleifendaten werden auch heute noch vielfach zur Erfassung und Vorhersage von Verkehrsaufkommen benutzt und können zur Validierung von FPD herangezogen werden. Da jedoch in »STRIP« weiterer Forschungsbedarf in Bezug auf engmaschigere Straßennetze erkannt wurde, sollte nun »Do-iT« diese Lücke schließen. Hier stand die Entwicklung von Map-Aiding-Algorithmen (vgl. Hofmann-Wellenhof et al. 2003) und die Ableitung von Routen und Quelle-Zielmatrizen (Friedrich et al. 2010 und Schlaich 2010) im Vordergrund.

Während der Projektlaufzeit von »Do-iT« haben sich weitere Projekte in Deutschland mit dem Thema der FPD zur Verkehrserfassung beschäftigt. So z.B. das Projekt »Traffic Online« (vgl. TrafficOnline 2008), welches ebenfalls das Ziel hatte, Verkehrsinformationen aus Mobilfunkdaten abzuleiten. In diesem Projekt wurde jedoch die Positionsbestimmung durch Mustererkennung auf vorher gemessenen Referenzdaten realisiert und nicht

durch Planungsdaten wie in »Do-iT«. Hierbei wurden die Ergebnisse zur Erfassung von Mobilfunkteilnehmern zur flächendeckenden Störfallerkennung als eine Möglichkeit dargestellt. Weiter hat TomTom einen kommerziellen Dienst mit dem Namen »HD Traffic« auf den Markt gebracht. Dabei werden in Zusammenarbeit mit Vodafone hauptsächlich Mobilfunkdaten der A-Daten-Schnittstelle (vgl. Kap. 2 und Kap. 4.2) benutzt. Zum Verfahren selbst ist relativ wenig bekannt. Eine Zertifizierung für die Produktqualität von »HD Traffic« wurde vom TÜV Süd durchgeführt.

2 Einführung

Die Generierung von Floating Phone Data (FPD) nutzt den Vorteil der weiträumig vorhandenen Verfügbarkeit von Mobilfunkdaten ohne zusätzliche Infrastruktur im Fahrzeug oder auf den Straßen. Im Projekt »Do-iT«

Die Abis-Daten werden direkt hinter der Antenne (Base Station Transceiver – BTS) abgegriffen und an den FPD-Server weitergeleitet. Bei den A-Daten wird dies zwischen den Base Station Controllern (BSC) und dem Mobile-Services Switching Center (MSC) durchgeführt. Dadurch kann an der A-Daten-Schnittstelle ein wesentlich größeres Gebiet abgedeckt werden als an der Abis-Daten-Schnittstelle. Die BSC ist im GSM-Netz für die Verwaltung mehrerer BTS zuständig, die MSC für die Vermittlung der Gespräche im eigenen und in fremde Netze. Der interessierte Leser findet vertiefende Informationen hierzu in Walke (2001). Anhand der an den Schnittstellen erfassten Mobilfunkrohdaten können nun mithilfe von Referenzdaten (z.B. Straßenkarten und Signalstärkenkarten der Antennen) und entsprechender Algorithmen Positionsberechnungen durchgeführt werden. In weiteren Arbeitsschritten werden Priorisierungen für die Relevanz der Mobilfunkteilnehmer bei der Verkehrslageerfassung durchgeführt. Kann davon ausgegangen werden, dass der Mobilfunkteilnehmer aktiv am Straßenverkehr teilnimmt

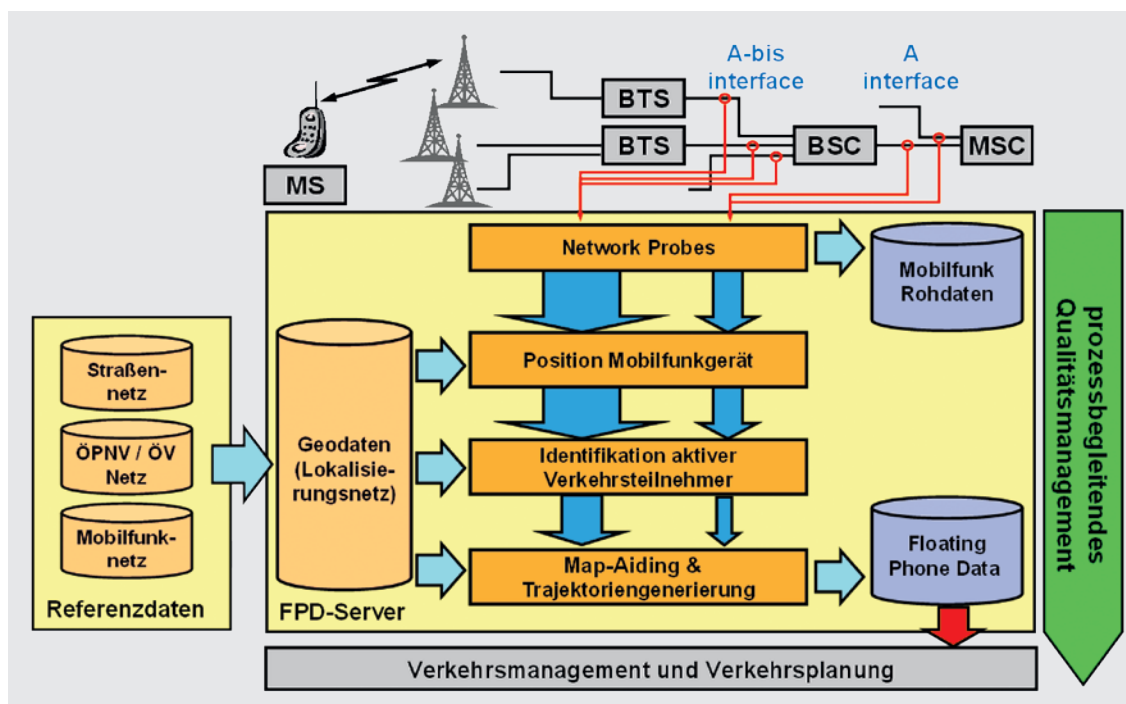


Abb. 1:
System-
architektur
FPD-Server
(vgl. Schwie-
ger et al.
2007)

übernimmt ein in das Netz des Mobilfunkbetreibers integrierter Server die Berechnung von FPD. Hierbei werden zwei Schnittstellen auf Mobilfunkseite benutzt: die Abis-Daten-Schnittstelle und A-Daten-Schnittstelle. Die Daten beider Schnittstellen beinhalten anonymisierte Informationen über das Verhalten von Mobilfunkteilnehmern (MS), aus denen dann Trajektorien generiert werden können. Die Schnittstellen selbst unterscheiden sich durch die unterschiedliche Detailliertheit der ausgegebenen Informationen. Abb. 1 zeigt die Systemarchitektur des in »Do-iT« entwickelten FPD-Servers mit der Position des jeweiligen Datenabgriffs.

(hier: PKW und LKW, kein ÖPNV) wird er durch Map-Aiding-Methoden auf das Straßennetz projiziert. Als Ergebnis erhält man Weg-Zeit-Diagramme und Routen, die auf Bewegungen der mithilfe der Priorisierung ermittelten Mobilfunkteilnehmer schließen lassen. Anschließend werden die so erzeugten FPD an Verkehrsmanagementsysteme zur Verkehrsprognose weitergeleitet. Prozessbegleitend wird ein durchgängiges Qualitätsmanagement durchgeführt (Laufer et al. 2009), auf das hier nicht näher eingegangen wird. Die beiden Verfahren zur FPD-Generierung und deren Anwendung werden nun im Verlauf des Artikels genauer beschrieben. In Abb. 2 wird das gesamte Projektgebiet für die Erfassung der Mobilfunkdaten gezeigt. Dabei wird nach den Daten der Schnittstellen

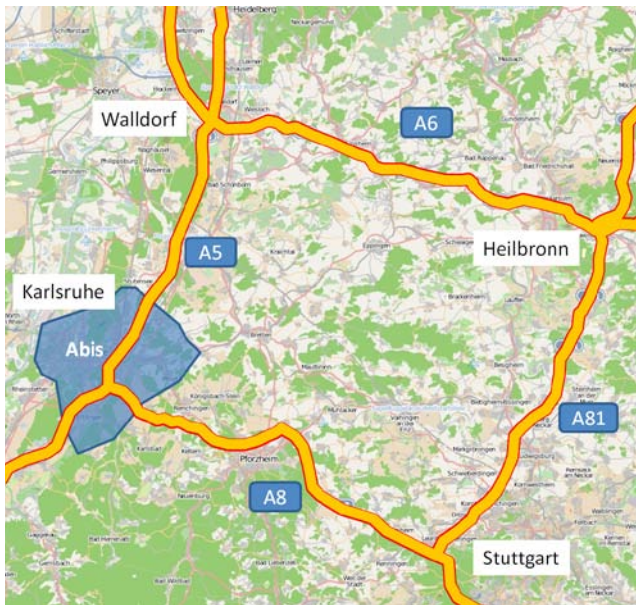


Abb. 2: Projektgebiet für A-Daten und Abis-Daten (Kartengrundlage: Open Street Map)

Abis- und A-Daten unterschieden. Das Testgebiet für die A-Daten umfasste das gesamte Gebiet um das Autobahnviereck Karlsruhe, Stuttgart, Heilbronn und Walldorf. Das Testgebiet für die Abis-Daten umfasste das Stadtgebiet Karlsruhe und Ettlingen.

3 Referenzdaten des Mobilfunknetzes

Wie bereits im vorigen Kapitel erwähnt, werden für beide Verfahren, der in »Do-iT« untersuchten Mobilfunkortungsverfahren, Referenzdaten benötigt. So wurden z.B. die für das Map-Aiding wichtigen digitalen Straßenkarten im GDF-Standardformat benutzt. Solche Karten finden sich z.B. in mobilen Navigationssystemen, wie sie heute in vielen Kraftfahrzeugen Eingang gefunden haben. Eine detaillierte Beschreibung des GDF-Formats findet man in ISO 14825:2004. Hier wird daher auf eine genauere Erläuterung verzichtet. Dieses Kapitel beschäftigt sich hauptsächlich mit der Beschreibung der Referenzdaten des Mobilfunknetzes. Diese beschränken sich auf Signalstärkenkarten in einem Rasterformat von 150 m × 150 m und auf Stammdaten des Mobilfunknetzes, welche Informationen über die jeweiligen Standorte, Bauarten, Abstrahlrichtungen und weitere Antenneneigenschaften enthalten.

