

Effiziente automatisierte Erstellung von Straßenkarten

Patrick Baier, Harald Weinschrott, Frank Dürr

{*vorname.nachname*}@ipvs.uni-stuttgart.de

Institut für Parallele und Verteilte Systeme

Universitätsstraße 38, 70569 Stuttgart, Germany

Abstract: Das relativ junge Paradigma des Urban Sensing ermöglicht die kostengünstige Bereitstellung von Sensordaten, welche in diesem Umfang bisher nicht zugänglich waren. Ein potentieller Verwendungszweck dieser Daten liegt im Bereich der Kartografie, indem von Mobilgeräten erfasste GPS-Daten genutzt werden, um Straßenkarten automatisch zu erstellen. Dadurch kann eine Ersparnis hinsichtlich Aufwand und Kosten, im Vergleich zu konventionellen Methoden der Karten erstellung, erzielt werden. Diese Arbeit stellt einen solchen Ansatz zur effizienten, automatisierten Erstellung von Straßenkarten mithilfe von GPS-Sensordaten vor. Diese Daten werden dabei automatisch von Personen gesammelt, die ihre Mobilgeräte wie gewohnt mit sich führen, zusätzlich aber auf ihren alltäglichen Wegen GPS-Positionsinformationen erfassen, welche sie einem zentralen System zur Verfügung stellen. Dies geschieht automatisch, ohne dass eine Interaktion dieser Personen nötig ist. Im Gegenzug soll der Ressourcenverbrauch der teilnehmenden Mobilgeräte möglichst minimiert werden. Daher koordiniert der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz die Erfassung der GPS-Daten so, dass die Mobilgeräte diese möglichst nur dann erfassen, wenn sie sich in einem Gebiet befinden, welches bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausreichend kartografisch erfasst wurde. Um diese gezielte Koordination der Mobilgeräte zu ermöglichen, werden im Rahmen dieser Arbeit Qualitätsmetriken für Geodaten vorgestellt, welche den erfassten Straßen quantitative Größen zuordnen, um so einen Vergleich dieser Daten zu ermöglichen.

1 Einleitung

Mobiltelefone der neuesten Generation verfügen zunehmend über eine Reihe von Sensoren, mit denen Umgebungs- und Positionsdaten erfasst und verarbeitet werden können. Die Tatsache, dass diese Geräte von ihren Besitzern auf deren alltäglichen Wegen mitgeführt werden, eröffnet eine neue Möglichkeit für die sensorische Erfassung der Umwelt, die unter dem Namen *Urban Sensing* bereits mehrfach theoretisch diskutiert wurde ([CHK08], [CEL⁺06], [LEM⁺08]). Ein konkreter Anwendungsbereich, der von diesem Fortschritt profitiert, ist die Kartografie, welche bis vor wenigen Jahren nur von wenigen Fachmännern ausgeübt wurde, da die dafür benötigte Technologie und das erforderliche Fachwissen nur schwer zugänglich waren. So konnte sich in den letzten Jahren eine Methode der Kartenerstellung etablieren, welche unter dem Namen *Collaborative Mapping* Verbreitung fand [Gil03]. Deren Prinzip besteht darin, dass die für die Kartenerstellung erforderlichen Geodaten von einer Vielzahl von Teilnehmern, mithilfe einer Lokalisierungstechnik (z.B. GPS), gesammelt und auf einer zentralen Plattform zu einer Karte integriert werden. Das bisher bekannteste und größte Projekt in diesem Kontext ist *OpenStreetMap* (OSM), bei dem die Teilnehmer zuvor aufgezeichnete GPS-Tracks an einen Server übermitteln und somit inkrementell bei der Erstellung einer frei zugänglichen Weltkarte mit-

Veröffentlicht in: 7.GI/ITG KuVS-Fachgespräch. Ortsbezogene Anwendungen und Dienste. Axel Küpper, Jörg Roth (Hrsg.), ISBN 978-3-8325-2935-2, 250 Seiten, Erscheinungsjahr: 2011

wirken. Eines der Probleme mit denen sich OSM jedoch konfrontiert sieht, liegt in der geringen Partizipationsrate der Benutzer. So zeigen Untersuchungen, dass nur ein geringer Teil der Nutzer aktiv Geodaten zur Weltkarte beisteuert. Daraus ergibt sich die Problematik, dass viele Gebiete noch nicht oder nur in vergleichbar geringer Qualität erfasst wurden [HW08].

