

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG

Fakultät für Chemie und Geowissenschaften

Geographisches Institut

Abteilung Geoinformatik

Erstellung eines Routing-Profiles für Feuerwehrfahrzeuge auf Basis von OpenStreetMap-Daten

Amandus Stefan Butzer

Bachelorarbeit

Geprüft von:

1. Prof. Dr. Alexander Zipf
2. Prof. Dr. João Porto de Albuquerque

20. Oktober 2017

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit war es ein prototypisches Routing-Profil für Löschfahrzeuge in einer Forschungskooperation mit der Freiwilligen Feuerwehr Lützelburg zu entwickeln.

Gegenwärtige Routing-Services sind für ein Routing im Notfall nicht effizient, da sie nicht berücksichtigen, dass Einsatzfahrzeuge im Notfall alle Vorschriften der StVO vernachlässigen dürfen. Auf Basis des Openrouteservice wurde mit OpenStreetMap als Datengrundlage ein Routing-Profil für Einsatzfahrzeuge entwickelt, welches für Einsatzfahrzeuge adäquate Geschwindigkeiten verwendet sowie Radwege, Fußgängerzonen und weitere Wegtypen befahren darf. Weiterhin dürfen Einbahnstraßen in Gegenrichtung durchfahren werden. Die Verzögerung durch - und Abbremsvorgänge wurde anhand von Zeit-Strafen für Anfahrt, Abbiegevorgänge und Ankunft berücksichtigt. Es wurden Testfahrten durchgeführt um das Profil zu kalibrieren und mittels analytischer Vergleiche zwischen den Fahrtzeiten zu validieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass

- a) eine Funktion zur Berücksichtigung der Steigung in einer zukünftigen Version des Routing-Profiles eingebaut werden muss und
- b) die Fahrtzeitunterschiede zwischen den Testfahrten und dem Profil für die meisten Wegpunkte der Teststrecken im 10-Sekunden-Bereich liegen.

Die vorliegende Arbeit bildet eine Grundlage für effiziente Routenfindung und Fahrzeitberechnung für Notfallfahrzeuge und bietet darüber hinaus Hilfestellung bei der Entwicklung von Bedarfsplänen.

Abstract

This study aims to develop a prototype routing profile for fire engines.

The research is carried out with the voluntary fire department of Lützelburg. The existing routing services are not efficient for emergency routings since for example, they do not consider that emergency vehicles are allowed to ignore the StVO¹. This study presents the development of an emergency routing profile, as an extention of OpenRouteService, a routing engine based on OpenStreetMap database. The new emergency routing profile considers reasonable speed of emergency vehicles, and further allows the possibility of navigating through cycleways, pedestrian zones and other possible routes that should not be used by vehicles in normal situations. Other special characteristics such as the possibility of driving in the opposite direction of a one-way road makes the routing profile efficient and applicable for emergency routing. As another example, the time delay as causes of acceleration and break processes are taken into account with calculating time penalties for starting, turnings and arrival. Simulations were done in order to evaluate and calibrate the routing profile through analytical comparison.

The results show that

- a) the functionality to consider road incline is necessary and should be included in future versions of the routing profile and
- b) the differences in travel time between the test runs and the profile are less than 10 seconds for most of the waypoints on the test route.

The present study provides the basis for an efficient routing and travel time calculation of emergency vehicles as well as assistance in the development of demand plans.

¹german road traffic regulation

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Graphentheorie	3
2.1.1 Gerichtete Graphen	4
2.1.2 Gewichtete Graphen	5
2.1.3 Erstellung eines Graphen aus OpenStreetMap-Daten	6
2.2 Routing	7
2.2.1 Shortest Path Problem	8
2.2.2 Dijkstra-Algorithmus	9
2.2.3 Speedup Techniken	11
2.3 Isochronen Berechnung	12
2.3.1 Gitterbasierter Ansatz	12
2.3.2 Dreiecksvermaschung	14
2.3.3 Formenbasierter Ansatz	14
3 Methodik	15
3.1 Informationserhebung	15
3.2 Generierung des Routing-Profil	18
3.3 Anpassungen Frontend	23

4 Ergebnisse	25
4.1 Validierung des Graphen	25
4.1.1 Fußgängerzonen	25
4.1.2 Notfalleinfahrten	26
4.1.3 Einbahnstraßen	27
4.2 Validierung der Distanzen und der Fahrzeit	28
5 Diskussion	34
5.1 Teststrecke 1	34
5.2 Teststrecke 2	35
5.3 Teststrecke 3	36
5.4 Benötigte Änderungen	38
6 Fazit & Future Work	40
7 Literatur	44
8 Anhang	45

Abbildungsverzeichnis

1	Ein simpler Graph G	3
2	Zwei isomorphe Graphen G und H	5
3	Ein gerichteter Graph G	5
4	Ein gewichteter Graph G	6
5	Simplifizierung eines OpenStreetMap (OSM) Datensatzes	8
6	Ein gewichteter und gerichteter Graph G	10
7	Kompletter Durchlauf eines Dijkstra Algorithmus	10
8	Speedup Techniken für den Dijkstra Algorithmus	12
9	Marching Squares Algorithmus	13
10	Routing in die Fußgängerzone der Heidelberger Altstadt	25
11	Routing durch Feuerwehreinfahrten	26
12	Routing auf die A5 über eine Notauffahrt	26
13	Routing durch Einbahnstraßen	27
14	Routing auf der Gegenfahrbahn	28
15	Ergebnis Isochronen	29
16	Testfahrt 1	30
17	Testfahrt 2	32
18	Testfahrt 3	33
19	Fahrt 1 – Steigung und Höhenprofil	34
20	Fahrt 1 – Unregistrierte Abbiegungen	35
21	Fahrt 2 – Unterführung	36
22	Fahrt 3 – Tempo-30-Zone	36
23	Fahrt 3 – Vergleich eines Abbiegevorgangs	37
24	Fahrt 3 – Höhenprofil	38
25	Hydranten Informationen in Heidelberg	41

Tabellenverzeichnis

1	W_s und K_s für jede Iteration aus Abb. 7	11
2	Standardgeschwindigkeiten für unterschiedliche <code>highway</code> Values	16
3	Standardgeschwindigkeiten für unterschiedlichen <code>tracktype</code> Values	17
4	Standardgeschwindigkeiten für spezielle Wegtypen	18
5	Fahrt 1 – 1. Auswertung	30
6	Fahrt 1 – Fahrzeit	31
7	Fahrt 2 – Fahrzeit	32
8	Fahrt 3 – Fahrzeit	32
9	Fahrt 1,2,3 – 2. Auswertung	33
10	Fahrt 3 – neue Fahrzeit	37

Sourcecodeverzeichnis

1	Speicherobjekt für die Fahrzeugeigenschaften	19
2	Entnahme der Dimensionsbeschränkungen	20
3	Vergleich der übergebenen Dimensionen mit den Restriktionen des Graphen	20
4	Definition von Maximalgeschwindigkeiten für unterschiedliche Wegtypen .	21
5	Limit für 30er-Zonen und Spielstraßen	21
6	Nutzung von speziellen Wegtypen	22
7	Nutzung von Notfalleinfahrten	22

1 Einleitung

1.1 Motivation

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit ist der Verfasser in der Geoinformatik Abteilung des Geographischen Instituts der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg als wissenschaftliche Hilfskraft im Projekt Openrouteservice (ORS) tätig. Dieser bietet neben einer Fülle von Webdiensten, einen Isochronen-Service an, welcher zur Berechnung unterschiedliche Routing-Profile nutzen muss.

Mit Isochronen werden Orte bestimmt, die von einem Standort aus in einer bestimmten Zeit erreicht werden können. Für Unternehmen ist solch eine Analyse zum Beispiel bei der Standortwahl zur Berechnung von Umsatzpotentialen interessant. Arbeitnehmer können über Isochronen geeignete Wohnorte für eine zukünftige Arbeitsstelle ermitteln. Bus und Bahn richten an Isochronen ihre Verkehrsnetze aus oder legen Tarifzonen damit fest. Für Polizei, Rettungsdienst sowie Feuerwehr geht es vor allem um das Einhalten amtlich vorgegebener zeitlicher Hilfsfristen. Diese stellen eine bedeutende Eigenschaft für die Planung und Qualität der Einsätze von Feuerwehr und Rettungsdienst dar.

Der Brandschutz ist im Gegensatz zum Rettungsdienst eine kommunale Aufgabe und unterliegt nur in manchen Bundesländern bestimmten Standards (Stein 2015). Daher bedienen sich diese Organisationen unterschiedlicher Hilfsmittel um Bedarfspläne für ihren Standort zu erstellen. Der Isochronen-Service wird in diesem Zusammenhang bereits von unterschiedlichen Feuerwehreinheiten genutzt, allerdings bietet der Dienst in seiner bisherigen Form noch nicht alle erforderlichen Anforderungen für Einsatzfahrzeuge. Um diese Nachteile zu überwinden, wurde eine Forschungskooperation mit der Freiwilligen Feuerwehr Lützelburg (FFL) initiiert.

§35 Abs. 1 StVO:

”Von den Vorschriften dieser Verordnung sind die Bundeswehr, die Bundespolizei, die Feuerwehr, der Katastrophenschutz, die Polizei und der Zoldienst befreit, soweit das zur Erfüllung hoheitlicher Aufgaben dringend geboten ist.”

Dieser kurze Absatz der Straßenverkehrs-Ordnung ermöglicht Einsatzfahrzeugen sich unter Benutzung von Martinshorn und Blaulicht über jede Vorschrift im Straßenverkehr hinwegzusetzen. In einem Notfall hat das schnellste Erreichen des Zielorts eine höhere Priorität als Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Fahrverbote. Bisher gibt es trotz einer großen Anzahl an Routing-Services auf dem Markt, keinen, der diese Zusammenhänge berücksichtigt.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist in Kooperation mit der FFL zu ermitteln, bis zu welchem Grad diese Notstandsvollmachten im Ernstfall in Anspruch genommen werden können. Auf Basis dieser Informationen soll dann ein prototypisches Routing-Profil für Einsatzfahrzeuge entwickelt werden. Die Implementierung wird aufgrund des Umfangs einer Bachelorarbeit auf einen Fahrzeugtyp der Feuerwehr begrenzt. Dabei handelt es sich um Löschfahrzeuge der Klassen LF8, LF8/6 und MLF² zwischen 3,5 und 7,5 Tonnen (je nach Beladung). Diese Typen wurden von der FFL als erste Priorität empfohlen. Allerdings wird bei der Erstellung dieses Routing-Profil daran geachtet, dass Erweiterungen für diverse Einsatzfahrzeuge einfach möglich sind.