3.1 Signalstärkenkarten

Signalstärkenkarten werden aus einem Dämpfungsmodell (vgl. Walke 2001, z.B. Okumura/Hata-Modell) für die Ausbreitung der Funksignale und einem digitalen Geländemodell berechnet. Sie dienen für eigene Anwen-

dungen des Mobilfunknetzbetreibers und geben die zu erwartende theoretische Signalstärke in der Örtlichkeit wieder. Als Ergebnis erhält man sowohl textliche Informationen in Form von ASCII-Files als auch grafische Informationen in Form des Best-Server-Plots (s. Kap. 3.3), die ca. alle zwei Monate aktualisiert werden. In den oben genannten ASCII-Files wird die Signalausbreitung der Antenne rasterförmig in dBm (Dezibel Milliwatt) dargestellt. Die Rastergröße beträgt 150 m × 150 m bzw. fünf Bogensekunden. In gezielten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich beim Signalstärken-Matching (RX-Matching) für die endgültigen Positionen keine deutlichen Verbesserungen ergeben, wenn Karten mit einer höheren Auflösung gewählt werden (untersucht wurden Karten mit einer Auflösung von einer Bogensekunde und fünf Bogensekunden). Da sich der Datenumfang innerhalb der Signalstärkenkarten jedoch deutlich reduziert, konnte bei der Berechnung ein deutlicher Performancegewinn erzielt werden.

Als Beispiel zeigt Abb. 3 die Verteilung der Signalstärken einer Mobilfunkzelle. Deutlich ist die Antenne als Peak mit der höchsten Signalstärke zu erkennen. Es ist für jeden Signalstärkenwert der Rasterkarte möglich ein Koordinatenpaar zu berechnen, was für die spätere Positionsbestimmung wichtig ist. Zusätzlich werden für die spätere Auswertung Lookup-Tabellen erstellt, die zum einen den Dateinamen der jeweiligen Signalstärkenkarte und zum anderen die vier Eckpunkte der Karte in Gauß-Krüger-Koordinaten enthalten. Dadurch wird eine schnellere Berechnung der gesuchten Position erreicht, da dann für jeden Wert in der Karte die entsprechende Koordinate interpoliert werden kann. Andernfalls müsste jeder Rasterpunkt in der Signalstärkenkarte gesondert berechnet werden. Für das Projekt wurde eine Gauß-Krüger-Koordinatenberechnung gewählt, die eine Projektion direkt auf das WGS84 Ellipsoid zuließ.

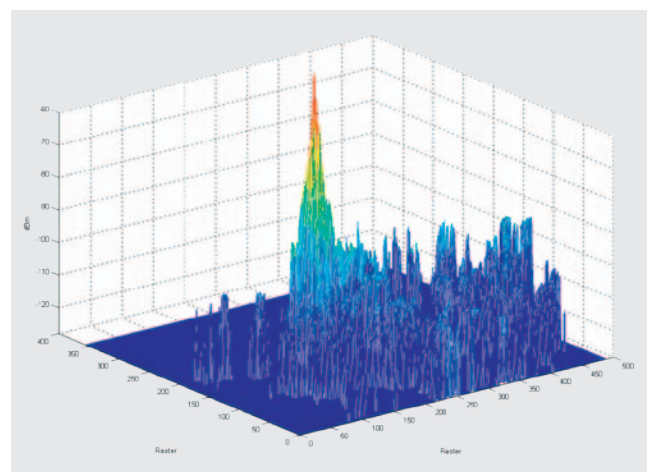


Abb. 3: Verteilung der Signalstärkeninformation einer Mobilfunkzelle (vgl. Do-iT 2009a)

3.2 Antenneninformationen

Alle Informationen der Funkantennen des Mobilfunknetzes werden in einer speziellen Mobilfunkstammdatendatei bereitgehalten. Diese wird tagesaktuell vom Mobilfunkbetreiber generiert und umfasst ca. 6800 Antennen, welche im ganzen Projektgebiet verteilt sind. Da die originale Mobilfunkstammdatendatei eine Vielzahl an Informationen enthält, die nicht alle für das RX-Matching benötigt werden, wird für die Mobilfunkortung eine vereinfachte Mobilfunkstammdatendatei erstellt. Die enthaltenen Informationen sind im Einzelnen:

- Zellen-Nummer (CI),
- LAC-Nummer,
- Standpunktkoordinaten,
- Abstrahlrichtung der Antenne,
- und Öffnungswinkel der Antenne.

Die Zellen-Nummer ist die Identifikationsnummer jeder einzelnen Funkzelle. LAC-Nummer bedeutet die Identifikationsnummer des Location Area Code. Dies ist die nächstgrößere Erfassungseinheit des Mobilfunknetzes und beinhaltet mindestens eine, meistens jedoch einige Dutzend Funkzellen. Neben der Position und dem Abstrahlwinkel der Antenne ist beim RX-Matching auch der Öffnungswinkel der Antenne wichtig. Dieser dient der Eingrenzung des Suchgebiets bei der Positions Berechnung (vgl. Kap. 5).

3.3 Best-Server-Plot

Grafische Informationen zum Mobilfunknetz liegen, wie bereits erwähnt, in Form sogenannter Best-Server-Plots (BSP) vor.

Abb. 4 zeigt den BSP für einen Innenstadtbereich, wobei die Antennen durch die Farben und die Angabe der Zellennummern (CI) zu unterscheiden sind. Zur Orientierung sind zusätzlich Autobahnen und Bundesstraßen dargestellt. Aufgrund von Topographie und Abschattungen an Gebäuden werden die Mobilfunkzellen im Best-Server-Plot nicht als einheitliche Flächen dargestellt, sondern sind in mehrere Teilflächen unterteilt und enthalten häufig Fremdflächen. Da diese Fremdflächen jedoch bei der Auswertung einen störenden Einfluss haben, muss der Best-Server-Plot für die Positionsalgorithmen aus praktischen Gründen generalisiert werden. Diese Generalisierung reduziert die Anzahl der Umringspolygone um ca. 80 % und ist in nachfolgender Abbildung (Abb. 5) für den gleichen Ausschnitt wie oben dargestellt. Durch diese Generalisierung wird die Performance der Auswertesoftware gesteigert und für eine Echtzeitanwendung nutzbar.

Ein weiterer Verarbeitungsschritt reduziert die Kanten der Umringspolygone mithilfe eines Douglas-Peucker Algorithmus. Ein BSP mit ursprünglich über zwei Millionen Knoten in über 9.000 Polygonen kann bei einer Punktreduktion nach Douglas-Peucker mit einem 75m breiten Toleranzband als Graph mit 128.000 Knoten und 135.000 Kanten dargestellt werden (vgl. Abb. 6). Dieser reduzierte BSP wird später mit den Straßendaten verschnitten und zur Routengenerierung aus A-Daten als Kartengrundlage benutzt.

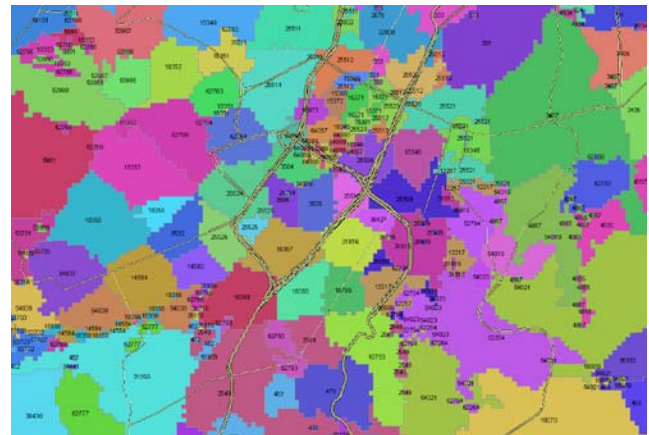


Abb. 4: Original Best-Server-Plot (Ausschnitt)

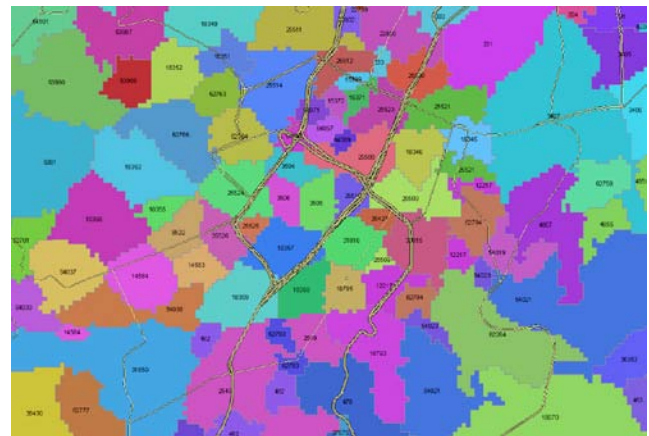


Abb. 5: Generalisierter Best-Server-Plot



Abb. 6: Best-Server-Plot nach Punktreduktion

4 Methoden zur FPD-Generierung

Wie bereits eingangs erwähnt, werden zur Generierung der FPD zwei Methoden eingesetzt, die durch den unterschiedlichen Informationsgehalt der beiden Schnittstellen begründet sind. Diese sollen hier in ihrem grundsätzlichen Ablauf genauer beschrieben werden.

4.1 FPD-Generierung auf Grundlage von Abis-Daten

Die Abis-Daten werden direkt hinter dem Base Station Controller (BSC) aufgezeichnet. Jedoch fallen nur Informationen an, wenn auch tatsächlich telefoniert wird. Ist das Mobilfunkgerät nur im Stand-by-Betrieb, können keine Informationen über die Abis-Daten-Schnittstelle erfasst werden. Die für die Positionsrechnung wichtigen Informationen, welche die Abis-Daten-Schnittstelle beinhaltet, sind im Folgenden aufgeführt:

- Zeitstempel,
- Teilnehmer-ID (anonymisiert),
- ID Location Area (Location Area Code, in dem sich die bedienende Zelle befindet),
- ID bedienende Zelle (Zelle, in welcher der Mobilfunkteilnehmer angemeldet ist),
- TA-Wert (Timing Advance – Abstand zur Antenne in 550 m-Schritten),
- Signalstärke der bedienenden Zelle (dBm),
- IDs aller empfangenen Nachbarzellen (bis zu 6),
- Signalstärken aller empfangenen Nachbarzellen (dBm).

Die oben aufgeführten Informationen werden im 2-Hz-Takt an der Netzwerkprobe aufgezeichnet und an den Positionsrechnungsprozess weitergegeben, welcher in Kap. 5 genauer beschrieben wird. Abb. 7 zeigt den grundsätzlichen Ablauf der Trajektoriengenerierung auf Basis von Abis-Daten.