Eine Lösung dieses Problems besteht darin, die Kartenerstellung zu automatisieren und somit die manuelle Kartenbearbeitung durch die Benutzer zu vermeiden. Dies kann erreicht werden, indem der bereits beschriebene Urban Sensing Ansatz dahingehend genutzt wird GPS-Positionsinformationen automatisch von Mobilgeräten auszulesen und über eine zentrale Stelle zu einer Straßenkarte zu integrieren. Da die Geodaten dabei von Mobilgeräten ausgelesen werden, welche von gewöhnlichen Menschen mitgeführt werden, ist es wichtig, dass bei diesem Verfahren die Ressourcen der teilnehmenden Mobilgeräte, durch Vermeidung von redundanten Erfassungen, weitestgehend geschont werden, um somit die Akzeptanz des Systems bei den Nutzern zu wahren. Der Beitrag dieser Arbeit liegt daher darin, ein Verfahren vorzustellen, welches die Erstellung von Straßenkarten effizient automatisiert. Dieses überführt die dezentral erfassten GPS-Daten in eine einheitliche Repräsentation von Straßen und beinhaltet eine aktive Steuerung der Mobilgeräte, um die Erfassung hinsichtlich der Ressourcenschonung zu koordinieren. Ein zentraler Server erkennt, zu jeder Zeit der Erfassung, bereits gut erfasste Teilbereiche des Erfassungsgebiets und weißt die Mobilgeräte an, diese zu Gunsten des Ressourcenverbrauchs zu vernachlässigen. Dazu wurde zum einen eine Qualitätsmetrik definiert, welche einen Vergleich der bisher erfassten Geodaten ermöglicht, und zum anderen ein Konzept entworfen, anhand dessen der Server entscheidet, welche Bereiche mit Fortschreiten der Erfassung vernachlässigbar sind.

Die Arbeit ist wie nachfolgend beschrieben aufgebaut. In Abschnitt 2 werden bereits vorhandene Veröffentlichungen vorgestellt und untersucht, in wie weit sie einen Beitrag zum Ziel dieser Arbeit leisten können. Abschnitt 3 stellt unser Systemmodell vor, bevor Abschnitt 4 die eigentliche Methodik der Kartenerstellung präsentiert und alle erwähnten Teilschritte und Algorithmen für deren Umsetzung beschreibt. Anschließend werden in Abschnitt 5 die Ergebnisse der Evaluation des Ansatzes vorgestellt, bevor Abschnitt 6 diese, mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick, abrundet.

2 Related Work

Diese Arbeit ist, nach bestem Stand unseres Wissens, die erste welche sich speziell mit der automatischen und ressourcenschonenden Erstellung von Straßenkarten beschäftigt. Dennoch nutzt sie Erkenntnisse aus anderen Veröffentlichungen und baut auf diesen auf. So gibt es eine Reihe von Arbeiten, welche sich mit der Problematik beschäftigen, wie aus einer Menge von GPS-Tracks ein einheitliches Straßenmodell generiert werden kann. Diese werden nachfolgend kurz vorgestellt.

Das generelle Problem bei der Erstellung einer Straßenkarte aus einer Menge von GPS-Tracks liegt darin, dass Tracks, die auf der gleichen Straße erfasst wurden, aufgrund der inhärenten Unschärfe von GPS-Ortungen und des möglichen zeitlichen Versatzes der Wegpunkte, oft nicht

identisch sind. Daher gilt es Tracks, die die gleiche Straße beschreiben, zu erkennen und entsprechend zu fusionieren. Morris et al. [MMB04] stellen ein Verfahren vor, welches die gegebenen GPS-Tracks in einen Graphen umwandelt und diesen mithilfe von Reduktionsalgorithmen und Interpolation zu einer einheitlichen Straßenkarte umformt. Ähnlich gehen Chen et al. [CGHS10] in ihrer Arbeit vor. Sie analysieren die Kanten des Graphen auf Ähnlichkeit und fusionieren diese gegebenenfalls. Roth [Rot08] verzichtet auf die Verwendung eines Graphen und analysiert, ob die GPS-Tracks paarweise einen ähnlichen Verlauf haben und durch einen konstanten Fehler getrennt sind. Ist dies der Fall, werden die Wegpunkte der beiden Tracks interpoliert.

Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz grenzt sich von den vorgestellten dahingehend ab, dass er neben der automatischen Kartenerstellung den Aspekt der Ressourcenschonung in den Mittelpunkt rückt, welcher in keiner der genannten Veröffentlichungen berücksichtigt wurde. Da für die Umsetzung dieses Ziels jedoch ein Verfahren zur Integration von GPS-Tracks nötig ist, nehmen wir als Grundlage für diese Arbeit das Verfahren von Roth, da dieses die Online-Integration der GPS-Tracks in ein Straßenmodell ermöglicht und außerdem den individuellen Fehler jeder einzelnen GPS-Ortung berücksichtigt.

3 Systemmodell

Die Komponenten des Systems sind zum einen die Mobilgeräte, welche die GPS-Daten erfassen, und zum anderen der zentrale Server, der diese Daten zu einer Straßenkarte integriert und die Erfassung der Mobilgeräte koordiniert.

Die Mobilgeräte werden von Personen mitgeführt und bewegen sich über die Straßen, welche bei der Kartenerstellung erfasst werden sollen. Diese Bewegungen können vom System nicht beeinflusst werden. Jedes Mobilgerät verfügt über einen GPS-Sensor, der die aktuelle Position des Geräts bestimmen kann, welche jedoch immer einer Ungenauigkeit unterliegt. Wir nehmen an, dass für jede GPS-Ortung ein Maß für die Genauigkeit der Messung vorliegt, welches zum Beispiel über die verfügbaren DOP-Werte bestimmt werden kann. Zusätzlich verfügt jedes Mobilgerät über eine Datenverbindung (z.B. UMTS) über die es mit dem Server kommunizieren kann.

Der Server verfügt ebenfalls über eine Kommunikationsschnittstelle, über welche er gezielt alle Mobilgeräte kontaktieren kann. Zudem verfügt er über eine Datenbank, in der er alle bisher erfassten Straßenverläufe speichert.

4 Konzeptionelle Umsetzung

Der generelle Ablauf der Kartenerstellung besteht im einfachsten Fall darin, dass alle Mobilgeräte, die sich in einem zuvor festgelegten Erfassungsgebiet befinden, dauerhaft GPS-Ortungen durchführen, diese zu GPS-Tracks zusammenfügen und in regelmäßigen Abständen an den Server senden. Empfängt der Server einen solchen Track, integriert er diesen, mit dem in Abschnitt

2 beschriebenen Verfahren von Roth, in ein einheitliches Straßenmodell.

Das Problem dieses Ansatzes liegt in der hohen Ressourcenbelastung für die Mobilgeräte, da GPS-Ortungen auch dauerhaft für Bereiche durchgeführt werden, die bereits ausreichend gut erfasst wurden. Der nachfolgende Ansatz erweitert obigen daher so, dass der Server nach jeder Veränderung am Straßenmodell dieses analysiert und die Bereiche des Erfassungsgebiets erkennt, die momentan überdurchschnittlich gut erfasst sind. Diese teilt er den Mobilgeräten mit, welche die Erfassung von GPS-Daten für diese Bereiche zu Gunsten ihres Ressourcenverbrauchs einstellen. Damit der Server die erfassten Straßen hinsichtlich ihrer Qualität verglichen kann, muss er auf eine Qualitätsmetrik für bereits erfasste Straßen zurückgreifen können, welche im folgenden Abschnitt definiert wird.

4.1 Qualitätsmetriken

Für die Beurteilung der Qualität von Straßen, die vom System erfasst wurden, betrachten wir zwei unterschiedliche Charakteristiken von Straßenverläufen. Zum einen wollen wir die Genauigkeit des Straßenverlaufs hinsichtlich seiner Formtreue (siehe Abbildung 1a) und zum anderen hinsichtlich seiner absoluten Position beurteilen (siehe Abbildung 1b). Aufbauend auf diesen beiden Definitionen, wird anschließend eine Qualitätsmetrik für einzelne Teilbereiche des Erfassungsgebiets definiert.

