

„Entwurf und Analyse eines DTN-Routingverfahrens für ÖPNV-Netze“

Bearbeitet von: Tobias Pögel (poegel@ibr.cs.tu-bs.de)

Im Bereich des ÖPNV wird oftmals eine Fahrzeug-zu-Fahrzeug sowie Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation benötigt oder gewünscht um verschiedene Anwendungen oder Dienste zu realisieren. Dies können beispielsweise neuartige Fahrgastinformationssysteme sein, die einer regelmäßigen Aktualisierung der Daten bedürfen. Eine andere denkbare Einsatzmöglichkeit ist die Übertragung der von Fahrzeugen des ÖPNV aufgenommenen Mess- und Sensordaten, die ebenfalls einer regelmäßigen und schnellen Übertragung bedürfen. Diese Daten können beispielsweise für das Verkehrsmanagement und für Umweltinformationssysteme genutzt werden.

Oftmals sind solche Daten nicht sonderlich zeitkritisch. Für die Kommunikation soll zudem aus Kapazitäts- und Kostengründen nicht auf zelluläre Netze, wie z.B. UMTS, zurückgegriffen werden. Eine günstige Alternative stellt die Verwendung von WLAN-Verbindungen nach dem 802.11 a/b/g/n Standard dar.

Ein Problem ist jedoch, dass für die üblicherweise verwendeten Protokolle, wie z.B. TCP, Ende-zu-Ende Verbindungen bestehen müssen. Beim WLAN betragen die Funkreichweiten im Außenbereich üblicherweise einige hundert Meter, so dass Ende-zu-Ende Verbindungen oftmals nicht möglich sind, da die Entfernungen zwischen den Fahrzeugen des ÖPNV mehrere Kilometer betragen kann. Ein Aufbau einer entsprechend geeigneten Infrastruktur scheitert bisher aus Kostengründen.

Stattdessen soll ein neuartiger Ansatz verfolgt werden, das sogenannte „Delay-Tolerant Networking“ (kurz DTN). Dieses funktioniert nach dem Store-and-Forward Prinzip und ermöglicht hierdurch eine Kommunikation über WLAN-Verbindungen auch ohne eine unmittelbare Ende-zu-Ende Verbindung. Datenbündel werden dabei bei jedem Kontakt zwischen Fahrzeugen weitergereicht, bis sie schließlich ihr Ziel erreichen.

Das Problem, welches dabei unweigerlich auftritt, ist die Frage, auf welchem Weg, also über welche Fahrzeuge, Datenbündel am schnellsten und effektivsten von einem Quellknoten zu dem gewünschten Zielknoten transportiert werden können. Hierfür existieren bereits verschiedene Routingverfahren, die aber entweder sehr hohe durchschnittliche Laufzeiten zur Folge haben oder eine äußerst hohe Ressourcenlast (z.B. hohe Speicherlast, großer Kommunikationsbedarf) erzeugen. Somit sind bei schwierigen Umgebungsbedingungen oder einem hohen Datenaufkommen keine zufriedenstellenden Resultate zu erzielen.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird ein neues ressourcenschonendes Routingverfahren entwickelt, welches das Ziel verfolgt sich möglichst geschickt Kontextinformationen zunutze zu machen und darauf basierend Routingentscheidungen trifft. Kontextinformationen können beispielsweise Fahrpläne sein oder auch zusätzliches Wissen über das Netz und das Linienverzeichnis. Dabei ist aber auch wichtig, dass äußere mögliche Einflüsse, die unweigerlich irgendwann auftreten, mitberücksichtigt werden. Dies können Verspätungen oder Ausfälle von Fahrzeugen sein, die durch Staus oder Defekte entstehen können. Das Routing muss hierauf möglich robust reagieren können, ohne dass es zu anderweitigen größeren Einflüssen und Störungen kommt.

Zuvor bedarf es jedoch einer Analyse bereits existierender Verfahren. Hierzu wird der ÖPNV mittels der Verkehrssimulationsumgebung 'SUMO' auf deren Eigenschaften hin untersucht. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen dem anschließenden Entwurf eines neuen geeigneten Routingverfahrens zu Grunde gelegt werden.

Neben dem reinen Entwurf und der vorausgegangenen Analyse findet anschließend auch eine Umsetzung des Routingverfahrens für eine DTN-Simulationsumgebung statt. Mit Hilfe dieser Simulationen kann hinterher eine Auswertung bzw. ein Vergleich zu bereits existierenden Routingverfahren erfolgen. Dazu müssen zunächst geeignete Bewegungsmuster erzeugt werden, bei denen die zuvor ermittelten Eigenschaften des ÖPNV sowie die äußeren Einflüsse berücksichtigt werden.