Zunächst werden Abis-Daten 15 min lang gesammelt. Danach werden diese Datenpakete an den Priorisierungsprozess weitergegeben. Dieser sortiert die Teil-

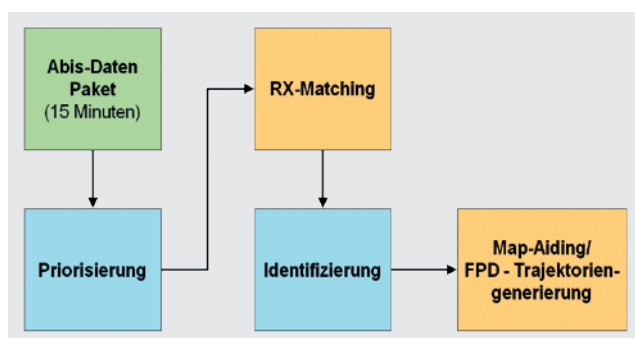


Abb. 7: Ablauf für den Abis-Datenfluss

nehmerdaten nach Gesichtspunkten wie Gesprächsdauer, Zellwechsel, Telefonierhäufigkeit. Diese Priorisierung ist wichtig, da aufgrund der zeitintensiven Berechnungsprozesse nicht alle Teilnehmerdaten in Echtzeit ausgewertet werden können. Die Daten werden nach einzelnen Teilnehmern sortiert und an den Positionsrechnungsprozess weitergegeben. Hier werden die Positionen der Teilnehmer aus den aufgezeichneten Signalstärken berechnet und blockweise an den Identifizierungsprozess übergeben. Blockweise bedeutet, dass nicht immer nur für einen Teilnehmer Positionsrechnungen durchgeführt werden, sondern gleich mehrere Teilnehmer gleichzeitig ausgewertet werden. Der Identifizierungsprozess überprüft die Positionsfolgen einzelner Teilnehmer auf systematisches Bewegungsverhalten, welches auf unterschiedliche Verkehrsteilnehmer schließen lässt. Hierbei wird unterschieden zwischen Fußgänger, Fahrradfahrer, PKW, LKW und Fahrzeugen des ÖPNV. Für die Verkehrsprognose sind dabei nur Fahrzeuge interessant, die zur Kategorie PKW und LKW zählen. Letztendlich werden die aus dem RX-Matching berechneten Positionen der identifizierten PKW- und LKW-Teilnehmer an den Prozess für die FPD-Trajektoriengenerierung übermittelt, welcher diese durch Map-Aiding-Verfahren in die Straßenkarte einrechnet. Hieraus lassen sich dann Routen und Weg-Zeit-Diagramme für die jeweiligen Teilnehmer berechnen. Auf die Priorisierungs- und Identifizierungsprozesse für die Abis-Daten kann im Rahmen dieses Artikels nicht näher eingegangen werden, da über diese Themen derzeit eine Dissertation entsteht. Teilweise werden diese aber im Verbundabschlussbericht beschrieben, welcher in Do-iT (2009a) veröffentlicht ist.

4.2 FPD-Generierung auf Grundlage von A-Daten

Bei der Beschreibung der FPD-Generierung auf Grundlage der A-Daten muss darauf hingewiesen werden, dass die Entwicklungszeit für dieses Verfahren sehr kurz war. Dies resultiert aus der Tatsache, dass es während des Projekts zu starken Verzögerungen kam, die auf die notwendige Freigabe der Mobilfunkdaten zurückzuführen sind. Aus diesem Grund ist der Prozessablauf für die FPD-Generierung auf Grundlage der A-Daten wesentlich einfacher gehalten.

Während des Gesprächs sind Informationen nur auf durchgeführte Zellwechsel, sogenannte »Handover«, beschränkt. Im Gegensatz zur Abis-Daten-Schnittstelle enthält die A-Daten-Schnittstelle jedoch auch Informationen, wenn kein Gespräch stattfindet. Das heißt, wenn sich das Mobilfunkgerät im Stand-by-Modus befindet, sind wenigstens Informationen bei Wechseln des Location Area Code (LAC) enthalten. Einen genaueren Überblick über die enthaltenen Informationen soll die nachfolgende

Auflistung geben. Als Informationen enthält man während eines Telefonats:

- Zeitstempel,
- Teilnehmer-ID (anonymisiert),
- ID Location Area (Location Area Code, in dem sich die bedienende Zelle vor dem Zellwechsel befand),
- ID Location Area (Location Area Code, in dem sich die bedienende Zelle aktuell befindet),
- ID bedienende Zelle (Zelle, in welcher sich der Mobilfunkteilnehmer vor dem Zellwechsel befand),
- ID bedienende Zelle (Zelle, in welcher sich der Mobilfunkteilnehmer aktuell befindet).

Wenn kein Telefonat geführt wird und das Mobilfunkgerät aber eingeschaltet ist, erhält man bei einem LAC-Wechsel als Informationen:

- Zeitstempel,
- Teilnehmer-ID (anonymisiert),
- ID Location Area (Location Area Code, in dem sich die bedienende Zelle vor dem Zellwechsel befand),
- ID Location Area (Location Area Code, in dem sich die bedienende Zelle aktuell befindet),
- ID bedienende Zelle (Zelle, in welcher sich der Mobilfunkteilnehmer aktuell befindet).

Da die Location-Area-Zellen eine viel größere räumliche Ausdehnung haben als die darin enthaltenen Funkzellen, erhält man, wenn kein Gespräch geführt wird, wesentlich weniger Daten mit geringerer räumlicher Auflösung. Die Nutzung dieser Daten und die entsprechenden Auswertungsverfahren werden in Kap. 6 genauer erklärt.

In Abb. 8 wird der Ablauf der einzelnen Prozesse gezeigt. Wie bei den Abis-Daten werden im Echtzeitbetrieb

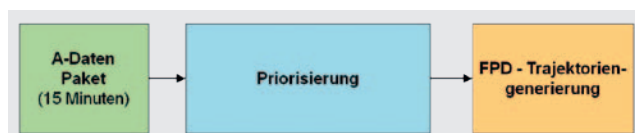


Abb. 8: Ablauf für den A-Datenfluss

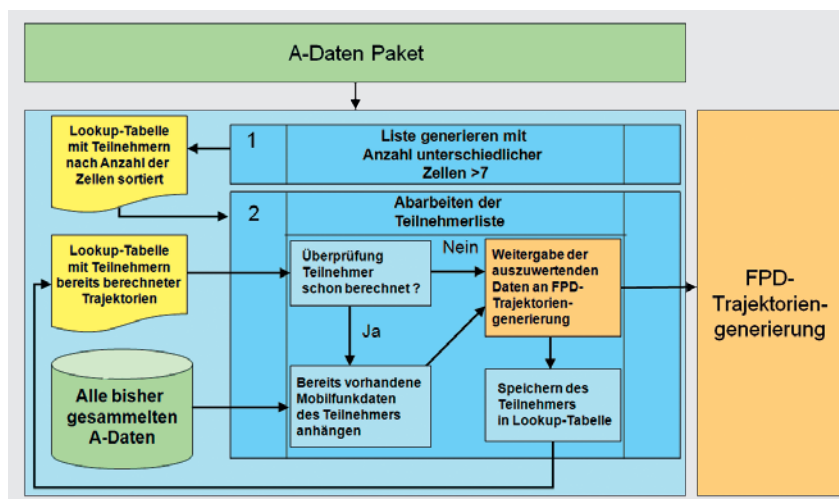


Abb. 9: Schematische Darstellung der Priorisierung

immer 15min-Blöcke gebildet. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass zwar weniger Berechnungsschritte, aber dafür ein deutlich größeres Gebiet (vgl. Kap. 7) abgedeckt werden müssen. Daher ist ein sehr großes Aufkommen an Mobilfunkdaten zu verarbeiten.

Die eigentliche Priorisierung für A-Daten ist aufgrund der kurzen Entwicklungszeit sehr einfach gehalten und wird im Folgenden genauer beschrieben (vgl. Abb. 9).

Im ersten Schritt wird der neue A-Daten-Block nach Anzahl der benutzten Mobilfunkzellen der einzelnen Teilnehmer sortiert. Dabei werden im Echtzeitbetrieb alle Teilnehmer sortiert, die eine höhere Anzahl als sieben Zellen während eines Gespräches oder insgesamt mehr als sieben Location Areas durchfahren haben. Durch empirische Untersuchungen hat sich gezeigt, dass sich die Bewegung von Teilnehmern erst ab sieben Zellwechseln eindeutig nachweisen lässt. Bei weniger als sieben Zellwechseln ist es möglich, dass bei einer ungünstigen Position des Teilnehmers die Zellwechsel nur durch netzinterne Weiterleitung zu begründen sind. Das heißt, bei Überlastung einer Mobilfunkzelle aufgrund einer zu großen Anzahl an Mobilfunkteilnehmern, wird ein Teilnehmer an eine Nachbarzelle weitergeleitet, ohne dass sich der Teilnehmer bewegt hat. Dies kann mehrmals während eines Telefonats passieren, da neben der bedienenden Zelle bis zu sechs weitere Nachbarzellen empfangen werden und in alle Zellen netzseitig gewechselt werden kann. Bei der Anzahl der Location Areas ist eine eindeutige Bewegung schon ab vier Location-Area-Wechseln zu unterstellen. Dies hätte die Anzahl an auswertenden Teilnehmern jedoch verzehnfacht, was zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht in Echtzeit zu verarbeiten ist. In der Offline-Auswertung werden diese Location-Area-Wechsel jedoch berücksichtigt. Im nächsten Schritt findet eine Überprüfung statt, ob die Positionen priorisierter Mobilfunkteilnehmer zuvor schon ein- oder mehrmals berechnet wurden. Die Teilnehmer-IDs bereits berechneter Teilnehmer finden sich in einer Lookup-Tabelle. Falls für einen Teilnehmer schon Trajektorien berechnet wurden, werden die bisher gesammelten Mobilfunkdaten mit den neuen vereint und an die FPD-Trajektorien-generierung weitergeschickt. Falls für einen Mobilfunkteilnehmer noch keine Trajektorien berechnet wurden, werden nur die aktuellen Mobilfunkdaten verarbeitet. Abschließend wird die neue Berechnung in die Lookup-Tabelle von bereits berechneten Trajektorien aufgenommen.

5 Signalstärken-Matching

Als Grundlage für die Trajektoriengenerierung aus Abis-Daten müssen zunächst, wie in Kap. 4.1 beschrieben, Positionen aus den empfangenen Signalstärken am Mobilfunkgerät berechnet werden. Diese Berechnung wird nun im Folgenden näher erklärt.

Den grundsätzlichen Ablauf der Mobilfunkortung bis zur Weitergabe an das Map-Aiding zeigt Abb. 10. An der Abis-Daten-Schnittstelle können die Zell-ID und der Timing-Advance-Wert (TA-Wert) sowie die Signalstärken zur bedienenden Zelle und bis zu sechs Nachbarzellen abgegriffen werden. Zur Positionsbestimmung mit Signalstärken-Matching werden als Referenz die Signalstärkenkarten genutzt, die als Planungsdaten beim Mobilfunknetzbetreiber vorliegen und dort u. a. zur Konfiguration und Optimierung des GSM-Netzes genutzt werden.

Über die aus den Planungsdaten bekannte Ausrichtung (Ri) der Antenne (BTS = Base Transceiver Station) und dem TA-Wert (vgl. Abb. 11), der eine grobe Bestimmung der Laufzeit des Signals und somit der Entfernung zwischen Mobilfunkstation und Antenne liefert, erfolgt eine erste grobe Bestimmung der Position. Anhand dieser Grobposition und den Messunsicherheiten wird der zu berücksichtigende Bereich aus den Signalstärkenkarten eingegrenzt. Es wird ein sogenannter Suchbereich berechnet, welcher aus den Signalstärkenkarten herausgeschnitten wird. Dies wird aus Performancegründen gemacht, um nicht die Positionsberechnung über die gesamte Ausdehnung der Signalstärkenkarten durchführen zu müssen.