Wie aus Abbildung 1a) ersichtlich ist, wird die Abbildung der ursprünglichen Form des Straßenverlaufs umso besser, je kleiner die Winkel zwischen den Kanten der Wegpunkte des erfassten Straßenverlaufs im Schnitt sind. Den Durchschnittswert dieser Winkel für eine Straße r zum Zeitpunkt t bezeichnen wir mit $A_r(t)$. Im Gegensatz zur Formtreue können wir die Genauigkeit der einzelnen Wegpunkte hinsichtlich ihrer absoluten Positionen über den in Abschnitt 3 erwähnten Wert für die Genauigkeit der GPS-Ortung bestimmen. Abbildung 1b) zeigt für jeden Wegpunkt des Straßenverlaufs dessen Genauigkeit in Form des zugehörigen Konfidenzintervalls, der aus diesem Genauigkeitswert ableitbar ist. Daraus ermitteln wir für eine Straße r den Durchschnittswert dieser Genauigkeitsangaben zum Zeitpunkt t und bezeichnen ihn mit $P_r(t)$. Um nun jeder erfassten Straße r zu jedem Zeitpunkt t einen eindeutigen Qualitätswert zuweisen zu können, integrieren wir diese beide Werte zu einer Qualitätsmetrik $Q_r(t)$, welche wie folgt definiert ist:

$$Q_r(t) = \frac{1}{A_r(t) \cdot P_r(t)} \quad (1)$$

Hier ist der Sonderfall zu berücksichtigen, dass $A_r(t)$ für senkrecht aufeinander stehende Kanten den Wert 0 annehmen kann.

Mithilfe dieser Qualitätsmetrik kann nun einzelnen Bereichen des Erfassungsgebiets ein Qualitätswert zugewiesen werden. Dazu unterteilen wir den Erfassungsbereich in Gitterzellen der Seitenlänge g (siehe Abbildung 2a). Für jede Gitterzelle c soll zu einem Zeitpunkt t ein Qualitätswert $Q_c(t)$ definiert werden. Um diesen zu ermitteln, berechnen wir für jeden Straßenabschnitt, der sich zum Zeitpunkt t in Zelle c befindet, den Qualitätswert $Q_r(t)$ und gewichten diesen, indem wir ihn mit seiner Länge l multiplizieren (siehe Abbildung 2b). Somit erhalten wir für jeden Straßenabschnitt, der sich in der Zelle befindet, einen gewichteten Qualitätswert.

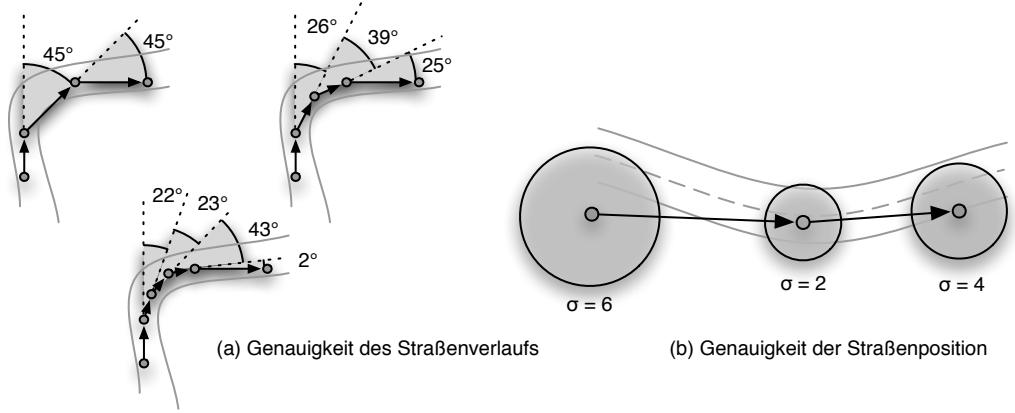


Abbildung 1: Qualitätsmetrik für Straßen

Den Qualitätswert $Q_c(t)$ für Zelle c erhalten wir nun, indem wir aus diesen Werten wiederum den Durchschnitt bilden. Anhand der Qualitätswerte für die einzelnen Gitterzellen kann nun untersucht werden, welche Teilbereiche mehr oder weniger gut erfasst sind, und entschieden werden, wann die gut erfassten Teilbereiche von der Erfassung ausgesetzt werden sollen.