Bei der Entwicklung des neuen Routingverfahrens wurde zum Teil auf Konzepte bereits bekannter Verfahren zurückgegriffen, die später zu einer weiteren Optimierung beitragen. Der eigentliche Grundgedanke, das Netz des ÖPNV graphentheoretisch zu betrachten, ist hingegen neu und wurde in der Form noch in keinem existierenden DTN-Routingverfahren verwendet. Gleiches gilt auch für die Art der Wegfindung und deren Bewertungen auf deren Grundlage später die Routingentscheidung getroffen wird.

In dem Routingverfahren werden Haltestellen als Knoten in einem Graphen aufgefasst, wobei jedem Knoten mehrere Haltestellen, zugewiesen werden. Dabei handelt es sich üblicherweise um eine Gruppe von Haltestellen, die in einem lokal begrenzten Raum die unterschiedlichen Fahrtrichtungen bedienen und somit häufig auch die gleichen Haltestellenbezeichnungen tragen. In diesem Graphen kann nun das Liniverzeichnis des ÖPNV abgebildet werden indem die Knoten entsprechend dem Liniennetz durch gerichtete Kanten verbunden werden. Somit werden gleichwohl auch unterschiedliche Fahrtrichtungen berücksichtigt. Für jede Linie existiert dabei eine eigene Kante. Somit sind Mehrfachkanten erforderlich, die später gut als Teilgraphen implementiert werden können. Dieser Graph wird nun jedem Fahrzeug im ÖPNV zugänglich gemacht, wobei diese auch als DTN-Knoten bezeichnet werden. Ergänzt werden diese Kontextinformationen durch aktuelle Fahrplandaten. Später können auch noch weitere dynamische Informationen mit eingebracht werden.

Die DTN-Knoten im ÖPNV können sich nun das zusätzliche Wissen für ein effizientes Routing zunutze machen. Anhand der Fahrplandaten kann ermittelt werden, an welchen Knoten im Graphen es zu Kontakten zwischen verschiedenen Linien kommen kann. Ein jeder Kontakt zwischen DTN-Knoten ermöglicht später die Weitergabe von Datenbündeln. Immer wenn Fahrzeuge mindestens zweier Linien zu einer ähnlichen Uhrzeit eine Haltestelle anfahren, wird dies als möglicher Kontakt zwischen diesen Fahrzeugen gewertet. Neben den Kontaktmöglichkeiten im Bereich der Knoten des Graphen sind ebenfalls auch Kontakte im Bereich der Kanten denkbar. Dies wären dann z.B. aufeinander zufahrende Fahrzeuge. Solche Möglichkeiten müssen gleichermaßen anhand der Fahrplandaten ausgewertet und berücksichtigt werden.

Die Kontextinformationen und die ermittelten Kontakte können wiederum dazu genutzt werden mögliche Routingwege zu bestimmen. Solche Wege geben an, über welche Knotenwechsel ein Datenbündel den Zielknoten erreichen kann. Der Weg ist somit eine Folge von ermittelten Kontakten zu bestimmten Uhrzeiten, die sich aus den Fahrplandaten ergeben. Auftretende Fragestellungen sind dabei, wie man solche Wege vom Quell- zum Zielknoten identifiziert und nach welchen Kriterien man sie auswählt. Verschiedene Nebenbedingungen, wie z.B. möglichst kurze Bündellaufzeiten, müssen weiterhin mit berücksichtigt werden.

Die Suche nach geeigneten Wegen wird erneut graphentheoretisch betrachtet. Zu Beginn besteht der Graph nur aus dem Quell- und dem Zielknoten. Nun wird für jeden nachfolgenden Zeitschritt anhand der Fahrplandaten ermittelt, zu welchen Kontakten es zwischen den in dem Graphen befindlichen Knoten und jedem beliebigen anderen Knoten kommen kann. Neue Kontakte werden durch Hinzufügen des Knotens und einer zugehörigen gerichteten Kante festgehalten und in der anschließenden Suche mit berücksichtigt. Zusätzlich werden Kantengewichte vergeben, die sich aus der Differenz der aktuell betrachteten Kontaktzeit und dem Zeitpunkt des Hinzufügens des Ausgangsknotens ergeben. Der Vorgang kann beendet werden, sobald der Zielknoten je nach Bedarf ein oder mehrere eingehende Kanten aufweist. Zusätzlich müssen auch hier wiederum Nebenbedingungen berücksichtigt werden, die dann mehrfache Kontakte zu unterschiedlichen Zeiten ermöglichen.