In diesem Suchbereich werden für alle 150 m × 150 m großen Rasterbereiche für die jeweils vorliegenden (maximal sieben) gemessenen Signalstärken eine bestmögliche Anpassung an Referenzdaten mithilfe der Verbesserungsquadratsumme über alle Suchbereiche bestimmt (vgl. Ramm & Schwieger 2008 und Schwieger et al. 2007). Hierbei werden zunächst Differenzen der gemessenen Signalstärken zwischen der bedienenden und allen Nachbarzellen gebildet. Ebenso werden Differenzen zwischen den Signalstärkekarten der bedienenden Zellen und aller Nachbarzellen gebildet. Dieses gilt für alle Signalstärkenrasterbereiche auf jeweils gleichen Koordinaten. Die Differenzenbildung ist notwendig, da gemessene Daten mit Planungsdaten verglichen werden. Dadurch kann es zu systematischen Fehlern kommen. Die Planungsdaten entsprechen nicht durchgängig der tatsächlichen Ausbreitung der Antennensignale. Dieser Unterschied ist jedoch bei allen Planungsdaten ähnlich, da hinter allen Berechnungen für die Signalstärkenkarten das gleiche Dämpfungsmodell steckt.

Dieser systematische Fehler drückt sich näherungsweise durch einen Offset aus, der sich durch Bildung von Differenzen beseitigen lässt. Die Positionsverbesserung durch diese Methode beträgt z. T. 300 bis 500 m. Am Ende erhält man durch die Differenzenbildung maximal sechs Differenzen der empfangenen Signalstärken und maximal

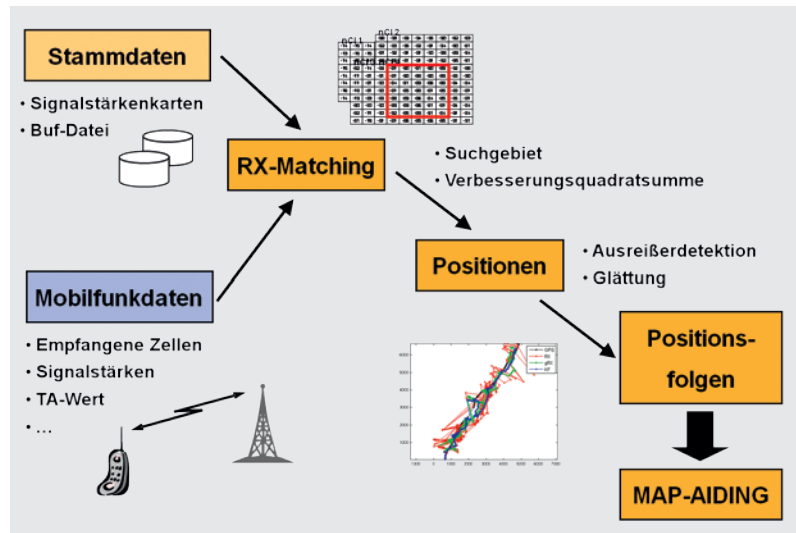


Abb. 10: Ablauf der Mobilfunkortung aus Abis-Daten (vgl. Do-iT 2009a)

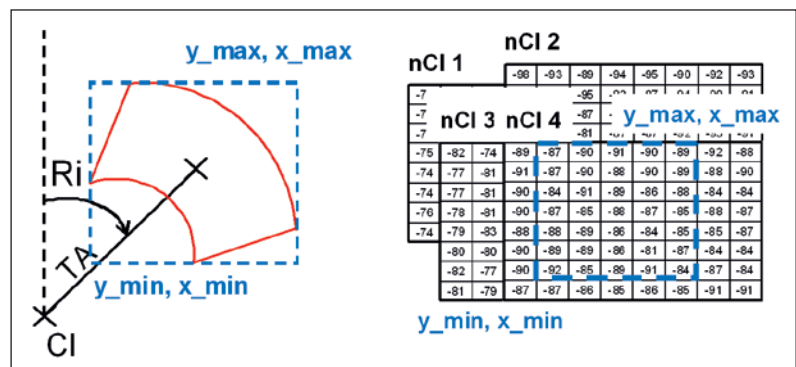


Abb. 11: Berechnung des Suchgebiets (links) und Herausschneiden aus den Signalstärkenkarten (rechts) (vgl. Do-iT 2009a)

sechs Differenzenkarten. Mit der folgenden Formel (1) wird die Verbesserungsquadratsumme aller Signalstärkendifferenzen gebildet, in deren Minimum die Position des Mobilfunkteilnehmers liegt. Der hier gezeigte Ansatz ist eine Weiterentwicklung der Methode wie sie in Catrein (2004) vorgestellt wird.

$$\min_{y,x \in A} \sum_{i=1}^n \left((P_{Zell,BED}(y,x) - P_{Zell,NACH}(y,x)_i) - (P_{Mess,BED} - P_{Mess,NACH,i}) \right)^2 \quad (1)$$

- A: Suchgebiet
 n: Anzahl der gemessenen Zellen
 P_{Zell} : Signalstärke aus Signalstärkenkarten auf Position (y, x) bezogen
 P_{Mess} : Signalstärke aus Mobilfunkgespräch
 BED: Bedienende Zelle
 NACH: Nachbarzelle

Als letzter Schritt wird eine Sektormaske über das Suchgebiet gelegt, welche sich aus dem Abstrahlwinkel, dem TA-Wert und dem Öffnungswinkel der Antenne ergibt. Alle Werte außerhalb des Sektors werden dabei so hoch gewichtet, dass Minima nur im gesuchten Sektor gefunden werden. In Abb. 12 wird das Ergebnis einer solchen Verbesserungsquadratsumme dargestellt. Dabei sind zur besseren Darstellung in der 3D-Ansicht die Werte außerhalb des Sektors auf Null gesetzt.

Auf diese Weise ergibt sich für jeden gemessenen Zeitpunkt eine Position.

Die ermittelte Positionsfolge des Mobilfunkteilnehmers wird im Anschluss geglättet. Während des Projekts wurden dabei unterschiedliche Filter untersucht. In Abb. 13 ist eine GPS-Trajektorie als Referenz (schwarz), die ungefilterte RX-Matching-Trajektorie (rot), die durch ein gleitendes Mittel geglättete RX-Matching-Trajektorie (grün) und die durch ein Kalmanfilter geglättete RX-Matching-Trajektorie (blau) zu sehen. Im Echtzeitalgorithmus wurde das Kalmanfilter wegen seiner besseren Formtreue implementiert. Aus Performancegründen ist dieses sehr einfach gehalten und beruht auf einem kinematischen Ansatz (Ramm & Schwieger 2008). Im Ergebnis liegen die Positionen des anonymisierten Mobilfunkteilnehmers in zeitäquidistanten Abständen vor. Diese Positionen werden zu einer Positionsfolge zusammengefasst, die eine zeitabhängige Beschreibung des zurückgelegten Wegs repräsentiert. Ein logischer Bezug zum Verkehrsnetz ist an dieser Stelle noch nicht gegeben.

Für die weitere Auswertung, insbesondere für die Eingrenzung des Straßennetzes und für die Qualitätsbewertung, wird auch im Online-Betrieb die Genauigkeit der Einzelpositionen benötigt. Im Kalmanfilter wird die Positionsgenauigkeit auf Werte zwischen 2,5m und 400m geschätzt. In der Realität ergeben sich für die Standardabweichungen der Querabweichung zur berechneten Route in der Regel Werte unterhalb 250m. In Abb. 14 werden die Standardabweichungen der Querabweichungen von zwölf unterschiedlichen Messfahrten vom 13.9.2007 gezeigt, bei denen ein GPS-Empfänger zur Referenzmessung mitgeführt wurde. Die Messfahrten fanden auf Autobahnen (A) außerorts und Bundesstraßen (B) innerorts statt. Ein Wechsel von außerorts und innerorts wurde in weiteren Testfahrten (C) durchgeführt. Signifikante Unterschiede bezüglich der Genauigkeit konnten nicht festgestellt werden. Lediglich zweimal (bei Messfahrt A5 und B5) wurden Standardabweichungen über 250m ermittelt.

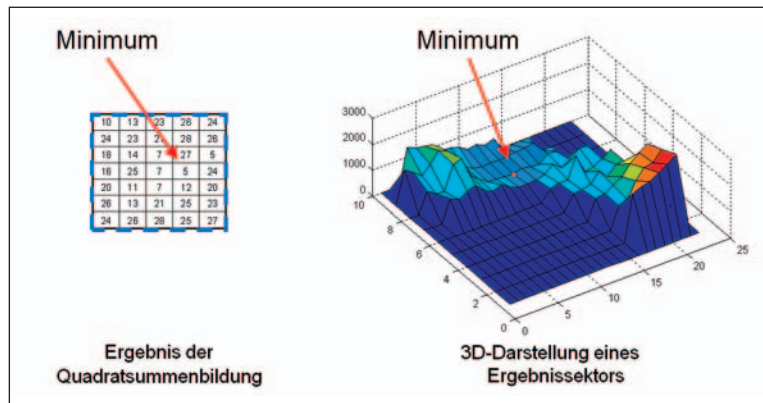


Abb. 12: Ergebnis der Bildung einer Verbesserungsquadratsumme mit Sektorausschnitt (vgl. Do-iT 2009a)

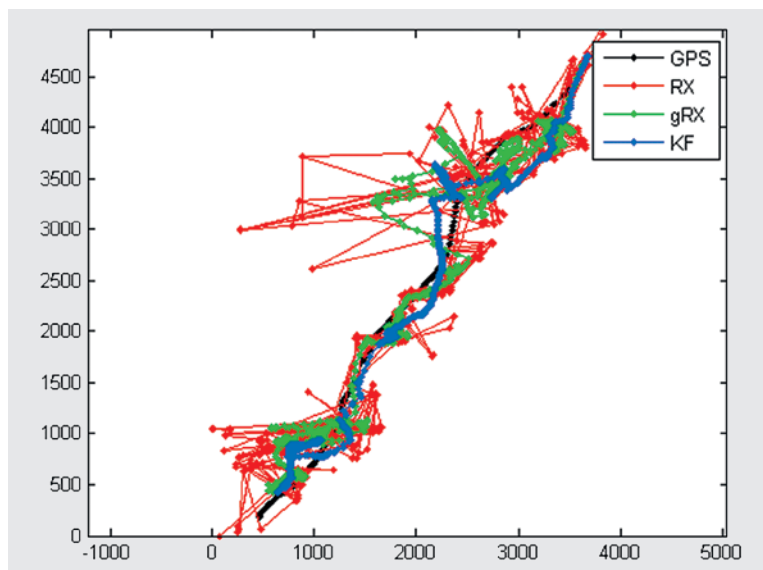


Abb. 13: Positionsfolge einer Autobahnfahrt im Vergleich unterschiedlicher Auswerteverfahren

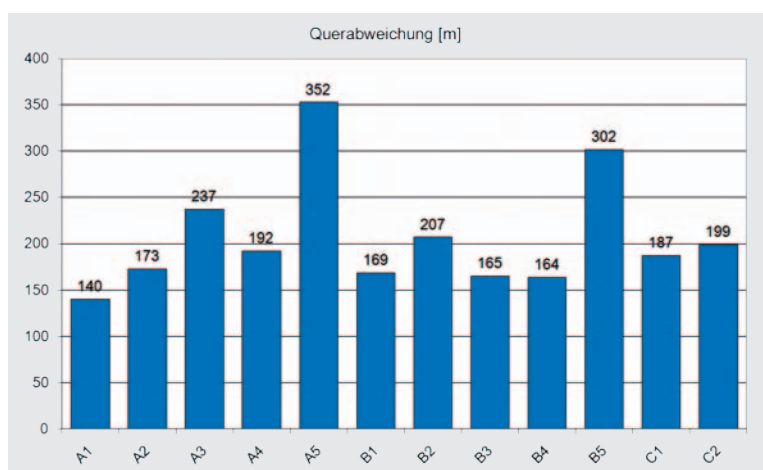


Abb. 14: Erreichte Standardabweichungen für die Querabweichung bei Abis-Daten

Bei der späteren Echtzeitauswertung wurden nur Trajektorien mit einer Querabweichung kleiner 250m weiterverarbeitet. Auf diese Weise wurden zwar einige Trajektorien eliminiert, aber in jedem Fall falsch zugeordnete Trajektorien vermieden.