Als Basis wird das Profil auf dem Backend³ des bereits bestehenden Routing Service des ORS aufgebaut. Zusätzlich sollen Java-Funktionen implementiert werden, die speziell auf das Profil für Einsatzfahrzeuge zugeschnitten sind. Zur Darstellung wird das ORS Frontend⁴ mit Hilfe der Javascript Programmiersprache angepasst. Dadurch können die Ergebnisse in verständlicher und anschaulicher Weise präsentiert werden.

²LF=Löschgruppenfahrzeug; MLF=Mittleres Löschfahrzeug

³Programm und Datenbanken die sich zur Berechnung von Routen auf einem über das Internet ansprechbaren Server befinden

⁴Graphische Benutzeroberfläche der ORS-Website mit der Anfragen an das Backend gestellt und die Antworten dargestellt werden können

2 Theoretische Grundlagen

Als Grundlage für die Berechnung kürzester Wege in einem Straßennetzwerk wird die Graphentheorie als Teilgebiet der Mathematik herangezogen.

2.1 Graphentheorie

Ein Graph ist eine abstrakte Struktur, die Objekte und deren Verbindungen untereinander modellieren kann. Die in der Graphentheorie verwendeten Termini belaufen sich dabei auf Ecken (engl: *nodes* oder *vertices*) für Objekte und Kanten (engl: *edges*) für Verbindungen.
(Kurt Mehlhorn 2008, S. 49)

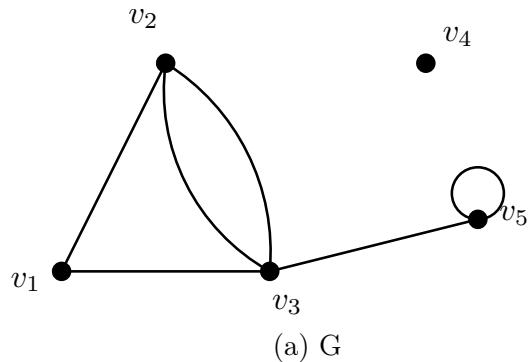
Mathematisch ausgedrückt ist ein Graph G die Funktion aus einer endlichen Eckenmenge V und einer endlichen Kantenmenge E (Aigner 2015, S. 4)

$$G = (V, E)$$

Für den Graphen in Abbildung 1 sehen V und E folgendermaßen aus:

$$V = \{(v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)\}$$

$$E = \{(v_1v_2, v_1v_3, v_2v_3, v_2v_5, v_3v_5)\}$$



	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
v_1	0	1	1	0	0
v_2	1	0	2	0	0
v_3	1	2	0	0	1
v_4	0	0	0	0	0
v_5	0	0	1	0	1

(b) Adjazenzmatrix von G

Abbildung 1: Ein simpler Graph G

Ein Vorteil von Graphen ist eine einfache Struktur. Dabei werden die Ecken als Punkte und die Kanten als Linien oder Pfeile dargestellt (Abbildung 1a) (Kurt Mehlhorn 2008, S. 49). Zwischen zwei Ecken können einfache, mehrfache oder keine Kanten bestehen. Darüber

hinaus können sie mit sich selbst verbunden sein und eine sogenannte Schlinge bilden (v_5). Sind zwei Ecken durch eine Kante verbunden werden sie als *adjazent*(benachbart) bezeichnet. Ist eine Ecke der Start- oder Endpunkt einer Kante, werden beide Objekte als *inzident* zueinander bezeichnet. Ist eine Ecke zu keiner Kante inzident heißt sie *isoliert*. Ein Graph der keine isolierten Ecken besitzt heißt *zusammenhängend*. (Aigner 2015, S. 4 f.)

Computer können Graphen verarbeiten, da sich alle Ecken und Kanten in Form von Matrizen speichern lassen. Die Abbildung 1b zeigt die Adjazenzmatrix des Graphen aus 1a. Darin sind die Nachbarschaften für die jeweilige Eckenkombination gespeichert. Die Reihen sind die Start- und die Spalten die Enden. Für eine existierende Kante wird eine 1 und für keine Verbindung eine 0 eingetragen. Die 2 in Spalte v_2 und Reihe v_3 zeigt die Mehrfachkante zwischen den beiden Ecken an. Für ungerichtete Graphen ist eine Kante von v_1 nach v_2 äquivalent mit einer Kante von v_2 nach v_1 . Daher ist die Adjazenzmatrix für ungerichtete Graphen spiegelsymmetrisch entlang der Hauptdiagonale ($v_1v_1 \rightarrow v_5v_5$). Der Speicherbedarf für eine Matrix wird folglich halbiert, da die eine Hälfte mit der Anderen rekonstruiert werden kann (Abb. 2c). Besitzt der Graph keine Schlingen, besteht die Hauptdiagonale lediglich aus Nullen und kann ebenfalls eingespart werden (Sven Oliver Krumke 2012, S. 19).

Im Folgenden werden nur zusammenhängende Graphen ohne Schlingen betrachtet, da diese für viele Problemstellungen irrelevant sind (Aigner 2015, S. 4 f.).

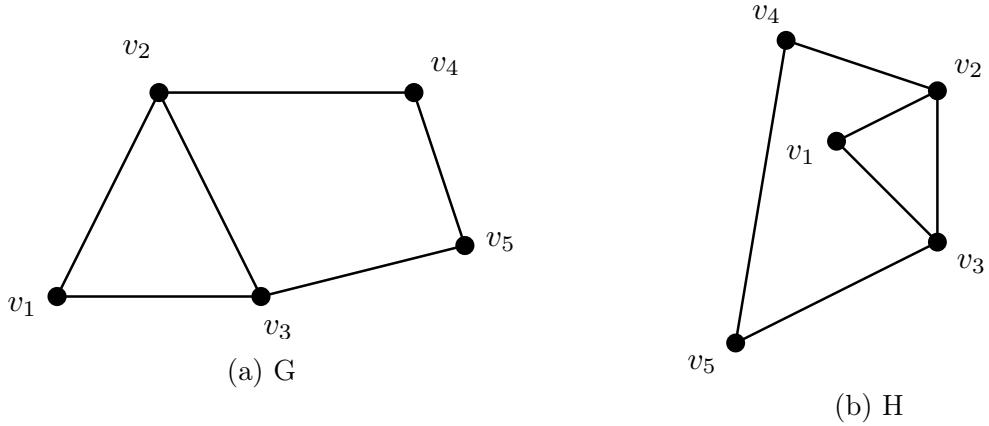
Wenn zwei Graphen bei gleichbleibenden Nachbarschaften der Ecken aufeinander abgebildet werden können, spricht man von isomorphen Graphen (Aigner 2015, S. 106). Daraus ergibt sich für isomorphe Graphen auch immer eine gleiche Adjazenzmatrix (Abb. 2).

2.1.1 Gerichtete Graphen

Im Gegensatz zu einem ungerichteten Graphen können bei einem gerichteten Graphen Kanten lediglich in einer Richtung durchlaufen werden. Die Kanten werden daher durch Pfeile anstatt Linien dargestellt.

$$G = (V, R)$$

Demnach muss in Abbildung 3a um von v_5 nach v_4 zu gelangen der Weg über die Ecken



$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccccc} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 \end{array} \\
 \begin{array}{c} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \end{array} \left(\begin{array}{ccccc} \ddots & & 1 & 1 & 0 \\ & \ddots & & 1 & 1 \\ & & \ddots & 0 & 1 \\ & & & \ddots & 1 \\ & & & & \ddots \end{array} \right)
 \end{array}$$

(c) Adjazenzmatrix von G und H

Abbildung 2: Zwei isomorphe Graphen G und H

v_3 und v_2 führen.

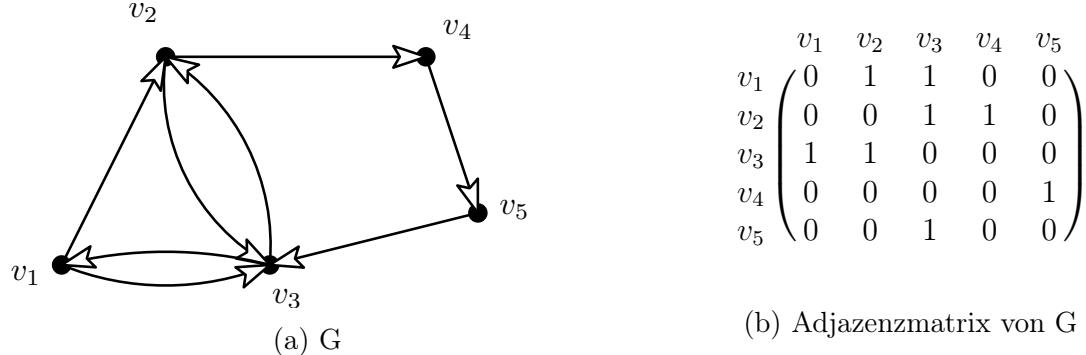


Abbildung 3: Ein gerichteter Graph G

2.1.2 Gewichtete Graphen

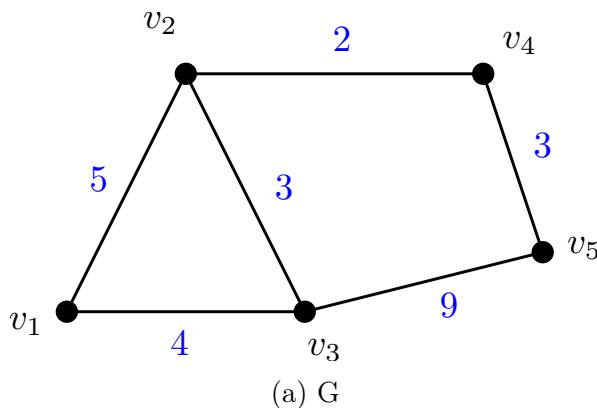
In dieser Arbeit bezeichnet der Begriff *gewichteter Graph* einen Kanten-gewichteten Graphen, bei dem jeder Kante ein Wert c zugewiesen wird.

$$G = (V, E)$$

mit

$$c : E \rightarrow \mathbb{R}$$

Neben dem Kanten-gewichteten gibt es auch Ecken-gewichtete Graphen, bei welchen entsprechend die Ecken gewichtet werden. Diese werden aber nur für wenige Problemstellungen benötigt und sind hier nicht von Belang. Gewichtete Graphen können gerichtet und ungerichtet sein. Ein klassisches Beispiel hierfür ist der Linien-Netzplan einer Straßenbahn, bei dem die Ecken einzelne Haltestellen darstellen und die Kantengewichte die benötigten Minuten beinhalten.



	v ₁	v ₂	v ₃	v ₄	v ₅
v ₁	0	5	4	0	0
v ₂	5	0	3	2	0
v ₃	4	3	0	0	9
v ₄	0	2	0	0	3
v ₅	0	0	9	3	0

(b) Adjazenzmatrix von G

(a) G

Abbildung 4: Ein gewichteter Graph G

Mit gewichteten Graphen können diverse Problemstellungen gelöst werden, zum Beispiel die Bestimmung maximaler (Durch-)Flüsse in Rohrsystemen oder das Berechnen kürzester Wege. Andererseits kann ein gewichteter Graph auch für Routing-Zwecke eingesetzt werden, indem räumliche Positionen sowie Eigenschaften von Straßen in der Datenstruktur eines Graphen gespeichert werden.