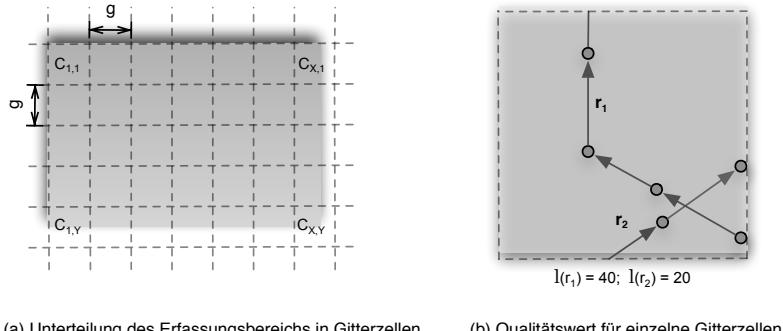


Abbildung 2: Qualitätsmetrik für Gitterzellen

4.2 Steuerung der Erfassung

Die koordinierte Erfassung der GPS-Daten basiert auf dem Prinzip, den zuvor definierten Gitterzellen des Erfassungsgebiets einen dynamischen Status zuzuweisen, der entweder aktiv oder passiv sein kann. Dabei sollen Mobilgeräte, die sich innerhalb einer aktiven Zelle befinden, dauerhaft GPS-Daten erfassen, während Mobilgeräte in passiven Zellen die Erfassung aussetzen sollen. Den Status der jeweiligen Gitterzellen sendet der Server nach jeder Änderung an die Mobilgeräte, welche dann je nach Standort entscheiden, ob sie GPS-Daten erfassen oder nicht.

In Folge einer Modifikation des Straßenmodells, legt der Server mithilfe folgender Formel fest, welchen Status jede einzelne Zelle c zum Zeitpunkt t erhalten soll:

$$Status(c) = \begin{cases} passiv, & \text{wenn } Q_c(t) > Q_{avg}(t) + \Delta(t) \\ aktiv, & \text{sonst} \end{cases} \quad (2)$$

Hierbei bezeichnet $Q_{avg}(t)$ den Durchschnitt der Qualitätswerte aller nicht leeren Gitterzellen zum Zeitpunkt t . Ist der Qualitätswert einer Zelle um $\Delta(t)$ größer als dieser Durchschnitt, erhält sie einen passiven Status und wird von der Erfassung ausgesetzt. Dem Term $\Delta(t)$ kommt somit die entscheidende Rolle bei der Bestimmung des Status der Gitterzellen zu. Bevor wir diesen explizit definieren, wollen wir an dieser Stelle kurz auf die Charakteristiken der Straßenerfassung eingehen.

Im Anfangsstadium der Straßenerfassung ist die Mehrheit der im Erfassungsgebiet befindlichen Straßen mit großer Wahrscheinlichkeit noch nicht entdeckt. Würde der Server in dieser Phase einer Zelle einen passiven Status zuzuweisen, weil darin bereits einige wenige Straße gut erfasst wurden, besteht die Möglichkeit, dass Straßen, die sich in dieser Zelle befinden aber bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht erfasst wurden, unentdeckt bleiben. Mit Fortschreiten der Zeit werden immer mehr Straßen entdeckt, so dass die erwähnte Problematik unwahrscheinlicher wird. Dieses Verhalten berücksichtigen wir im Term $\Delta(t)$, indem wir ihn für kleine Werte von t entsprechend dämpfen, so dass die Ungleichung aus 2 in der Anfangsphase nicht erfüllt wird. Da wir den genauen Anteil der entdeckten Straßen jedoch nicht kennen, benötigen wir eine Funktion, welche diesen so genau wie möglich abschätzt. Dazu bedienen wir uns einer beschränkten Wachstumsfunktion, da ihr Verhalten den Anteil der entdeckten Straßen über die Zeit realistisch annähert.