Zur Bestimmung geeigneter Wege müssen in dem zuvor erzeugten Graphen lediglich noch möglichst kurze Wege unter Berücksichtigung der Kantengewichte gesucht werden. Das Ergebnis sind Wege über die ein Datenbündel in kürzester Zeit zu seinem Ziel transportiert werden kann. Dies wäre jedoch noch keine zufriedenstellende Lösung, da sich verschiedene Wege unterschiedlich gut für einen Transport eignen können. Eine hohe Anzahl an DTN-Knotenwechseln erhöht z.B. zunehmend die Wahrscheinlichkeit, dass einer der Kontakte nicht zustande kommt, sei es durch Fahrplanabweichungen der ÖPNV-Fahrzeuge oder andere Umstände. Um solche Faktoren mit einzubeziehen, werden gleichzeitig mehrere Wege ausgewählt und anschließend bewertet. Grundlage hierfür sind die Anzahl notwendiger Knotenwechsel, die benötigte Zeitdauer für den vollständigen Transport sowie einer Bewertung des zu erfolgenden Knotenwechsels. In die Bewertung des Knotenwechsels spielen verschiedene Faktoren hinein, so z.B. ob sich Fahrzeuge an einer Haltestelle lediglich kreuzen oder ob und in welcher Größenordnung sie sich einen gleichen Streckabschnitt teilen. Als Ergebnis ergibt sich für jeden ermittelten Weg ein Score. Schließlich kann der Weg mit dem höchsten Score ausgewählt und das Routing hiernach durchgeführt werden. Um eine Neuberechnung auf jedem DTN-Knoten zu vermeiden wird die Wegwahl im Datenpaket festgehalten.

Obwohl bereits eine möglichst geeignete Routingentscheidung getroffen wurde, existieren auch weiterhin noch Unsicherheiten. Sobald eine Bündelweitergabe nicht wie geplant erfolgen konnte, wird ein neuer Routingweg bestimmt. Um die Zuverlässigkeit einer erfolgreichen Auslieferung weiter zu verbessern, können mehrere Bündelkopien eingesetzt werden. Die Wegwahl für diese Bündelkopien erfolgt nach der Reihenfolge der zuvor ermittelten Scorewerte.

Für eine weitere Optimierung und um auch besser mit möglichen Verspätungen umgehen zu können, ist der Einsatz zusätzlicher Relays denkbar. Dabei handelt es sich um stationäre DTN-Knoten die gezielt zu einer Auslieferung an mobile DTN-Knoten ausgenutzt werden können. Eine mögliche Strategie hierfür ist das gezielte zurückhalten von Bündelkopien. Ebenfalls können auch Gateways, also stationäre Knoten an die Datenbündel ausgeliefert werden können, entspricht den Relays für die Auslieferung an mobile DTN-Knoten ausgenutzt werden.

Das Routingverfahren wird durch eine Vielzahl weiterer Optimierungen ergänzt. Dazu gehört z.B. das Entfernen nicht mehr benötigter Bündelkopien nach einer erfolgreichen Auslieferung, die Festlegung einer Reihenfolge der zu übertragenden und zu verwerfenden Bündel sowie eine Broadcasting-Funktionalität.

Im Rahmen der Evaluation konnte gezeigt werden, dass das zuvor entwickelte Routingverfahren sehr schnell und zuverlässig arbeitet und zudem deutlich weniger Ressourcen aufgewendet werden müssen als es bei anderen bereits bekannten Verfahren der Fall ist. Insbesondere der Speicherbedarf auf den DTN-Knoten wird durch eine geringe Bündelanzahl klein gehalten wodurch auch der Kommunikationsaufwand niedrig bleibt. Dies führt schließlich dazu, dass das Routing auch noch bei einer hohen Auslastung gut funktionieren kann, während es bei anderen Routingverfahren bereits zu hohen Bündelverlusten kommt. Trotz des deutlich geringeren Aufwandes bleiben die durchschnittlichen Bündellaufzeiten dennoch im unteren Bereich und können größtenteils auch mit Floodingverfahren konkurrieren. Das neu entwickelte Routingverfahren zeigte sich somit in den durchgeführten Simulationen sehr erfolgreich und vielversprechend.

Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass das Routing auch mit äußeren Einflüssen wie Verspätungen und Fahrzeugausfällen sehr gut zurechtkommt. Hierbei sind lediglich minimale Verschlechterungen in Form von geringfügig längeren Bündellaufzeiten und einem etwas höheren Speicherbedarf auszumachen. Die Diplomarbeit schließt die Evaluation ab, indem noch weitere Optimierungsmöglichkeiten dargelegt werden, mit denen das Routing noch effizienter gestaltet werden könnte. Bereits in dem aktuellen Stand konnte das Routingverfahren allen Anforderungen entsprechen und seine Leistungsfähigkeit unter Beweis stellen. Somit konnte durch die Ausnutzung von Kontextinformationen ein deutlich effizienteres Verfahren entwickelt werden.