2.1.3 Erstellung eines Graphen aus OpenStreetMap-Daten

Die OSM⁵ Datenstruktur kann als Graph abgebildet werden. Hier werden Punktobjekte als *Nodes* (Knoten) und Linienobjekte wie Straßen als *Ways* (Wege) bezeichnet. Ein Way ist dabei die Verbindung zwischen zwei oder mehreren Nodes. Zusätzlich gibt es

⁵OpenStreetMap ist ein 2004 gegründetes internationales Projekt mit dem Ziel, eine freie Weltkarte zu erschaffen ([http://www.openstreetmap.org](#)). Die Daten werden von vielen Freiwilligen auf der ganzen Welt generiert und in einer Datenbank unter der Open Database Lizenz zur Verfügung gestellt.

Relations (Relationen) die eine Menge aus Nodes und Ways einen funktionalen Zusammenhang zuschreiben. Für Straßennetze kann dies durchaus hilfreich sein um beispielsweise unterschiedliche Segmente eines Autobahnsegmentes zusammenzufassen oder um Abbiegevorschriften an Kreuzungen zu beschreiben (Contributers 2015).

Um aus den OSM Daten einen routingfähigen Graphen zu erhalten, müssen zuerst alle benutzbaren Nodes und Ways extrahiert werden um sie dann anhand ihrer OSM-Tags zu identifizieren. Dazu gehören alle Arten von Straßen und Wegen sowie als befahrbar gekennzeichnete Ways (beispielsweise asphaltiert, allerdings ohne angegebenen Straßentyp). Für das Routing sind vor allem Verbindungspunkte wie Kreuzungen, Ab- und Auffahrten sowie Sackgassen wichtig. Daher werden diese sogenannten *Tower Nodes* aus den importierten Daten ermittelt. Anschließend werden die Straßen anhand der Verbindungspunkte segmentiert. Danach werden die Verbindungen zwischen den Tower Nodes berechnet und anhand der Distanz gewichtet. Das Grundgerüst des eigentlichen Routing-Graphen ist damit erstellt. Einbahnstraßen und Abbiegebeschränkungen werden berücksichtigt und geben die Richtung der Kanten an (Rehrl u. a. 2012). Die Punkte zwischen zwei Tower Nodes werden *Pillar Nodes* genannt. Sie werden als *WayGeometry* auf der jeweiligen Kante gespeichert, da sie nicht für den Routing Vorgang benötigt werden (Abbildung 5). Das Routing ist dadurch um ungefähr das 8-fache schneller (Karich 2016). Relevante Attribute wie Geschwindigkeit oder Straßentyp werden vereinheitlicht und als *Flags* (Markierungen) auf der Kante gespeichert. Diese sind für die individuelle Gewichtung bei der Routenfindung interessant. (Mehr zu Gewichtung später in Kapitel 3.2). Zuletzt wird der Graph abgespeichert und ist für Routing Abfragen bereit (Rehrl u. a. 2012).

2.2 Routing

Routing bezeichnet den Vorgang in einem Netzwerk Wege zu finden, auf denen Datenpakete entlang gesendet werden können. Diese Definition bezieht sich vor allem auf elektronische Datennetzwerke wie das Telefonnetz oder das Internet. Im Fachbereich der Geoinformationssysteme werden hauptsächlich Straßennetze für Routing-Analysen verwendet (Wolfgang Kresse 2012, S. 165). Ein Weg P (*engl: path*) von einer Startecke s zu einer Zielecke z ist eine Folge von benachbarten Ecken mit s als erste Ecke und z als letzte Ecke der Folge. Die Weglänge entspricht in einem gewichteten Graphen der Summe aller

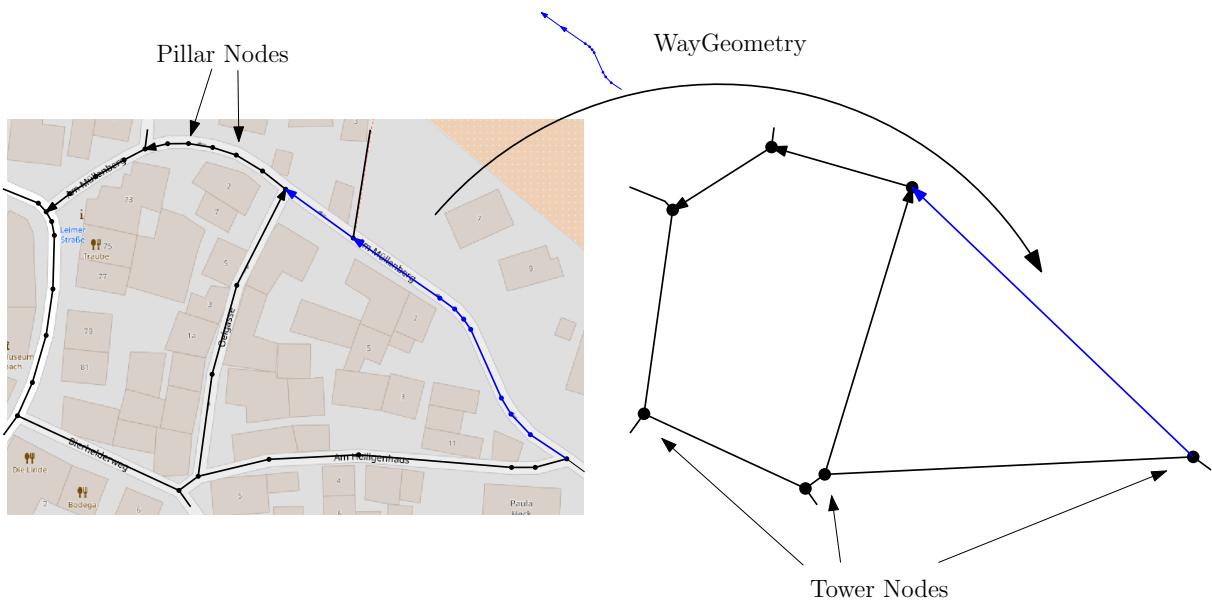


Abbildung 5: Simplifizierung eines OSM Datensatzes

Kantengewichte.

Eine der wichtigsten Netzwerk-Analyse-Operationen ist die Berechnung des kürzesten Weges zwischen zwei Ecken. Jedes Navigationssystem muss diese Aufgabe erfüllen können. Ein kürzester Weg hat demnach die Eigenschaft, dass die Summe aller Kantengewichte, in anderen Worten die Kosten des Weges, minimal gegenüber allen anderen Wegen im Graphen ist.

2.2.1 Shortest Path Problem

Die nächstliegendste zu beleuchtende Problemstellung ist das *Shortest Path Problem* welches aber nicht mit dem *Traveling Salesman Problem (TSP)* verwechselt werden sollte. Beim TSP ist die kürzeste Tour auf einem Graphen $G = (V, E) = K_n$ ⁶ mit der Gewichtsfunktion $c : E \rightarrow \mathbb{R}_+$ gesucht, die jede Ecke des Graphen besucht (Sven Oliver Krumke 2012, S. 135). Das Shortest Path Problem lässt sich in drei Typen untergliedern denen jeweils ein gerichteter Graph $G = (V, E)$ mit der Gewichtsfunktion $c : E \rightarrow \mathbb{R}$ zugrunde liegt. Beim *Single Pair Problem (SPP)* wird der kürzeste Weg von einer Ecke a zu einer anderen Ecke b mit $a, b \in V$ gesucht. Das *Single Source Problem (SSP)* möchte den kürzesten Weg einer Ecke a zu jeder anderen Ecke ermitteln (Formel ?). Das *All Pairs Shortest Path Problem (APSP)* sucht den kürzesten Weg von jeder Ecke zu jeder anderen

⁶ K_n bezeichnet einen vollständigen Graphen bei dem jede Ecke aus V mit jeder anderen Ecke verbunden ist

Ecke in V (Sven Oliver Krumke 2012, S. 169 f.).

Für eine Route von Startecke s zur Zielecke z ist das SPP demnach die richtige Wahl. Allerdings wird dazu das SSP herangezogen, welches mit dem Algorithmus von Dijkstra gelöst werden kann.

2.2.2 Dijkstra-Algorithmus

Der in 1959 von Edsger W. Dijkstra entwickelte Algorithmus (Dijkstra 1959) benötigt einen gewichteten Graphen ohne negative Kantengewichte⁷ sowie eine Startecke $s \in V$. Es gibt eine Warteliste W_s mit unmarkierten *gesichteten* Ecken. Dort sind für alle v die Kosten für den bisher kürzesten Weg von s und die jeweilige vorangehende Ecke auf diesem Weg gespeichert. Die Kosten können sich noch ändern wenn ein noch kürzerer Weg gefunden wird. Diese Liste enthält zu Beginn nur den Startpunkt s mit den trivialen Kosten 0. Es gibt eine weitere Liste der endgültig kürzesten Wege K_s in der alle markierten Ecken gespeichert werden.

Dijkstra's Algorithmus markiert die Ecke mit den geringsten Kosten aus W_s und verschiebt diese nach K_s . Nun werden alle benachbarten Ecken gesichtet und die Kosten berechnet. Die Kosten und der Vorgänger werden in W_s gespeichert. Die Ecke mit den geringsten Kosten wird als nächstes markiert, da der Weg dorthin auf jeden Fall ein kürzester ist. Dieser Vorgang wird wiederholt bis alle Ecken aus W_s markiert wurden und W_s somit leer ist.

Die Funktionsweise des Dijkstra Algorithmus wird am Graphen aus Abbildung 6 mit der Startecke $s = v_1$ veranschaulicht.