Zur Definition von $\Delta(t)$ führen wir einen Systemparameter m ein, welcher durch die erwähnte beschränkte Wachstumsfunktion gedämpft wird. Letztere definieren wir so, dass sie Funktionswerte zwischen 0 und 1 annimmt und dass der zugehörige Wachstumsparameter a so gewählt ist, dass die Funktion zum Ende der beabsichtigten Erfassung den Wert 1 nahezu vollständig erreicht.

$$\Delta(t) = \frac{m}{1 - e^{a \cdot t}} \quad (3)$$

Dem Systemparameter m kommt dabei eine wichtige Rolle zu, da dieser die Aggressivität des Verfahrens entscheidend beeinflusst. Unabhängig vom Term im Nenner, wird die Ungleichung aus 2 für kleine Werte von m eher erfüllt, während ein großer Wert für m nahezu einer dauerhaften Erfassung der Mobilgeräte entspricht.

Ändert sich der Status mindestens einer Gitterzelle, so sendet der Server eine Aktualisierung der Statuswerte an die Mobilgeräte, welche daraufhin entsprechend reagieren und die Erfassung starten bzw. beenden. Hierbei entsteht das Problem, dass Mobilgeräte, die die Erfassung eingestellt haben, nicht mehr erkennen können, wenn sie sich in eine aktive Zelle bewegen. Sie müssen daher in gewissen Zeitabständen GPS-Ortungen durchführen, um ihre Position zu überprüfen. Um eine möglichst gute Schätzung darüber zu erhalten, wann sie wieder eine aktive Zelle betreten, bestimmen sie diesen Zeitabstand aus dem Quotienten des kürzesten Abstands zum Rand ihrer aktuellen Gitterzelle und ihrer momentanen Geschwindigkeit, die aus der aktuellen GPS-Ortung ableitbar ist.

5 Evaluation

Das zuvor vorgestellte Konzept wurde im Rahmen einer Evaluation mit dem Netzwerksimulator ns-2 analysiert. Dabei wurden mithilfe von *UDelModels* [KSB07] Tracefiles generiert, welche die Bewegungsabläufe von Fußgängern und Autos in urbaner Umgebung realistisch simulieren sollen. Es wurde jeweils ein Szenario für Fußgänger und für Autos erstellt, welches im zeitlichen Rahmen eines Werktages, unter Verwendung von jeweils 1000 mobiler Knoten, simuliert wurde.

Bei der Auswertung wurde zuerst die Summe der verbrauchten Energie aller Komponenten ermittelt und diese dann als Energieeinsparung in Relation zum Fall der dauerhaften Erfassung von GPS-Daten betrachtet. Als zweite Metrik wurde die am Ende der Erfassung entstandene Straßenkarte, welche qualitativ hinsichtlich der Anzahl der darin enthaltenen Wegpunkte betrachtet wurde, ausgewertet und ebenfalls in Relation zur dauerhaften Erfassung analysiert. Diese Metriken wurden für verschiedene Systemparameter m (siehe Abschnitt 4.2) verglichen, wobei der Fall $m = 1$ der dauerhaften Erfassung entspricht.