6 Map-Aiding-Methoden

In diesem Kapitel wird auf die Verfahren des Map-Aidings näher eingegangen, welche für die Berechnung der Trajektorien eingesetzt werden. In Kap. 6.1 wird zunächst auf die Map-Aiding-Methode auf Grundlage der Abis-Daten eingegangen. Kap. 6.2 beschreibt die Map-Aiding-Methode auf Basis der A-Daten.

6.1 Map-Aiding mit Abis-Daten

Die Grundlage für die Berechnung der Trajektorien aus Abis-Daten bilden die berechneten Positionen aus dem Signalstärken-Matching (RX-Matching). Grundsätzlich wird versucht, mithilfe des Straßennetzes und den berechneten Positionen, den wahrscheinlichsten Weg zu finden, den der Mobilfunkteilnehmer benutzt hat. Zur Lösung dieses Problems wird im ersten Schritt ein Korridor um die Positionsfolge gerechnet, welcher anschließend als Begrenzung für die Straßenkarte dient, auf der das Routing durchgeführt werden soll. Das heißt, es wird auf Grundlage dieses Korridors eine Teilkarte aus dem Lokalisierungsnetz extrahiert, um nicht über das gesamte digitale Kartenwerk routen zu müssen. Der Korridor entspricht in der Ausdehnung der doppelten Standardabweichung der aus dem Kalmanfilter berechneten Positionen des Signalstärken-Matchings. Danach werden an den Enden der Positionsfolgen Geraden definiert, die zur Suche der Start- und Zielkanten für die Routengenerierung dienen. Dazu wird eine grobe Fahrtrichtung aus den ersten Positionen bestimmt und von den beiden Diagonalen des ersten Suchfensters diejenige ausgewählt, deren Normale mit der Fahrtrichtung den kleineren Winkel bildet. Die Anfangsknoten der Kanten, die diese Diagonale in

gleicher Richtung wie die Fahrtrichtung schneiden, werden als Startknoten betrachtet (vgl. Abb. 15: Diagonale). In empirischen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Methode der Diagonalen deutlich robuster ist, als wenn die Normale allein zur Bestimmung der Anfangspunkte herangezogen worden wäre.

Analog können Endpunkte festgelegt werden, indem die Endknoten der Kanten gewählt werden, die die Diagonale des letzten Suchfensters in Fahrtrichtung schneiden. Die kürzesten Verbindungen von allen Startknoten (n_A) zu allen Zielknoten (n_E), die mit dem Kürzeste-Wege-Algorithmus nach Dijkstra berechnet werden, ergeben $n_A \times n_E$ mögliche Routen, wenn alle Start- und Zielknoten über den Graphen zu erreichen sind. Die Minimierung im Kürzeste-Wege-Algorithmus kann über den Fahrweg als Summe der Kantenlängen oder über die Fahrzeit mit der für jede Kante gespeicherten mittleren Geschwindigkeit erfolgen. In der Regel führen beide Varianten zu plausiblen und oft auch identischen Routen. In Einzelfällen kommt es jedoch vor, dass bei minimaler Strecke die Routen durch die Gemeinden führen, bei minimaler Fahrzeit dagegen Routen über schneller zu befahrende Umgehungen gewählt werden. Um die Route zu bestimmen, auf der sich das Mobiltelefon mit größter Wahrscheinlichkeit bewegt hat, müssen die verbleibenden Möglichkeiten beurteilt werden. Da bei der Auswertung der Abis-Daten Positionsfolgen bestimmt werden, wird die Route gewählt, die den geringsten Abstand zu den gemessenen Positionen hat. Dabei ist es nicht erheblich, ob es sich hierbei um einen kürzesten oder schnellsten Weg handelt. Um zu beurteilen, wie gut eine Alternativtrasse zu der gemessenen Positionsfolge passt, wird aus den Lotabständen (d) der Positionen zu den Straßenkanten eine Standardabweichung berechnet (vgl. (2)). Für die Berechnung werden zunächst am Anfang alle Positionen P_i eliminiert, die vor die Anfangskante fallen ($i < ia$), und analog alle Punkte am Ende, die hinter die Endkante ($i > ie$) einer Route fallen. Aus den verbleibenden Punkten wird dann die Standardabweichung berechnet.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{ia}^{ie} d^2}{ie - ia + 1}} \quad (2)$$

Bei der Auswahl der Route wird neben der Standardabweichung auch berücksichtigt, wie viele Positionen am Anfang und am Ende abgeschnitten wurden, indem für jede Alternative der Quotient Q (vgl. (3)) aus Standardabweichung und prozentualem Anteil der verwendeten Positionen berechnet wird. Die Route mit minimalem Q wird ausgewählt.

$$P = \frac{ie - ia + 1}{n} ; \quad Q = \frac{s}{P} \quad (3)$$

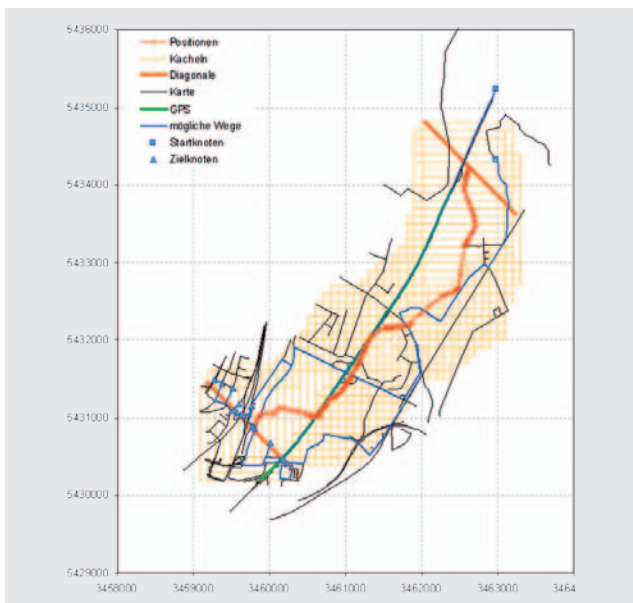


Abb. 15: Kartenausschnitt zur Routengenerierung

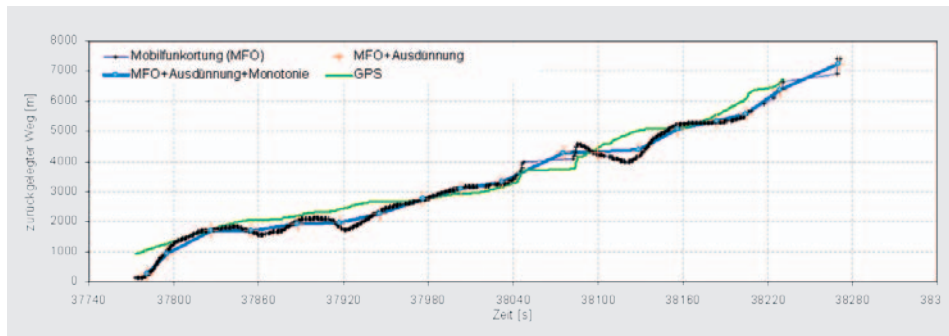


Abb. 16: Weg-Zeit-Diagramm aus Abis-Daten

Zur Qualitätsbewertung der gewählten Route wird die Standardabweichung (s) als mittlere Querabweichung und der prozentuale Anteil P der verwendeten Positionen einer Positionsfolge im Online-Betrieb zur Verfügung gestellt. Im letzten Schritt werden die Positionen des Signalstärken-Matchings auf die verbleibenden Routenelemente projiziert. Hierzu werden die Lotfußpunkte der Positionen auf die Straßenkanten berechnet. Aus den resultierenden Lotfußpunkten wird dann für die gewählte Route ein Weg-Zeit-Diagramm erstellt (vgl. Abb. 16).

Um Streckungen und Stauchungen im Weg-Zeit-Diagramm abzumildern, die aus Ungenauigkeiten der Positionsbestimmung entstehen, werden die berechneten Strecken über ein 30s-Intervall gemittelt. Die Mittelwerte der Zeiten und Strecken ergeben dann ein ausgedünntes Weg-Zeit-Diagramm, wobei die Monotonie im Weg-Zeit-Diagramm gewährleistet wird, indem die Zeitpunkte, die zu negativen Streckeninkrementen führen, weggelassen werden. Die Route und das Weg-Zeit-Diagramm werden anschließend als Floating Phone Data den Verkehrsleitsystemen zur Verfügung gestellt. Abb. 17 zeigt den Gesamtablauf dieses Verfahrens.