Die erste Ecke der Warteschlange ist $s = v_1$. Da s der einzige Eintrag ist, sind die Kosten automatisch am geringsten. s wird von W_s nach K_s verschoben, markiert und die erreichbaren Ecken gesichtet. Das sind v_2 mit den Kosten 5 und v_3 mit den Kosten 4. Beide werden mit v_1 als Vorgänger in W_s eingetragen. Im zweiten Durchgang wird v_3 (geringste Kosten in W_s) markiert und nach K_s verschoben. Über v_3 erreichbare Ecken sind v_5 mit $4 + 8 = 12$ Kosten und v_2 mit $4 + 2 = 6$ Kosten. Da bereits ein kürzerer Weg

⁷Das Problem bei Graphen mit negativer Gewichtung entsteht, wenn diese auf einer Schlinge oder der Kante eines Rings liegen. Sobald der Algorithmus den Zyklus erreicht, werden die Kosten für die Ecken des Zyklus immer geringer. Die Kosten für den kürzesten Weg nähern sich $-\infty$ während der Algorithmus in einer endlos Schleife läuft. Deswegen ist der Dijkstra nur für positive Kantengewichte anwendbar (Kurt Mehlhorn 2008, S. 194 f.)

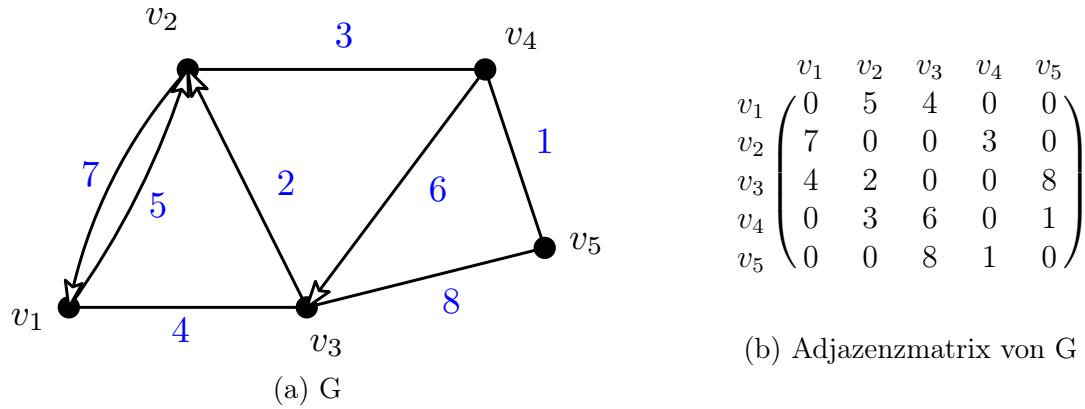


Abbildung 6: Ein gewichteter und gerichteter Graph G

nach v_2 besteht wird der aktuelle Pfad über v_3 verworfen. Als nächstes wird v_2 nach K_s verschoben. Die einzige neue von dort gesichtete Ecke ist v_4 mit 8 Kosten. Bei der vierten Wiederholung wird v_4 ($8 < 12$) markiert. Es werden v_3 und v_5 gesichtet. Für v_3 besteht bereits ein kürzerer Weg. Für v_5 ist der neue Weg über v_4 mit den Kosten von 9 allerdings kürzer als der Weg über v_3 . v_5 wird aktualisiert und der längere Pfad verworfen. Im fünften Durchgang wird v_5 als letzte Ecke in W_s nach K_s verschoben. Von dort sind keine neuen Ecken sichtbar. Die Warteschlange ist leer und der Algorithmus damit beendet.

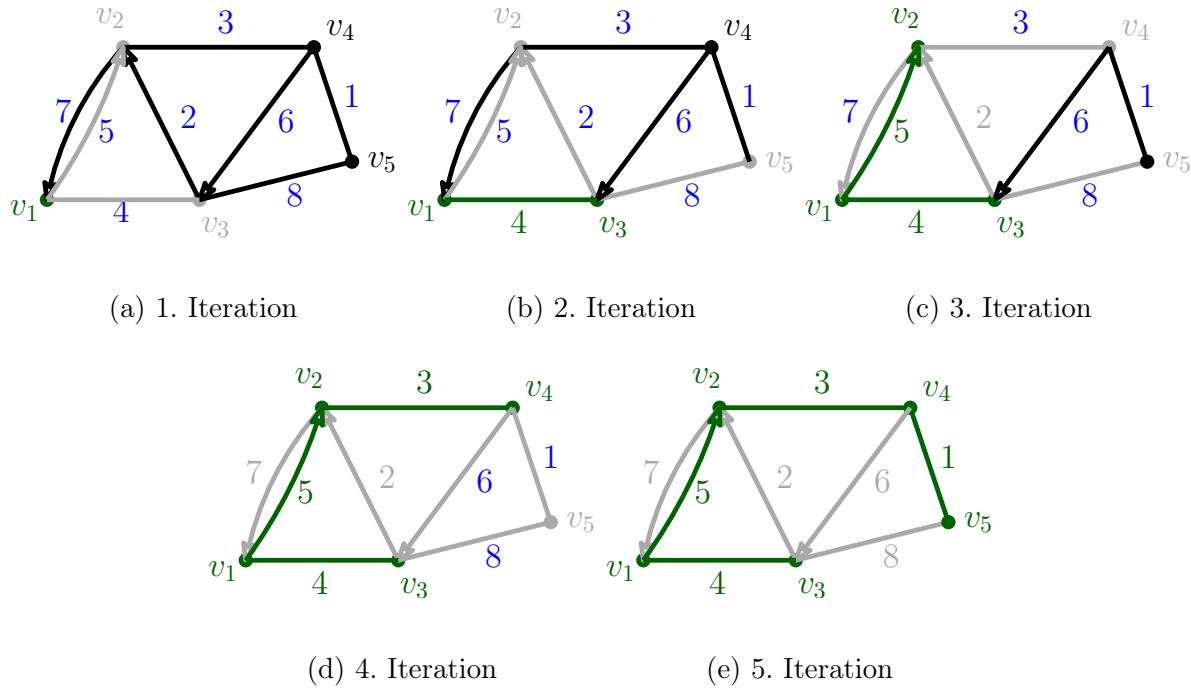


Abbildung 7: Kompletter Durchlauf eines Dijkstra Algorithmus

Damit wurde das SSP gelöst und einen kürzeste Wege zu jeder Ecke des Graphen vom Startpunkt. Daraus ergibt sich auch die Lösung aller SPP für s zu jeder anderen Ecke

	W_s	K_s
1.	$v_2 : 5(v_1) v_3 : 4(v_1)$	$v_1 : 0(v_1)$
2.	$v_2 : 5(v_1) v_5 : 12(v_3)$	$v_1 : 0(v_1) v_3 : 4(v_1)$
3.	$v_5 : 12(v_3) v_4 : 8(v_2)$	$v_1 : 0(v_1) v_3 : 4(v_1) v_2 : 5(v_1)$
4.	$v_5 : 9(v_4)$	$v_1 : 0(v_1) v_3 : 4(v_1) v_2 : 5(v_1) v_4 : 8(v_2)$
5.	-	$v_1 : 0(v_1) v_3 : 4(v_1) v_2 : 5(v_1) v_4 : 8(v_2) v_5 : 9(v_4)$

Tabelle 1: W_s und K_s für jede Iteration aus Abb. 7

aus V . Es ist jedoch nicht sinnvoll für die Lösung eines SPP jedes mal das SSP für den kompletten Graphen zu berechnen. Das liefert nicht nur viele irrelevante Ergebnisse sondern kostet auch mehr Berechnungsressourcen und Zeit. Daher gibt es unterschiedliche Möglichkeiten den Dijkstra Algorithmus zu beschleunigen.

2.2.3 Speedup Techniken

Early Stopping: Der Algorithmus wird bisher jedes mal für den ganzen Graphen ausgeführt, obwohl oft nur die Route für einen kleinen Bruchteil des Graphen benötigt wird. Die einfachste Methode ist den Dijkstra zu stoppen, nachdem z erreicht wurde (8a).

Bidirectional Dijkstra: Beim *Bidirectional Dijkstra* werden zeitgleich zwei Algorithmen nebeneinander ausgeführt. Einer auf s und einer auf z (auf einem umgekehrt gerichteten Graphen). Für beide Instanzen gibt es eine separate Warteschlange W_s und W_z . Zu Beginn wird für jeden Startpunkt die initiale der umliegenden Ecken durchgeführt. Anschließend wird die Ecke mit der geringsten Distanz in beiden Warteschlangen markiert und aus der jeweiligen Warteschlange entfernt. Wird eine Ecke aus beiden Warteschlangen entfernt, werden W_s und W_z auf weitere übereinstimmende Ecken geprüft. Für jede Übereinstimmung wird die Distanz in beiden Instanzen berechnet. Die Ecke ist Teil des kürzesten Weges wenn die Summe beider Distanzen minimal ist.

In der schematischen Abbildung 8b wird die Einsparung gegenüber dem Early Stopping deutlich. Der graue Bereich muss nicht berechnet werden. Die Bearbeitungszeit lässt sich also theoretisch um die Hälfte reduzieren⁸.

⁸In der Realität wird dieser Wert selten erreicht. Bei Graphen mit einer höheren Eckendichte in Nähe von z könnte die Bearbeitungszeit sogar größer werden. Allgemein wird aber ein signifikanter Vorteil erzielt.

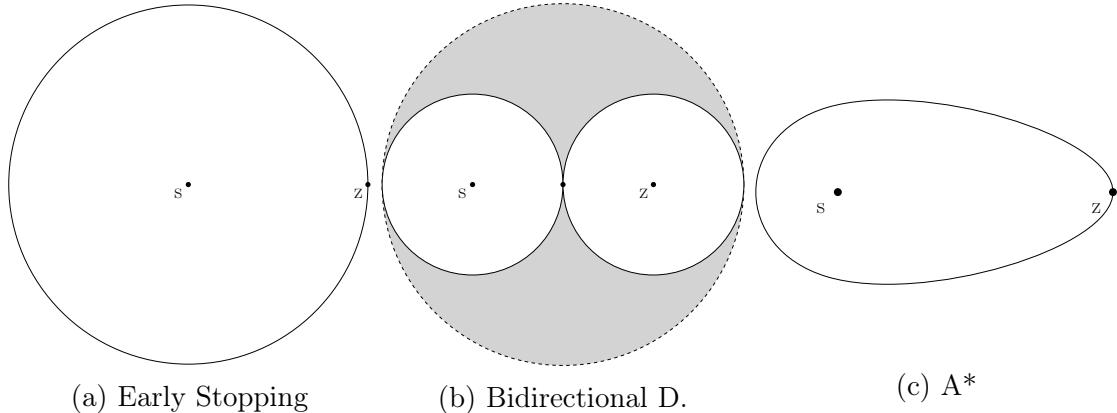


Abbildung 8: Speedup Techniken für den Dijkstra Algorithmus

A*: Der A^* Algorithmus ist eine Variante des Dijkstras die den Suchraum in Richtung der Zielecke lenkt. Es wird durch eine Funktion für jede Ecke die Distanz zum Ziel geschätzt. Diese wird mit den Kantengewichten verrechnet damit Ecken in Zielrichtung früher markiert werden. Die standardmäßig kreisförmige Ausbreitung des Dijkstras wird mit dem A^* zu einem Oval gestreckt. Da der Zielpunkt so früher erreicht wird, müssen weniger Iterationen durchgeführt werden.