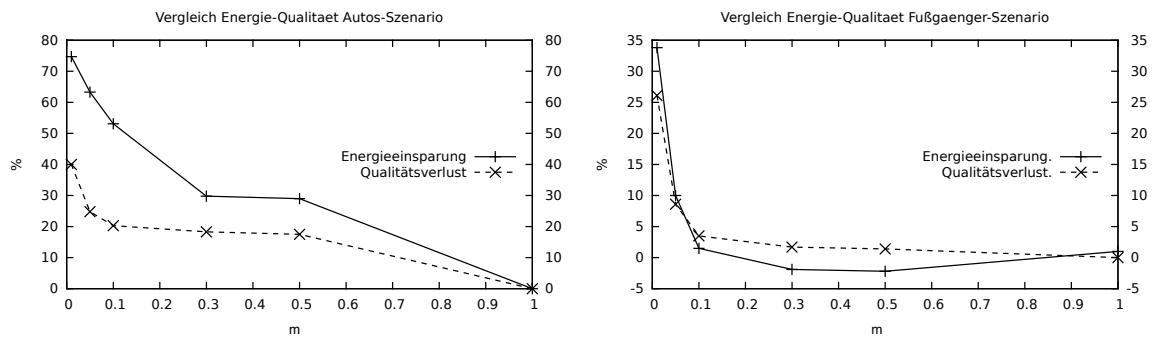


Abbildung 3: Ergebnisse der Evaluation

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse für die Simulation des Auto- und Fußgänger-Szenarios für die vorgestellten Metriken. Wie ersichtlich wird, ist für kleine m die relative Energieeinsparung höher als der resultierende Qualitätsverlust. Während sich beim Fußgänger-Szenario dieses Verhältnis für größere m umkehrt, ist dies im Auto-Szenario nicht der Fall. Daraus lässt sich schließen, dass das Verfahren generell für Autos, welche sich bezüglich ihrer Bewegungsabläufe homogener verhalten, effizienter ist, da homogene Bewegungen schneller zu einem eindeutigen Straßennetz und somit zu einer höheren Straßenqualität führen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine Methode vorgestellt, mit der Straßenkarten automatisch und ressourcenschonend generiert werden können. Unter Verwendung von bereits veröffentlichten Fusionsalgorithmen und durch Einführung einer Qualitätsmetrik für bereits erfasste Geodaten,

konnte ein Verfahren entwickelt werden, welches die teilnehmenden Mobilgeräte koordiniert und somit eine Ressourcenersparnis ermöglicht. Die durchgeführte Evaluation konnte zeigen, dass diese Ressourcenersparnis, relativ gesehen, größer ist als die dadurch entstandene Qualitätsminderung. Speziell bei der Datenerfassungen durch Autos, konnte eine deutliche Energieersparnis erzielte werden, da diese sich in ihren Bewegungsabläufen sehr stark ähneln und somit das Verfahren begünstigen.

Der in dieser Arbeit beschriebene Ansatz soll als erste Ausgangsbasis für weitere Entwicklungen dienen. Einen möglichen Ansatzpunkt bietet die Weiterentwicklung der in Abschnitt 4.1 vorgestellten Qualitätsmetrik, welche eine wichtige Rolle für die Erfassung der GPS-Daten spielt. Ein zusätzlicher Aspekt liegt in der Berücksichtigung der Alterung von Straßen, welcher in die Qualitätsmetrik der Straßen mit einfließen könnte und somit der Dynamik des Straßennetzes gerecht wird.

Literatur

- [CEL⁺06] Andrew T. Campbell, Shane B. Eisenman, Nicholas D. Lane, Emiliano Miluzzo und Ronald A. Peterson. People-centric urban sensing. In *WICON '06: Proceedings of the 2nd annual international workshop on Wireless internet*, Seite 18, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [CGHS10] Daniel Chen, Leonidas Guibas, John Hershberger und Jian Sun. Road Network Reconstruction for Organizing Paths. In *ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, 2010.
- [CHK08] Dana Cuff, Mark Hansen und Jerry Kang. Urban sensing: out of the woods. *Commun. ACM*, 51(3):24–33, 2008.
- [Gil03] E. Mac Gillavry. Collaborative mapping: grassroots LBS. Presentation delivered during the first session “Location, location, location: cartography in a 3G environment” of Cartography 2003, 2.-5. September 2003.
- [HW08] Mordechai Haklay und Patrick Weber. OpenStreetMap: User-Generated Street Maps. *IEEE Pervasive Computing*, 7(4):12–18, 2008.
- [KSB07] Jonghyun Kim, Vinay Sridhara und Stephan Bohacek. Realistic Mobility Simulation of Urban Mesh Networks. Bericht, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Delaware, 2007.
- [LEM⁺08] Nicholas D. Lane, Shane B. Eisenman, Mirco Musolesi, Emiliano Miluzzo und Andrew T. Campbell. Urban sensing systems: opportunistic or participatory? In *HotMobile '08: Proceedings of the 9th workshop on Mobile computing systems and applications*, Seiten 11–16, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [MMB04] Scott Morris, Alan Morris und Kobus Barnard. Digital trail libraries. In *JCDL '04: Proceedings of the 4th ACM/IEEE-CS joint conference on Digital libraries*, Seiten 63–71, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [Rot08] Joerg Roth. Extracting line string features from GPS logs. *Schriftenreihe der Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nuernberg*, 2008.