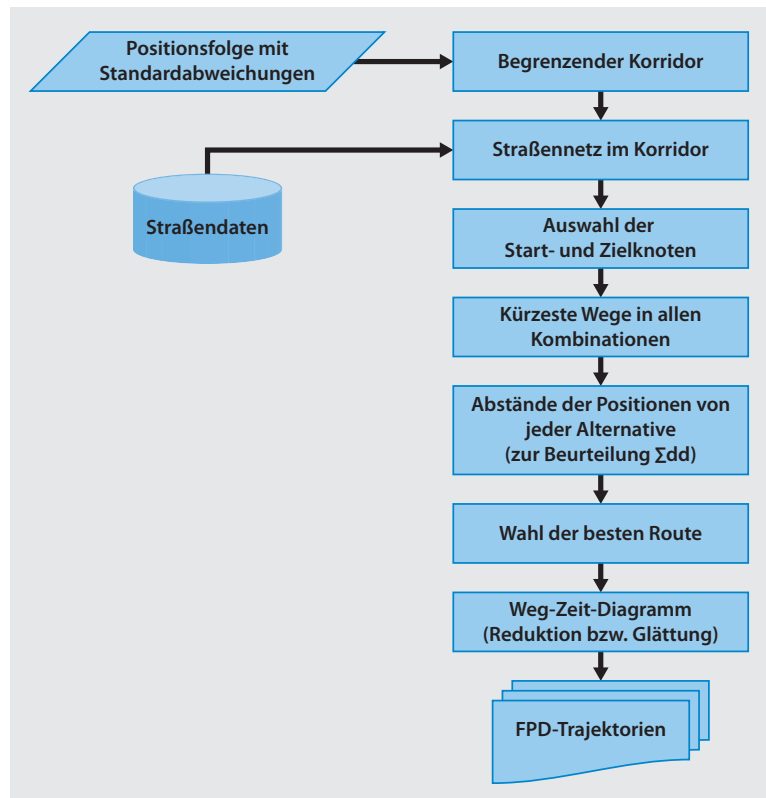


Abb. 17: Ablauf der Map-Aiding-Methode auf Grundlage von Abis-Daten nach Übergabe der Positionsfolgen aus dem Signalstärken-Matching

6.2 Map-Aiding mit A-Daten

Anders als bei den Abis-Daten stehen für die Routengenerierung hier zunächst keine absoluten Positionen der Mobilfunkteilnehmer zur Verfügung. Diese ergeben sich aus den Zellwechseln (Handover – HO oder Location Area Code Update – LUP) und den Schnittpunkten der Zellgrenzen (Best-Server-Plot) und des Straßennetzes. Anhand dieser Schnittpunkte lassen sich, wenn ein Teilnehmer über längere Zeit verfolgt wird, ebenfalls Positionsfolgen ableiten, die natürlich von der Telefonierhäufigkeit und Verfolgungsdauer abhängen. Da der Best-Server-Plot auf Grundlage eines theoretischen Dämpfungsmodells berechnet wurde, stimmen die Zellgrenzen nicht immer mit denen der Realität überein. Ebenso kann es sein, wie bereits erwähnt, dass Zellwechsel aufgrund von überlas-

teten Mobilfunkzellen durchgeführt werden, wenn sich in einer Zelle mehr Mobilfunkgeräte aufhalten, als von der BTS verwaltet werden können. Durch entsprechende Algorithmen wird hier bei den eingehenden Daten eine Vorverarbeitung durchgeführt, die solche Fehlzuordnungen eliminiert. Im nächsten Schritt wird versucht, einen möglichen Aufenthaltsbereich für den Mobilfunkteilnehmer zu bestimmen. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass für eine Zellgrenze meist mehrere Positionen möglich sind, da mehrere Straßen eine Zellgrenze schneiden können. Zunächst wird ein Weg s_{max} berechnet, der sich aus dem Zeitraum zwischen zwei Umschaltungen und aus der höchsten in diesem Gebiet erlaubten und in der Straßenkarte für jede Kante gespeicherten Geschwindigkeit v_{max} ergibt. Um sicherzustellen, dass dieser Weg nicht zu kurz geschätzt wird, wird er um einen empirisch ermittelten Maßstabsfaktor ($m = 1,1$) und einen gleich-

falls aus dem Datenmaterial abgeleiteten Zuschlag für eventuelle Umschaltverzögerungen ($c=500\text{m}$) vergrößert (vgl. (4)). Umschaltverzögerung bedeutet hier, dass man sich geometrisch schon in einer neuen Zelle befindet, aber immer noch in der alten Zelle angemeldet ist, also noch kein Zellwechsel auf Mobilfunkseite stattgefunden hat.

$$s_{\max} = \Delta t \cdot v_{\max} \cdot m + c \quad (4)$$

Wenn sich der Mobilfunkteilnehmer zum Zeitpunkt des Zellwechsels auf dem Schnittpunkt A zwischen Best-Server-Plot und Straßennetz befunden hat und zum Zeitpunkt des nächsten Zellwechsels auf dem Schnittpunkt B und in dem Zeitraum dazwischen höchstens den Weg $s_{\max}$ zurücklegen konnte, kann dieser sich nur innerhalb einer Ellipse bewegt haben. Die beiden Brennpunkte fallen mit den Schnittpunkten A und B zusammen und die Halbachsen ergeben sich aus dem Abstand s_{AB} zwischen den Brennpunkten und dem maximal zurückgelegten Weg (vgl. Abb. 18).

Wenn die beiden Schnittpunkte A und B den richtigen Positionen entsprächen, müsste das Straßennetz nur innerhalb dieser Ellipse aufgebaut werden. Da sich die Grenzkanten eines Zellwechsels aber mehrmals mit dem Straßennetz schneiden können, ergibt sich der im Zeitraum zwischen zwei Zellwechseln mögliche Aufenthaltsbereich aus der Summe aller Ellipsen, die sich aus allen Kombinationen der Schnittpunkte ergeben. Da für krummlinige Begrenzungen das Auslesen der Straßenkarte sehr zeitintensiv ist, wird der mögliche Aufenthaltsbereich durch ein geschlossenes Polygon approximiert. Dies wird realisiert indem die Hüllkurve um alle an zwei Zellwechseln beteiligten Schnittpunkte gelegt wird und zusätzlich um das Maximum der kleinen Halbachsen b durch Parallelverschiebung nach außen vergrößert wird, um keine potenziellen Routen zufällig abzuschneiden (vgl. Abb. 19).

Innerhalb des möglichen Aufenthaltsbereichs können alle darin enthaltenen Knoten und Kanten des Straßennetzes zu einem Teilgraph aufgebaut werden. Diese Aufenthaltsbereiche zwischen zwei aufeinander folgenden Zellwechseln können auf verschiedene Arten zusammengesetzt werden. Unter der Annahme, dass die protokollierten Zellwechsel immer durch die Positionsänderungen der Mobilfunkstation verursacht wurden, muss die FPD-Route durch jeden Zellwechsel führen. Um in jedem Teilgraph eines Aufenthaltsbereichs mögliche Wege zwischen aufeinander folgenden Zellwechseln zu bestimmen, werden zwischen den Anfangsknoten der Schnittkanten des Straßennetzes mit den Grenzen des vorherigen Zellwechsels und den Endknoten der Schnittkanten des Straßennetzes mit den Grenzen des nachfolgenden Zellwechsels kürzeste Wege in

allen Kombinationen berechnet. Alle Knoten und Kanten dieser kürzesten Wege werden zu einem Ersatzgraph zusammengefasst. In gleicher Weise ergeben sich für die weiteren Aufenthaltsbereiche mögliche Wege, um von einem Zellwechsel zum nächsten zu gelangen. Die Knoten und Kanten dieser Wege werden dem Ersatzgraph hinzugefügt, sofern sie noch nicht enthalten sind. Abb. 20 zeigt als Beispiel alle berechneten Hüllkurven einer Testfahrt von Stuttgart nach Karlsruhe.

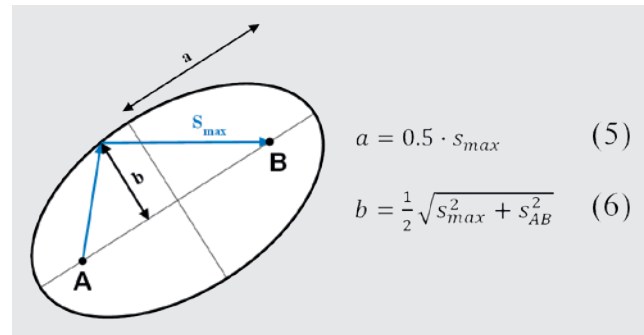


Abb. 18: Berechnung der Halbachsen

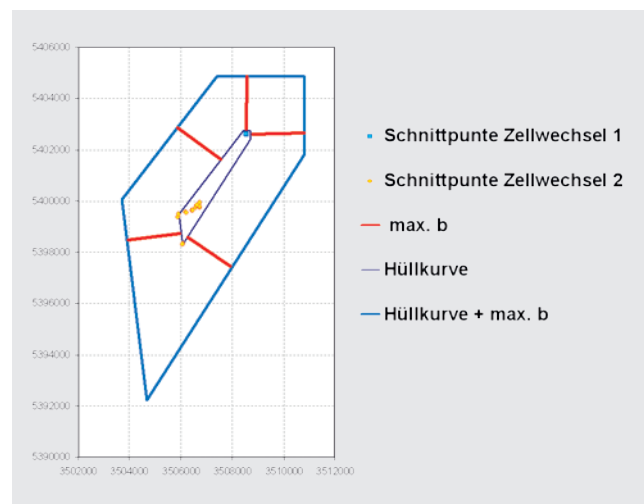


Abb. 19: Hüllkurve und möglicher Aufenthaltsbereich

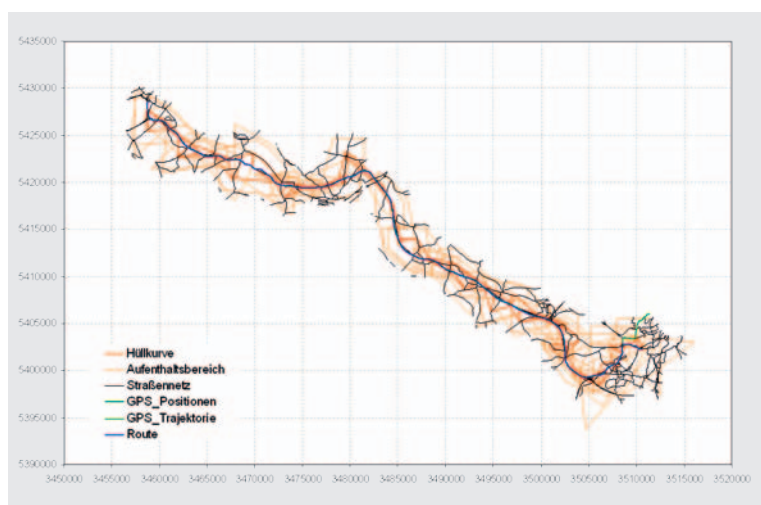


Abb. 20: Berechnete Hüllkurven und mögliche Wege einer Testfahrt von Stuttgart nach Karlsruhe (die GPS-Positionen dienen auch hier als Referenz)

Anschließend werden in diesem Ersatzgraph mögliche Routen als kürzeste Wege zwischen den Startknoten des ersten Zellwechsels und den Endknoten des letzten Zellwechsels bestimmt. Die letztendlich kürzeste Route wird als die wahrscheinlichste Route ausgewählt. Im letzten Schritt wird wiederum ein Weg-Zeit-Diagramm (vgl. Abb. 21) erstellt und zusammen mit der gewählten Route als Floating Phone Data weitergegeben.

In dem oben gezeigten Weg-Zeit-Diagramm aus A-Daten zeigt sich, dass dieses aus wesentlich weniger Positionen berechnet wird als ein Weg-Zeit-Diagramm aus Abis-Daten. Dies resultiert aus der Tatsache, dass ein Weg-Zeit-Diagramm aus A-Daten nur anhand der Schnittpunkte zwischen Straßennetz und Mobilfunkzellen (vgl. Kap. 3.3) berechnet werden kann. Aus diesem Grund verringert sich die Anzahl auf nur wenige Stützstellen. Da hier Ausreißer ein besonders hohes Gewicht haben, wird der Verlauf des Weg-Zeit-Diagramms durch ein gleitendes Mittel geglättet. Abb. 22 zeigt wiederum den Gesamtablauf des Verfahrens.