Diese und weitere Möglichkeiten sind in Kurt Mehlhorn 2008, S. 209–213 ausführlich beschrieben.

2.3 Isochronen Berechnung

Isochronen sind Linien gleicher Zeit (griech.: *iso* = gleich + *chronos* = Zeit).

Wenn in einem gewichteten Graphen die Kanten die benötigte Zeit enthalten, um von einer Ecke zur nächsten zu gelangen, können damit Analysen zur Erreichbarkeit durchgeführt werden. Dazu wird ein SSP für eine zentrale Ecke z mit einem gegebenen Zeitlimit t gelöst. Isochronen können mit unterschiedlichen Methoden berechnet werden. Das resultierende Objekt ist immer ein Polygon, welches jeden in gegebenem Zeitlimit erreichbaren Punkt beinhaltet.

2.3.1 Gitterbasierter Ansatz

Beim *Marching Squares* Algorithmus wird um das Zentrum ein Gitter über dem Graphen gebildet (9a). Die Eckpunkte des Gitters erhalten dabei die Werte des nächsten Punktes

auf dem Graphen (9b). Anschließend werden auf den Kanten des Gitters diejenigen Punkte markiert, bei denen der Wert mit dem gesuchten Zeitlimit übereinstimmt. In Abbildung 9c wurde das für die Werte $t = 5$ und $t = 10$ durchgeführt. Die markierten Punkte werden verbunden und bilden schließlich die Isochrone.

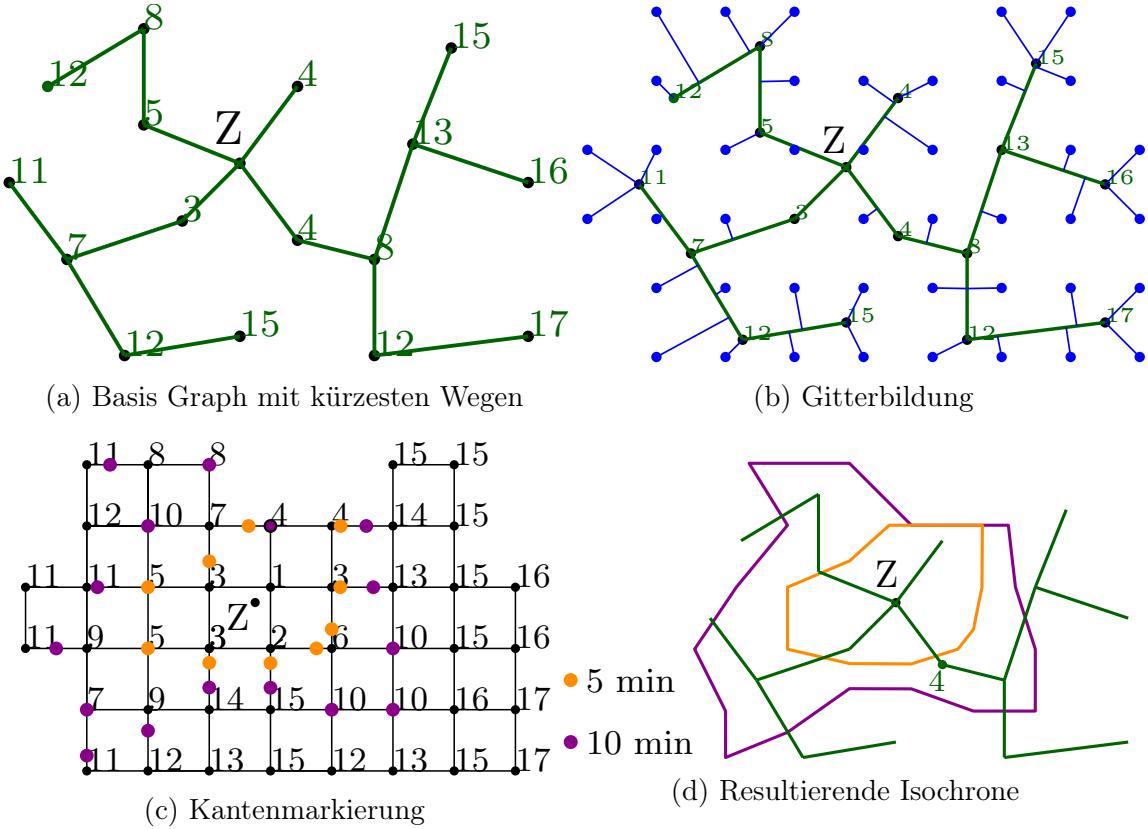


Abbildung 9: Marching Squares Algorithmus

Der Vorteil dieses Algorithmus ist, dass die Maschengröße des Gitters angepasst werden kann. Bei sehr kleinen Maschen liefert der Algorithmus ein sehr genaues Ergebnis. Allerdings werden dabei mehr Ressourcen zur Berechnung benötigt. Daher sollten lediglich kleine Gebiete sowie geringe Zeitbeschränkungen berechnet werden. Bei weiten Maschen ist der Algorithmus dagegen sehr schnell und kann größere Distanzen und längere Zeitspannen berechnen. Das Ergebnis ist dementsprechend aber auch ungenauer. In Abbildung 9d wurde die Größe der Maschen beispielsweise ungeschickt gewählt, da eine Ecke mit Abstand vier Minuten vom Zentrum liegt und dadurch außerhalb der fünf-Minuten-Isochrone.

2.3.2 Dreiecksvermaschung

Neis u. a. 2008 beschreiben eine anschauliche Methode um Isochronen zu berechnen. Nach der Lösung des SSPs werden den Ecken des Graphen der geographischen Koordinate der repräsentierten Kreuzung zugeteilt. Die Kanten werden nicht benötigt und daher entfernt. Es liegt demnach eine 3D-Punktwolke vor. Jeder Ecke wird nun die benötigte Zeit zugewiesen, mit der diese zu erreichen ist. Anschließend werden die Ecken nach dem Delaunay Triangulationsverfahren vermascht. Dadurch entsteht eine Art Trichter mit der Startecke als Tiefpunkt auf der Höhe Null. Wird dieser Trichter auf Höhe des Zeitlimits geschnitten, entsprechen von oben betrachtet die Randkanten des Trichters der Isochrone.

2.3.3 Formenbasierter Ansatz

Die Implementierung des ORS zur Berechnung von Isochronen verwendet einen Formbasierten Ansatz. Zuerst werden mit dem in Kapitel 2.2.2 bereits ausführlich erklärten Dijkstra Algorithmus alle in gegebener Zeit erreichbaren Kanten markiert. Anschließend werden die geographischen Punkte (Pillar Nodes) aus der *WayGeometry* der Kante extrahiert (Siehe Kapitel 2.1.3 auf Seite 6). Um jeden der extrahierten Punkte wird ein kreisförmiger Pufferbereich gelegt. Dadurch können nahe beieinanderliegende Punkte übersprungen werden. Mit den verbleibenden Punkten wird eine Punktwolke generiert. Auf dieser Punktwolke wird nun der Alpha-Shape Algorithmus (Akkiraju u. a. 1995) angewandt, um die Isochrone als Hülle um die erreichbaren Wegsegmente zu zeichnen. Dieser Ansatz liefert präzise Ergebnisse bei schnellen Berechnungszeiten. Die Verwendung der Alpha-Shapes verhindert allerdings die Möglichkeit der Darstellung von nicht erreichbaren Gebieten innerhalb der Isochronen.

3 Methodik

Die Grundsätzlichen Überlegungen beruhen, wie in der Einleitung bereits erwähnt, auf den Notstandsvollmachten durch §35 Absatz 1 der StVO für Einsatzfahrzeuge des Rettungsdienstes, der Feuerwehr und der Polizei. Demnach dürfen sich Einsatzfahrzeuge im Notfall über die Vorschriften der StVO hinwegsetzen.

Die Frage, die sich hierbei stellt, ist, inwieweit von diesen Rechten im Ernstfall Gebrauch gemacht werden kann. Um diesen Sachverhalt zu untersuchen, wurde ein Fragenkatalog für die FFL zusammengestellt. Dieser wurde als Datei in der Cloud gespeichert und ist auch weiterhin verfügbar (Link im Anhang auf S.45). Die Fragen wurden unter Rücksicht der OSM-Datenstruktur und das vorhandene ORS-Backend gewählt. Die Antworten der FFL sind hier sinngemäß wiedergegeben und die wörtlichen Antworten sind im Cloud-Dokument im Anhang zu entnehmen. Auf Basis der erhobenen Informationen wurden geeignete OSM-Tags gesucht mit denen die empfohlenen Änderungen verwirklicht werden können. Anschließend wurden neue Java-Funktionen geschrieben um diese Tags bei der Erstellung des Graphen und bei Anfragen zu berücksichtigen. Außerdem wurde das Frontend an das neue Profil angepasst.

3.1 Informationserhebung

1. Maße der Fahrzeuge: Die Dimensionen des Fahrzeuges sind limitierende Faktoren für bestimmte Wegsegmente. Manche Brücken halten nur ein bestimmtes Gewicht aus und ein Tunnel hat nur eine gewisse Höhe. Hier stützt sich das ORS Backend auf Restriktionen durch die OSM-Tags: `maxlength`, `maxwidth`, `maxheight`, `maxweight` und `maxaxleload`. Von der FFL wurde als wichtigstes Fahrzeug Löschfahrzeuge der Klasse LF8, LF8/6 und MLF mit folgenden Daten angegeben:

Länge: 7 Meter

Breite: 2,5 Meter

Höhe: 3 Meter

Gewicht: 7,5 Tonnen

2. Maximale Geschwindigkeiten auf unterschiedlichen Straßentypen: Es kann nicht auf jeder Straße mit maximaler Geschwindigkeit des Fahrzeugs gefahren werden. Deswegen werden für jede Kante des Graphen Geschwindigkeitsmaxima definiert. Dabei wird auf einen Standardwert für den Straßentyp, die *Values*(Werte) des OSM *Keys* (Schlüssel) `highway`, zurückgegriffen. Tabelle 2 zeigt die bisherigen Standardgeschwindigkeiten für das Schwerfahrzeug-Profil des ORS zusammen mit den vorgeschlagenen Werten der FFL in Klammer. Es wurde darauf hingewiesen, dass die 80km/h auf Autobahnen nur gelten wenn kein Stau besteht. Im Fall eines Staus wäre laut FFL auch die Anfahrt auf der Gegenfahrbahn bzw. entgegen der Verkehrsrichtung auf der gleichen Bahn interessant. Genaue Informationen zu einzelnen Tags können der OSM Wikipedia (Contributers 2014) entnommen werden.

highway Value	km/h
<i>Autobahnen</i>	
motorway (Autobahn)	80
motorway_link (Autobahn-Zubringer)	50
motorroad (Kraftfahrtstraße)	80
trunk (Schnellstraße)	80
trunk_link (Zubringer zu Schnellstraße)	50
<i>Siedlungen</i>	
primary (Bundesstraßen)	60(80)
primary_link	50
secondary (Landes-/Staatsstraßen)	60(80)
secondary_link	50
tertiary (Kreisstraßen)	60(80)
tertiary_link	50
unclassified (Nebenstraße (oft ohne Mittellinie))	60
residential (Straße an und in Wohngebieten)	50
living_street (Spielstraße)	10
service (Erschließungsstraße)	20
road (unbekannte Straße)	20
track (Wald-/Feldweg)	15

Tabelle 2: Standardgeschwindigkeiten für unterschiedliche `highway` Values

Auf Wirtschafts-, Wald- und Feldwegen mit dem Key-Value-Pair `highway=track` kann zusätzlich der Zustand des Weges mit dem Tag `tracktype` beschrieben werden. Die bisherigen und die von der FFL vorgeschlagenen Geschwindigkeit für die jeweiligen Values sind in Tabelle 3 zu sehen.

tracktype	Value	km/h
grade1	(Wasserfester Belag)	20(25)
grade2	(Wassergebundene Decke)	15
grade3	(Befestigter oder ausgebesserter Weg)	10(15)
grade4	(Unbefestigter Weg)	5(10)
grade5	(Unbefestigter Weg)	5

Tabelle 3: Standardgeschwindigkeiten für unterschiedlichen `tracktype` Values

3. Dürfen vorgegebene Geschwindigkeiten (Bsp. 30er Zone/ Tempolimit 70 etc.) überschritten werden? Manchmal sind besondere Geschwindigkeitsrestriktionen, wie zum Beispiel Tempo-30-Zonen vorhanden. In Tempo-30-Zonen darf 50 km/h und in Spielstraßen darf 20 km/h gefahren werden. Dabei ist immer noch auf die Unverletztheit der anderen Verkehrsteilnehmer (vor allem Kinder) zu achten.

4. Dürfen Gewicht und/oder Achslast für Straßen mit Vorgabe überschritten werden? Es dürfen Straßen benutzt werden die zum Beispiel wegen einer folgenden Brücke auf 7,5 Tonnen beschränkt sind. Um die Brücke selbst zu nutzen ist allerdings lokales Wissen über die tatsächliche Tragfähigkeit notwendig. Allgemein müssen bei Zu- oder Durchfahrten für die Feuerwehr die Aufstellflächen und die Bewegungsflächen so befestigt sein, dass sie von Feuerwehrfahrzeugen mit einer Achslast bis zu 10 t und einem zulässigen Gesamtgewicht bis zu 16 t befahren werden können.

5. Dürfen Einbahnstraßen in Entgegengesetzter Richtung durchfahren werden? Einbahnstraßen dürfen in entgegengesetzter Richtung durchfahren werden.

6. Ist 5. im Einsatz überhaupt sinnvoll? (falls z.B. die Straße durch Fahrzeug(e) blockiert ist?) Ob eine Einbahnstraße benutzt wird muss der Fahrer während dem Einsatz entscheiden. Es hängt dabei von der verfügbaren Breite und der Länge der Straße ab. Auch die Möglichkeit des Ausweichens bei Gegenverkehr spielt eine Rolle. Anhand dieser Faktoren wird entschieden ob Zeit gewonnen wird und die Einbahnstraße benutzt wird oder nicht.

7. Zu welchen weiteren Routen bzw. Verkehrsnetz bezogenen Besonderheiten kommt es im Einsatz? Es dürfen Bus-, Taxi- und Tram-Spuren verwendet werden.

Key-Value-Paar	Geschwindigkeit
aeroway=runway (Start/Landebahn)	80
aeroway=taxilane (Rollweg)	80
highway=raceway (Rennstrecke)	80
highway=cycleway (Radweg)	10
tracktype=pedestrian(Fußgängerzone)	10
tracktype=footway(Fußweg)	5

Tabelle 4: Standardgeschwindigkeiten für spezielle Wegtypen

- 8. Ist es wichtig auf der richtigen Straßenseite anzukommen ?** Nein.
- 9. Wäre eine Suche nach Hydranten, Löschwassertanks etc. am Zielort bzw. im Einzugsgebiet sinnvoll?** Vor Ort gibt es nicht immer Löschwasser, weshalb eine Suche nach Hydranten, Seen, Tanks, Flüssen und ähnlichen Quellen auf jeden Fall sinnvoll ist.
- 10. Dürfen folgende Wegtypen befahren werden? Wenn ja mit welcher Geschwindigkeit?** Es dürfen die in Tabelle 4 gelisteten, für den normalen Straßenverkehr nicht zugänglichen Wegtypen benutzt werden.

3.2 Generierung des Routing-Profil

Aufbauend auf den gewonnenen Informationen aus dem Fragenkatalog können entsprechende Java-Klassen für das Löschfahrzeug-Profil erstellt werden. Dazu werden die bereits vorhandenen Klassen eines ORS-Profiles verwendet. Da die Dimensionen des Fahrzeuges mitberücksichtigt werden sollen, wird das Heavy-Vehicle-Profil als Grundlage benutzt. Die Prozessierung wird von vier Klassen gehandhabt, die an den passenden Stellen im Backends eingebunden werden müssen.

Davon sind drei für die Fahrzeugdimensionen zuständig:

Die Klasse `EmergencyVehicleAttributesGraphStorage` initiiert das Speicherobjekt und ist für die Fehlerbehandlung zuständig (Sourcecode 1).

Die Klasse `EmergencyVehicleGraphStorageBuilder` baut das Speicherobjekt zusammen. Hier werden die Beschränkungen für die Höhe, Breite, Länge, Achslast und das Gewicht aus den OSM-Daten gespeichert (Sourcecode 2). Das Profil für Schwerfahrzeuge berücksichtigt hier normalerweise unterschiedliche Restriktionen für verschiedene Fahrzeugtypen.

```

public class EmergencyVehicleAttributesGraphStorage extends
    HeavyVehicleAttributesGraphStorage {
    public EmergencyVehicleAttributesGraphStorage(
        boolean includeRestrictions) {
        super(includeRestrictions);
    }

    /* pointer for no entry */
    public void init(Graph graph, Directory dir) {
        if (edgesCount > 0)
            throw new AssertionError(
                "The ext_emergency storage must
                be initialized only once.");

        this.orsEdges = dir.find("ext_emergency");
    }

    public boolean loadExisting() {
        if (!orsEdges.loadExisting())
            throw new IllegalStateException(
                "Unable to load storage 'ext_emergency'.
                corrupt file or directory? ");

        edgeEntryBytes = orsEdges.getHeader(0);
        edgesCount = orsEdges.getHeader(4);
        return true;
    }
}

```

Sourcecode 1: Speicherobjekt für die Fahrzeugeigenschaften

Manche Straßen sind beispielsweise nur für Forst- andere nur für Lieferfahrzeuge freigegeben. Andere Straßen dürfen normalerweise aufgrund des OSM-Tags `access=private` oder `access=restricted` gar nicht verwendet werden. Außer den materiellen Beschränkungen durch die Fahrzeugdimensionen gelten für Einsatzfahrzeuge diese Beschränkungen nicht.

Die Klasse `EmergencyVehicleEdgeFilter` vergleicht bei der Ausführung der Routing-Anfrage für jede Kante die als Parameter angegebenen Fahrzeug-Dimensionen mit den Restriktionen aus dem im `EmergencyVehicleGraphStorageBuilder` produzierten Objekt. Liegt der übergebene Wert unterhalb der Beschränkung kann potenziell über diese Kante geroutet werden. Überschreitet der Wert die Beschränkung, wird die Kante vom Routing ausgeschlossen (Sourcecode 3).

Der Hauptteil der Änderungen wird in der `EmergencyFlagEncoder` Klasse vorgenommen. Hier werden beispielsweise die Maximalgeschwindigkeiten für die unterschiedlichen Wegtypen (Frage 2.) implementiert (Abb. 4). Die Geschwindigkeiten sind bewusst höher als die zurückgegebenen Werte gewählt, mit der Absicht das Löschfahrzeug-Profil auch für andere Einsatzfahrzeuge, wie zum Beispiel PKW der Polizei nutzbar zu machen. Das

```

        if (key.equals("maxheight")) {
            valueIndex = VehicleDimensionRestrictions.MaxHeight;
        } else if (key.equals(
                    "maxweight")) {
            valueIndex = VehicleDimensionRestrictions.MaxWeight;
        } else if (key.equals(
                    "maxweight:hgv")) {
            valueIndex = VehicleDimensionRestrictions.MaxWeight;
        } else if (key.equals("maxwidth")) {
            valueIndex = VehicleDimensionRestrictions.MaxWidth;
        } else if (key.equals(
                    "maxlength")) {
            valueIndex = VehicleDimensionRestrictions.MaxLength;
        } else if (key.equals(
                    "maxlength:hgv")) {
            valueIndex = VehicleDimensionRestrictions.MaxLength;
        } else if (key.equals(
                    "maxaxleload")) {
            valueIndex = VehicleDimensionRestrictions.MaxAxleLoad;
        }
    }

```

Sourcecode 2: Entnahme der Dimensionsbeschränkungen

```

// the restriction on the edge is smaller than the given = evade edge
if (gsAttributes.getEdgeRestrictionValues(edgeId, buffer, retValues))
{
    double value = retValues[0];
    if (value > 0.0f && value < restrictionValues[0])
        return false;
}

```

Sourcecode 3: Vergleich der übergebenen Dimensionen mit den Restriktionen des Graphen

Geschwindigkeitslimit von 80km/h hängt mit der ausgewählten Fahrzeugklasse zusammen und nicht mit der Straßenart. Fahrradwege und Fußgängerzonen werden durch die Zuweisung einer Geschwindigkeit ebenfalls für das Profil nutzbar gemacht.