6.3 Ergebnisse der Map-Aiding-Verfahren

Im Folgenden werden exemplarisch Ergebnisse aus den Auswertungen von Testfahrten gezeigt. Hierzu werden unterschiedliche Parameter zur Beschreibung der Güte bzw. der Korrektheit der berechneten Trajektorien benutzt (Laufer 2011 und Do-iT 2009a). Die im Weiteren als Typ A bezeichnete Korrektheit beschreibt den korrekten Streckenanteil der FPD-Route (Route der Mobilfunkortung), der sich mit der GPS-Route deckt, bezogen auf die Länge der GPS-Route. Im Gegensatz dazu gibt Typ B den korrekten Streckenanteil der FPD-Route, der sich mit der GPS-Route deckt, bezogen auf die Länge der ermittelten FPD-Route an. Die beiden Parameter wurden eingeführt, da die Länge der FPD-Route und GPS-Route differieren können. Somit lässt sich die Korrektheit mit Typ B besser im Bezug zu der ermittelten FPD-Route beschreiben, was bessere Rückschlüsse für die spätere Anwendung zulässt.

Map-Aiding mit Abis-Daten

Wie die Untersuchungen zeigen, hängt die Korrektheit der Routen (sowohl Typ A als auch Typ B) stark von der Länge des zurückgelegten Wegs ab. Für 70% richtige Zuordnungen sind die entsprechenden Werte in Tab. 1 nachzulesen.

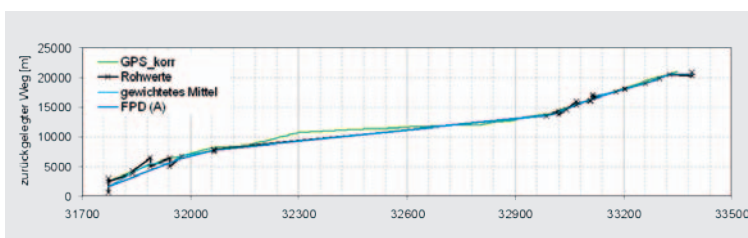


Abb. 21: Weg-Zeit-Diagramm aus A-Daten

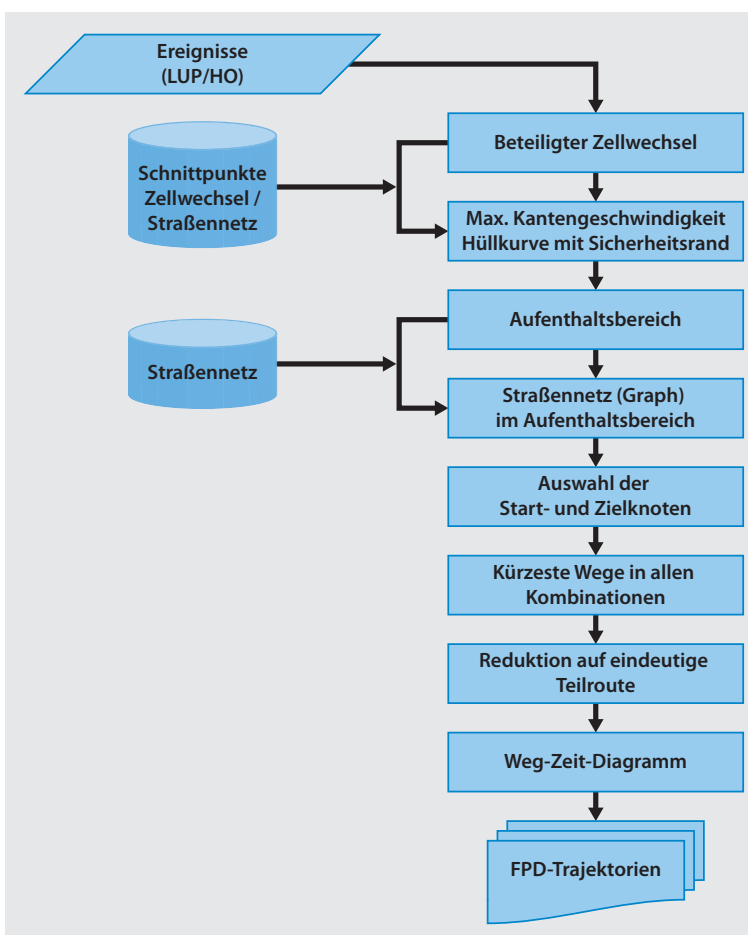


Abb. 22: Ablauf der Map-Aiding-Methode auf Grundlage von A-Daten

Tab. 1: Richtige Zuordnung in Bezug zur Trajektorienlänge

Länge	Zuordnung zu mindestens *% richtig					
	90 %		70 %		50 %	
	GPS Typ A	MFO Typ B	GPS Typ A	MFO Typ B	GPS Typ A	MFO Typ B
1–2 km	12 %	15 %	33 %	33 %	48 %	48 %
2–3 km	23 %	27 %	50 %	51 %	63 %	66 %
über 3 km	23 %	81 %	71 %	87 %	83 %	92 %

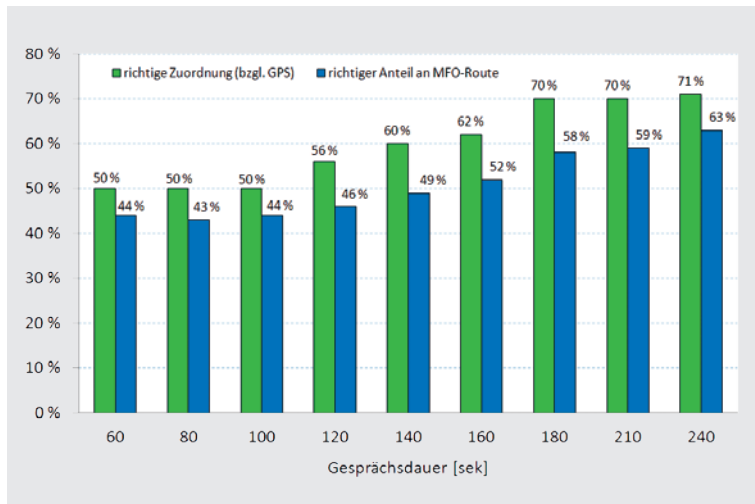


Abb. 23: Richtige Zuordnung in Bezug zur Gesprächslänge

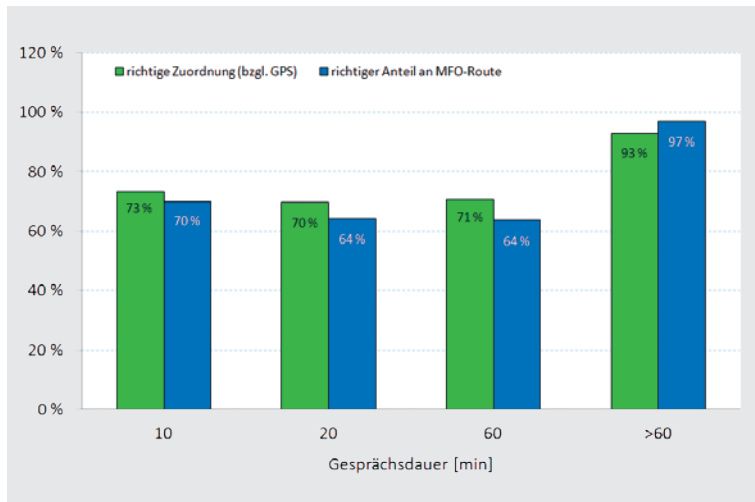


Abb. 24: Richtige Zuordnungen in Bezug zur Gesprächslänge (aktiv)

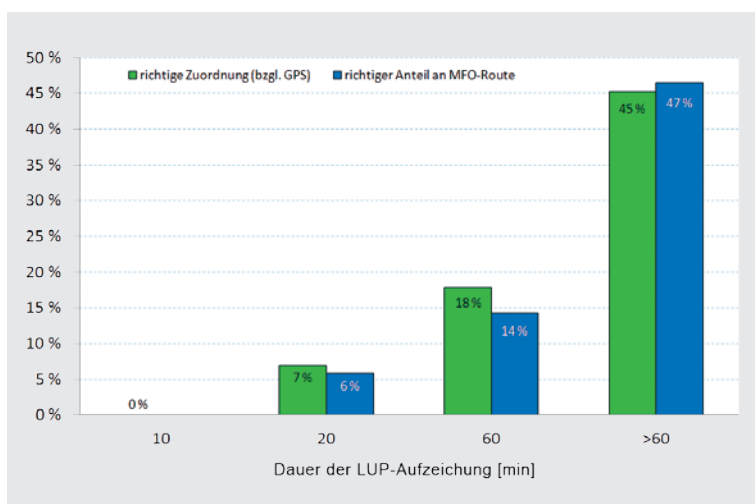


Abb. 25: Richtige Zuordnungen in Bezug zur verfolgten Zeit (passiv)

Dabei bezieht sich die Spalte »GPS« auf die mit GPS bestimmte Länge der Route und stellt somit den Korrektheitsratentyp A dar. Die Spalte »MFO« bezieht sich dagegen auf die mittels Mobilfunkortung bestimmte Länge der Trajektorie. Es handelt sich folglich um den Korrektheitsratentyp B, der als deutlich kritischer einzustufen ist. Die unten aufgeführten Ergebnisse resultieren aus 48 Messfahrten.

Bei weniger als einem Viertel der über 3 km langen Positionsfolgen können Routen bestimmt werden, die mit der GPS-Route zu über 90% übereinstimmen. Dies bedeutet, dass nicht über die komplette Gesprächszeit zuverlässige Informationen bestimmt werden können. Die ermittelten Routen enthalten jedoch in über 80% der Fälle weniger als 10% falsche Informationen. Will man 70% Korrektheit des Typs B erreichen, so gelingt das bei 1 bis 2 km langen Trajektorien nur für 33% der Trajektorien, bei 2 bis 3 km für 51% und bei mehr als 3 km langen Trajektorien für immerhin 87% der Trajektorien. Es sollten folglich nur Trajektorien, die länger als 3 km sind, einer Auswertung zugeführt werden. In Abb. 23 werden die richtigen Zuordnungen in Bezug auf die GPS-Route und in Bezug zur FPD-Route (MFO) mit unterschiedlichen Telefonatlängen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass eine deutliche Steigerung der richtigen Zuordnung erst ab einer Telefonatlänge von 180s möglich wird.

Als Kompromiss zwischen Performance, Genauigkeit und Abdeckungsrate wurden im Online-Betrieb Trajektorien, die länger als 2 km sind und gleichzeitig den Bedingungen »mehr als 15 Positionen«, »mindestens 60s Gesprächsdauer« und »berechnete Geschwindigkeit kleiner als 200 km/h« genügen, einer Auswertung zugeführt.