Die Beschränkungen 30er-Zonen und Spielstraßen sollen mit dem Schnipsel aus Code-Beispiel 5 übergangen werden. Wichtig dabei ist, dass der OSM-Tag `highway=living-street` nicht automatisch eine Spielstraße ist. In Spielstraßen darf in Deutschland nur Schrittgeschwindigkeit gefahren werden. Diese Eigenschaft muss beim *Tagging*⁹ berücksichtigt werden. Häufig wird solchen Straßen der Tag `maxspeed=7` zugewiesen.

Um Bus- und Taxispuren für das Profil nutzbar zu machen, wurde das Code Segment 6 implementiert. Für mit Fahrzeugen befahrbare Tramspuren gibt es in OSM bisher bis dato keinen geeigneten Tag. Die Segmente der Tramspur, die befahren werden können, liegen in der Regel auf einer vorhandenen Straße.

Um Einbahnstraßen in jeder Richtung nutzen zu können, wurden Teile des Codes entfernt,

⁹taggen: das Zuweisen eines Key-Value-Pairs zu einem OSM Objekt

```

Map<String, Integer> defaultSpeedMap = new HashMap<String, Integer>();
// autobahn
defaultSpeedMap.put("motorway", 130);
defaultSpeedMap.put("motorway_link", 50);
defaultSpeedMap.put("motorroad", 130);
// bundesstraße
defaultSpeedMap.put("trunk", 110);
defaultSpeedMap.put("trunk_link", 50);
// linking bigger town
defaultSpeedMap.put("primary", 100);
defaultSpeedMap.put("primary_link", 50);
// linking towns + villages
defaultSpeedMap.put("secondary", 100);
defaultSpeedMap.put("secondary_link", 50);
// streets without middle line separation
defaultSpeedMap.put("tertiary", 90);
defaultSpeedMap.put("tertiary_link", 50);
defaultSpeedMap.put("unclassified", 60);
defaultSpeedMap.put("residential", 50);
// spielstraße
defaultSpeedMap.put("living_street", 20);
defaultSpeedMap.put("service", 20);
// unknown road
defaultSpeedMap.put("road", 20);
// forestry stuff
defaultSpeedMap.put("track", 15);
// additional available for emergency
defaultSpeedMap.put("raceway", 100);
defaultSpeedMap.put("cycleway", 10);
defaultSpeedMap.put("pedestrian", 10);
defaultSpeedMap.put("footway", 5);

```

Sourcecode 4: Definition von Maximalgeschwindigkeiten für unterschiedliche Wegtypen

die einer Kante eine vorwärts- oder rückwärts-Richtung geben¹⁰.

Der `EmergencyFlagEncoder` beinhaltet des weiteren die Funktion `collect`, welche dem Wegsegment anhand seines Wegtyps eine Priorität zuschreibt. Auf diese Weise können Straßen auf denen hohe Geschwindigkeiten gefahren werden können oder die extra für Liefer- oder Forstfahrzeuge ausgeschrieben sind, bevorzugt benutzt werden und Straßen durch Wohngebiete oder Spielstraßen nur dann verwendet werden, wenn das Ziel anders nicht zu erreichen ist.

¹⁰Jeweils aus Sicht der Startecke einer Kante gesehen

```

if (maxSpeed == 30.0)
    maxSpeed = 50.0;
// Spielstraße
if (maxSpeed == 7.0 && highway == "living_street")
    maxSpeed = 20.0;

```

Sourcecode 5: Limit für 30er-Zonen und Spielstraßen

```

    if (way.hasTag("lanes:psv") || way.hasTag(
        "lanes:bus") || way.hasTag("lanes:taxi")
        || way.hasTag("busway, lane") || way.hasTag(
            "busway:left, lane") || way.hasTag(
                "busway:right, lane"))
        return acceptBit;
    // allow railway=tram where paved? no suitable
    // exclusion criteria found yet
    if (way.hasTag("aeroway", "runway") || way.hasTag(
        "aeroway", "taxilane"))
        return acceptBit;
    // allow highway=footway, pedestrian
    if (highwayValue == "pedestrian"
        || highwayValue == "footway")
        return acceptBit;

```

Sourcecode 6: Nutzung von speziellen Wegtypen

Durch den Code-Ausschnitt in Beispiel 7 soll die höchste Priorität jene Straßen mit dem Tag `service=emergency_access` erhalten. Das sind zum Beispiel Rettungszufahrten zu Gebäuden und gesonderte Autobahnauffahrten, die vom normalen Verkehr nicht benutzt werden dürfen. Da Busspuren auch vom motorisierten Individualverkehr freigehalten werden müssen, werden diesen an dieser Stelle ebenfalls eine höhere Priorität zugewiesen.

Beim Ausführen des Codes werden die auf diese Weise generierten Attribute (Flags) beim Bau des Graphen zusammen mit den geographischen Koordinaten, den Wegtypen, der Richtung, der Oberfläche und noch vielen weiteren Attributen auf den Kanten des Graphen gespeichert. Der Graph wird, wie in Kapitel 2.1.3 bereits beschrieben, aufgebaut.

```

protected void collect(ReaderWay way,
                      TreeMap<Double, Integer> weightToPrioMap) {
    if (way.hasTag("highway", "service") && way.hasTag(
        "service", "emergency_access"))
        weightToPrioMap.put(100d, PriorityCode.BEST
            .getValue());

```

Sourcecode 7: Nutzung von Notfalleinfahrten

Um das Profil auch für die Kooperationspartner in Lützelburg nutzbar zu machen, wurde eine Instanz des ORS Backends mit diesen Änderungen auf einen Server der Universität Heidelberg installiert. Genaue Anweisungen zum Aufsetzen so eines Servers werden in Neis 2006 ausführlich beschrieben.

Damit ist Prozessierung des Routing-Profil für Einsatzfahrzeuge fertiggestellt und es können Anfragen an die Schnittstelle des ORS gesendet werden.

3.3 Anpassungen Frontend

Das ORS Frontend ist ein Graphical User Interface (GUI), welches die interaktive Erstellung einer Abfrage an das Backend ermöglicht. Gleichzeitig kann das Ergebnis auf der gleichen Oberfläche dargestellt werden. Das Frontend für das Löschfahrzeug-Profil kann unter dem Link erreicht werden.

Allgemein kann über einen Rechtsklick auf die Karte ein Start-, Weg- oder Endpunkt platziert werden. Sobald zwei Punkte vorhanden sind, wird ein Routing-Anfrage für das ausgewählte Profil an das Backend gesendet und die erhaltene Antwort als schnellster Weg zwischen den Punkten dargestellt. Genauere Informationen zu der Route, wie die benötigte Zeit, die Distanz oder die einzelnen Wegstücke können der Seitenleiste entnommen werden. Um eine Erreichbarkeitsanalyse durchzuführen kann am linken Rand der Website von Routing auf Isochronen umgestellt werden. Hier kann mit einem Rechtsklick auf die Karte ein Zentrum gesetzt werden. Nach einem Klick auf den **Isochronen-Generieren-Button** wird die Antwort für den aus den Einstellungen generierten Anfrage angezeigt.

Da der Fokus der Arbeit auf der Erstellung des Profils und nicht der Darstellung der Ergebnisse liegt, werden die Änderungen am Frontend hier nur grob dargestellt. Alle Änderungen können im Detail nachvollzogen werden, da der Quellcode online verfügbar ist (Siehe Anhang S. 45). Das Auto- und Heavy-Vehicle-Profil wurde für direkte Vergleiche zu den Profil für Einsatzfahrzeuge beibehalten. Gleichzeitig wurde das neue Profil für Einsatzfahrzeuge eingefügt für welches zwei Fahrzeugklassen vorhanden sind.

1. Profil für Löschfahrzeuge: Für dieses Profil werden automatisch die Höhe, Länge, Breite, Achslast, das Gewicht sowie die Höchstgeschwindigkeit eingestellt. Damit müssen diese Daten bei einem neuen Aufruf der Seite nicht jedes mal neu eingegeben werden.
2. Profil allgemein für Einsatzfahrzeuge: Hier werden Fahrzeugdimensionen nicht automatisch eingestellt. Die Höchstgeschwindigkeit für dieses Profil ist standardmäßig auf 130km/h gesetzt. Diese kann in den weiteren Einstellungen deaktiviert werden.

Aufgrund der Berechnungszeit für den Graphen wurde der Datenbereich auf den politischen Raum von Schwaben begrenzt. Abfragen können nur in diesem Bereich getätigt werden, weshalb dieser als durchsichtiges Polygon über der Karte visualisiert wird. Der

aktive Datenbereich kann über eine Checkbox in der rechten unteren Ecke angeschaltet werden.

4 Ergebnisse

Um das Routing-Profil für Einsatzfahrzeuge auf seine Funktionalität zu validieren, müssen zwei unterschiedliche Aspekte beleuchtet werden. Durch die Implementierung waren Veränderungen zum einen bei der Prozessierung des Graphen und zum anderen in den Routing-Ergebnissen zu erwarten. Der Graph beziehungsweise das Straßennetzwerk und die Integration der Attribute für Feuerwehreinfahrten, Rad- und Fußwegen sowie Einbahnstraßen, musste bestätigt werden. Außerdem wurden die Routing-Antworten auf ihre Praxistauglichkeit geprüft und daher die benötigten Fahrzeiten als auch die zurückgelegten Distanzen anhand von Testfahrten analysiert.

4.1 Validierung des Graphen

Für die folgenden Validierungen wurde ein Gebiet um Heidelberg als Datengrundlage verwendet. Da der ORS zur Darstellung mehrerer Routen bisher noch nicht geeignet ist, wurden die Antworten im GeoJson Format mit der Website <http://geojson.io> visualisiert.