Map-Aiding mit A-Daten

Aufgrund von Verzögerungen während des Projekts und dem anstehenden Projektende konnten die Ergebnisse mit A-Daten nicht so ausführlich untersucht werden, wie dies mit den Abis-Daten erfolgte. Im Folgenden werden dennoch einige Ergebnisse gezeigt, die eine Einschätzung zulassen. Die Diagramme in Abb. 24 und Abb. 25 ergeben sich aus 30 Messfahrten, die hauptsächlich auf Bundesstraßen und Autobahnen stattgefunden haben. Da sich die Trajektorien hier nur über die Zellwechsel berechnen lassen und die Zellen mehrere Kilometer lang sein können, macht es hier keinen Sinn,

eine Analyse hinsichtlich der Fahrstrecke (km) durchzuführen. In den Diagrammen wird, wie in Abb. 23, die Dauer des Gespräches in Bezug zur richtigen Zuordnung einer FPD-Trajektorie gebracht. Die einzelnen Messfahrten waren dabei alle länger als 10 min.

Beim Betrachten von Abb. 24 wird deutlich, dass bei Gesprächen über 10 min mehr als 70% der Zuordnung bzgl. GPS erreicht werden. Der richtige Anteil der MFO-Route bleibt dabei über 60%. Dass dieser Anteil mit ansteigender Gesprächslänge zunächst kleiner wird, erscheint nicht logisch und lässt sich nur durch die geringe Anzahl der Messfahrten begründen. Bei Gesprächslängen über 60 min wird bei beiden Qualitätsparametern eine richtige Zuordnung von über 90% erreicht. Hierbei ist der richtige Anteil der MFO-Route etwas besser als der richtige Anteil bzgl. GPS.

Im Gegensatz zu Abb. 24 werden in Abb. 25 die Ergebnisse eines Mobilfunkteilnehmers im passiven Zustand gezeigt. Passiv heißt, das Mobilfunkgerät ist nur eingeschaltet und es werden nur die LAC-Wechsel registriert. Hierbei ist zu sehen, dass die Daten eines solchen Teilnehmers sehr lange aufgezeichnet werden müssen, bis ein brauchbares Ergebnis erreicht wird. Das bedeutet, dass zeitnahe Verkehrsprognosen nicht realisiert werden können, Verkehrsflussanalysen über einen Tag jedoch möglich sind. Voraussetzung ist natürlich die Anzahl der durchgeführten LAC-Wechsel. Die enormen Datenmengen, die in Echtzeit im gesamten Projektgebiet für die A-Daten-Prozessierung angefallen sind, konnten aufgrund der Rechenkapazität nicht vollständig ausgewertet werden (über zwei Millionen Teilnehmer pro Tag im Projektgebiet der A-Daten, im Vergleich dazu ca. 50.000 Teilnehmer pro Tag im Projektgebiet der Abis-Daten). Deshalb wurden bevorzugt die Datensätze einer Auswertung zugeführt, die hinsichtlich der Zuordnungskorrektheit die besten Routen erwarten ließen. Während der kurzen Online-Phase im März 2009 wurden zur Trajektoriengenerierung nur Datensätze mit mehr als sieben verschiedenen Zellen verwendet (vgl. Kap. 4.2).

7 Echtzeitbetrieb

Am Ende der Projektlaufzeit wurden die entwickelten Algorithmen unter Realbedingungen getestet. Der FPD-Server für die Abis-Daten wurde in Karlsruhe installiert und lief insgesamt vier Monate vom 12.11.2008 bis zum 31.3.2009. Dabei wurden ca. 1300 Trajektorien pro Tag berechnet. Im Offlinebetrieb konnten für einen Tag ca. 5000 Trajektorien berechnet werden, was einem Faktor Vier entspricht. Dies bedeutet, bei einer Reduzierung der Berechnungszeit um das Vierfache wäre es möglich, alle Trajektorien eines Tages in Echt-

zeit zu berechnen. Die Aktualität der Daten betrug dabei ca. 30 min. Diese Verzögerung ist mit dem aktuellen Bereitstellungsalgorithmus zu begründen, der aufgrund der verspäteten Datenbereitstellung durch den Netzanbieter vereinfacht entwickelt wurde. Durch entsprechende Optimierung ist eine Halbierung dieser Verzögerung zu erwarten.

Wegen der zuvor genannten Probleme bei den A-Daten, konnte der Echtzeitbetrieb nur einen Monat getestet werden. Der FPD-Server für A-Daten lief in Fellbach vom 28.2.2009 bis zum 31.3.2009. Für das gesamte Gebiet konnten täglich zwischen 20.000 und 30.000 Trajektorien berechnet werden. Im Offlinebetrieb konnten für einen Tag zwischen 200.000 und 300.000 Trajektorien berechnet werden, was einem Faktor 10 entspricht. Das heißt, hier müsste die Berechnungszeit um ein zehnfaches verringert werden, um alle Trajektorien eines Tages berechnen zu können. Auch hier betrug die Aktualität der Trajektorien ca. 30 min, die sich ebenfalls mit einem vereinfacht entwickelten Bereitstellungsalgorithmus begründen lässt (s.o.).



Abb. 26: Online-Darstellung von Stauvorhersagen auf Grundlage von Mobilfunkdaten

Die Stauvorhersagen auf Grundlage von Mobilfunkdaten wurden während der Online-Phase der FPD-Server im Internet dargestellt. Dabei war es möglich, die Stauvorhersagen der Projektpartner mit TMC-Pro zu vergleichen (vgl. Abb. 26). Die Stadt Karlsruhe hat hier eine Evaluierung bzgl. der Stauprognose mit Abis-Daten durchgeführt. Beim Vergleich der Stauprognosen auf Grundlage von Traffic Eyes und FPD (Abis) konnte eine Übereinstimmung von 87 % nachgewiesen werden (vgl. Do-iT 2009b). Die Grundlage hierfür waren ca. 11.000 Datensätze. Für die A-Daten konnte eine solche Evaluierung nicht durchgeführt werden, da es hier versäumt wurde, die Stauprognosen der einzelnen Systeme zu dokumentieren. Evaluierungen bzgl. Verkehrsaufkommen und Durchdringung sind in Laufer (2011) zu finden.

8 Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sowohl Abis-Daten als auch A-Daten grundsätzlich zur Verkehrsprognose herangezogen werden können. Der Vorteil der Abis-Daten liegt bei der höheren Auflösung im städtischen Bereich. Der Nachteil liegt beim hohen Aufwand des Datenabgriffs an den Base Station Controllern (BSC), die je nach Netz in deutlich höherer Zahl zu finden sind als die Mobile Switching Center (MSC). Dies bedeutet im Vergleich mit den A-Daten einen deutlich höheren infrastrukturellen Aufwand für den Abgriff der Abis-Daten. Demgegenüber kann bei den A-Daten ein sehr großes Gebiet an einer Stelle abgegriffen werden. Beide Verfahren sind in jedem Fall ergänzend zu sehen, da nicht überall die höhere Auflösung der Abis-Daten benötigt wird.

Während der Projektzeit konnten beide Verfahren mit Erfolg getestet und auf ihre Tauglichkeit als zusätzliche Information für Verkehrsprognosen überprüft werden. Hauptproblem im Moment ist sicherlich noch die Performance der Rechner, wobei sich dies durch Weiterentwicklungen im Hardwarebereich und durch Optimierung der Algorithmen verbessern lässt. Bei UMTS, der GSM-Nachfolgetechnologie, wird es zukünftig möglich sein, beide Datenquellen an einem Punkt abzugreifen. Das bedeutet, dass diese immer zur Verfügung stehen werden und es noch einfacher wird, beide Verfahren einzusetzen. Eine integrierte Auswertung drängt sich – bei zunehmender am Markt verfügbarer Rechnerleistung – geradezu auf. Somit können FPD zukünftig ergänzend zu FCD und stationären Erfassungssystemen ihren Beitrag zu Verkehrsprognosen leisten.

Literatur

- Catrein, D., Hellebrandt, M., Mathar, R., Serrano, M.: Location Tracking of Mobiles: A Smart Filtering Method and its Use in Practice. Proceedings IEEE VTC Spring 2004, Milan, pp. 2677–2681, 2004.
- Do-iT: Datenoptimierung für integrierte Telematik – Verbundabschlussbericht mit Anhängen, <http://www.tib.uni-hannover.de>, 2009a.
- Do-iT: Abschlussbericht zur Evaluierung des Projekts Do-it, <http://www.tib.uni-hannover.de>, 2009b.
- Friedrich, M., Immisch, K., Jehlicka, P., Otterstätter, T., Schlaich, J.: Generating OD matrices from Mobile Phone Trajectories. Compendium of Papers DVD of 89th Annual TRB Meeting, Transport Research Board, Washington D. C., 2010.

- ISO 14825:2004: Intelligent Transport Systems – Geographic Data Files (GDF) – Overall Data Specification, <http://www.iso.org>, 2004.
- Jonsson, D.K., Olavesen, J.: Estimated accuracy of location in mobile networks using E-OTD. Master Thesis in Information and Communication Technology, Grimstad, 2002.
- Hofmann-Wellenhof, B., Legat, K., Wieser, M.: Navigation – Principles of Positioning and Guidance. Springer, Wien, New York, 2003.
- Laufer, R., Beetz, A., Czommer, R., Schwieger, V.: Managing Data Quality Exemplified for Traffic Data Generated from Mobile Phone Data, 2009.
- Laufer, R.: Qualitätsmodell und -analyse in der Verkehrstelematik. zfv 1/2011, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 18–29, 2011.
- Ramm, K., Schwieger, V.: Mobile Positioning for Traffic State Acquisition. Journal of Location Based Services, Taylor & Francis, London, 2008.
- Schlaich, J.: Nutzung von Mobilfunkdaten für die Analyse der Routenwahl. Elektronische Ressource, http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2010/5102/pdf/Dissertation_Schlaich.pdf, 2010.
- Schwieger, V., Ramm, K., Czommer, R., Möhlenbrink, W.: Mobile Phone Positioning for Traffic State Acquisition. Journal of Applied Geodesy, volume 1, issue 3, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 2007.
- TrafficOnline: Online Verkehrsdatenerfassung über Mobilfunknetze; Verbundprojektabschlussbericht mit Anhängen, <http://www.tib.uni-hannover.de>, 2008.
- Walke, B.: Mobilfunknetze und ihre Protokolle 1. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, 2001.
- Wiesmann, R.: Mehrwertdienste durch Positionsbestimmungen. Funkschau 26/2000, Weka-Verlagsgruppe, München, S. 26–38, 2000.
- Wunderlich, T.: Ortsbezogene Information – jederzeit und Überall. zfv 3/2001, Wittwer Verlag, Stuttgart, S. 117–122, 2001.
- Ygnace, J.L.: Travel Time/Speed Estimates on the French Rhone Corridor Network using Cellular Phones as Probes. Projekt STRIP, 5. Europäisches Forschungsrahmenprogramm. Technischer Bericht, Inrets Lescot, Lyon (Frankreich), 2001.

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Alexander Beetz
Universität Stuttgart, Institut für Ingenieurgeodäsie
Geschwister-Scholl-Straße 24D, 70174 Stuttgart
alexander.beetz@ingeo.uni-stuttgart.de

Dr.-Ing. Renate Czommer
renate.czommer@web.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schwieger
Universität Stuttgart, Institut für Ingenieurgeodäsie
Geschwister-Scholl-Straße 24D, 70174 Stuttgart
volker.schwieger@ingeo.uni-stuttgart.de