Abbildung 10: Routing in die Fußgängerzone der Heidelberger Altstadt

4.1.1 Fußgängerzonen

Die Verwendung neuer Wegtypen konnte eingebunden werden wie in Abbildung 10 zu erkennen ist. Hier wurden als Zielpunkte verschiedene Stellen auf der Fußgängerzone (v.a. Hauptstraße) in der Heidelberger Altstadt gewählt. Im Gegensatz zu dem gewöhnlichen Auto-Profil des ORS findet das Profil für Einsatzfahrzeuge seinen Weg bis zum gewünschten Zielpunkt durch Fußgängerzonen. Durch die niedrige Geschwindigkeitsangabe des Backends wird allerdings nicht durchgehend in der Fußgängerzone gefahren, welches zu manchen Nachtzeiten durchaus schneller erfolgen kann. Stattdessen werden die Zielpunkte von den schnelleren Seitenstraßen aus angefahren.

4.1.2 Notfalleinfahrten



Abbildung 11: Routing durch Feuerwehreinfahrten

Auch die Nutzung von Notfalleinfahrten konnte implementiert werden. Abbildung 11 zeigt zwei Zielpunkte, die sich auf dem Gebäude einer Grundschule in Augsburg befinden. Während das Einsatzfahrzeug-Profil die verfügbaren Feuerwehreinfahrten benutzt (11a), kann mit gewöhnlicher Routenführung nur die Rückseite des Schulgebäudes erreicht werden (11b).

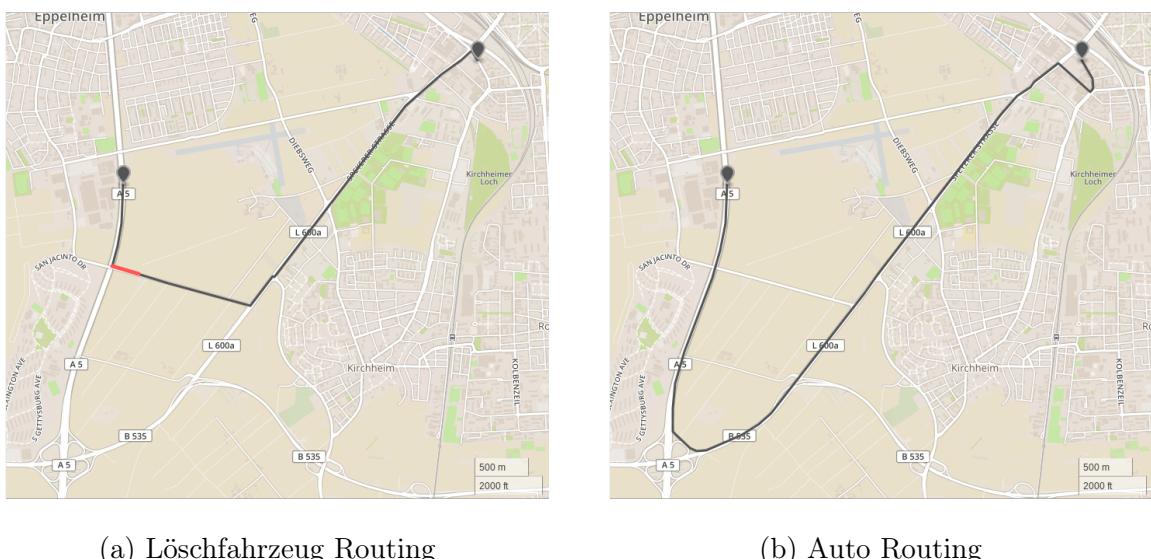


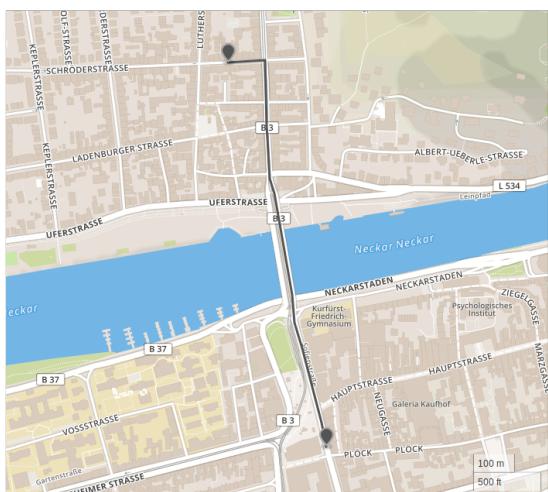
Abbildung 12: Routing auf die A5 über eine Notauffahrt

In einem weiteren Beispiel wird die schnellste Route zu einem Punkt auf der A5 auf der östlichen Spur südlich von Eppelheim in Heidelberg mit Startpunkt in der Weststadt

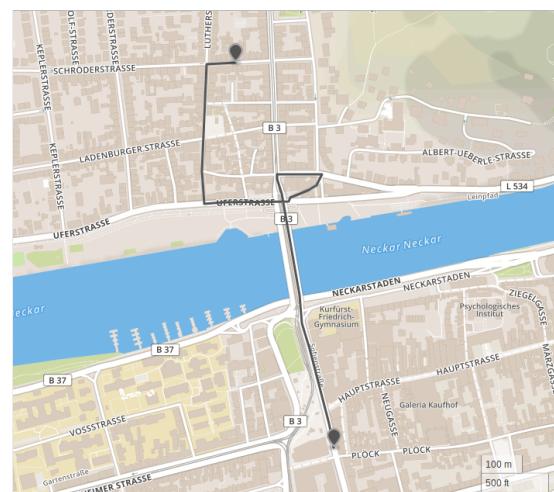
gesucht (12). Für den normalen Verkehr führt der Weg über das südliche Autobahnkreuz (12b). Ein Einsatzfahrzeug kann stattdessen vorher auf eine Nebenstraße einbiegen und die in Abbildung 12a rot eingefärbte Notauffahrt verwenden. Damit kann in diesem Fall eine Strecke von mehr als 2,5 Kilometern eingespart werden.

4.1.3 Einbahnstraßen

Die Verwendung von Einbahnstraßen in Gegenrichtung konnte ebenfalls bestätigt werden. Auch durch diese Funktion können kürzere Wegstrecken für die Einsatzfahrzeuge gefunden werden. Durch die große Zahl von Einbahnstraßen in Heidelberg-Neuenheim kann das Profil für Einsatzfahrzeuge (Abb. 13a) gegenüber dem Auto-Profil (Abb. 13) eine wesentlich passendere Route nutzen und muss auf diese Weise etwa 400 Meter weniger zurücklegen.



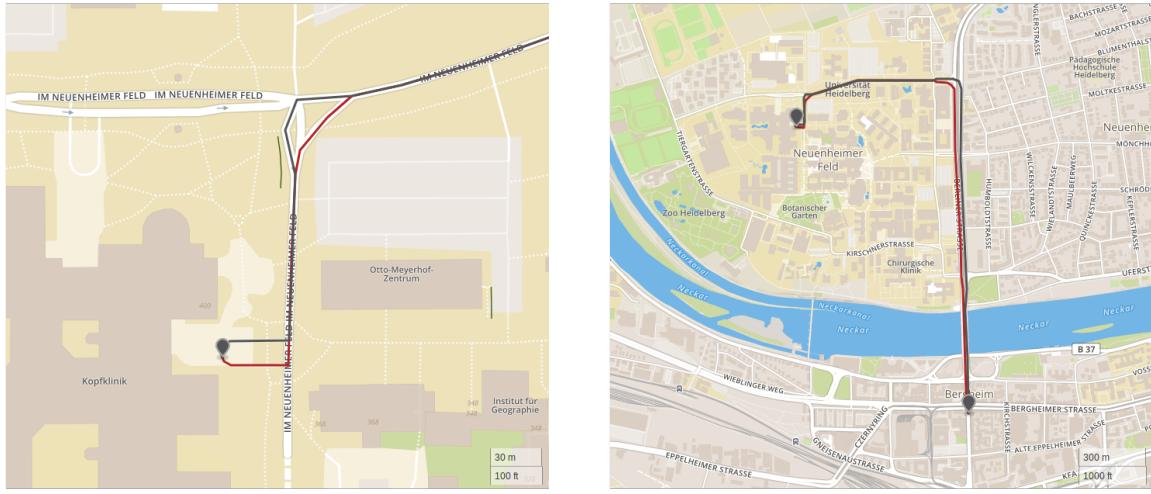
(a) Löschfahrzeug Routing



(b) Auto Routing

Abbildung 13: Routing durch Einbahnstraßen

Allerdings verwendet das Löschfahrzeug-Profil Einbahnstraßen bisher ohne Einschränkung. Daher wird die Gegenfahrbahn auch bei einem Gewinn von wenigen Sekunden verwendet (Abb. 14). Deswegen wird, wie Abbildung 14b zeigt, über weite Strecken die Gegenfahrbahn verwendet, obwohl unmittelbar daneben auch die normale Spur verfügbar ist. Außerdem wird an größeren Kreuzungen die Abbiegespur des Gegenverkehrs verwendet, was keine realistische Lösung darstellt (Abb. 14a).



(a) Abkürzung in Kurven

(b) Dauerhafte Nutzung der Gegenfahrbahn

■ Auto-Profil ■ Einsatzfahrzeug-Profil

Abbildung 14: Routing auf der Gegenfahrbahn

4.2 Validierung der Distanzen und der Fahrzeit

Im Folgenden wurden Isochronen mit der Freiwilligen Feuerwehr Gablingen als Zentrum berechnet ($48.454063, 10.824415$ [Latitude, Longitude]). Folgende Einstellungen wurden dabei genutzt:

- Distanz: 5 Minuten
- Intervall: 1 Minuten
- Maximale Geschwindigkeit: 80 km/h für Löschfahrzeug sowie Heavy-Vehicle; 130 km/h für PKW sowie Einsatzfahrzeug
- Heavy-Vehicle-Einstellungen für Löschfahrzeug- und Heavy-Vehicle-Profil: Länge=7m ; Breite= 2.5m; Höhe= 3m; Gewicht= 7.5t

Die ersten Ergebnisse lieferten zu erwartende Resultate (Abb. 15), denn das Profil für allgemeine Einsatzfahrzeuge (15d) konnte gegenüber dem normalen Auto-Profil (15b) einen größeren Bereich abdecken. Genauso ist das in fünf Minuten zureichende Gebiet für Löschfahrzeuge (15c) sichtbar größer als für das Heavy-Vehicle-Profil (15a). Auffällig sind dabei die ausgedehnten 5-Minuten-Isochronen, welche durch den Alpha-Shape Algorithmus (Kapitel 2.3.3) auch unzugängliche Bereiche beinhalten.

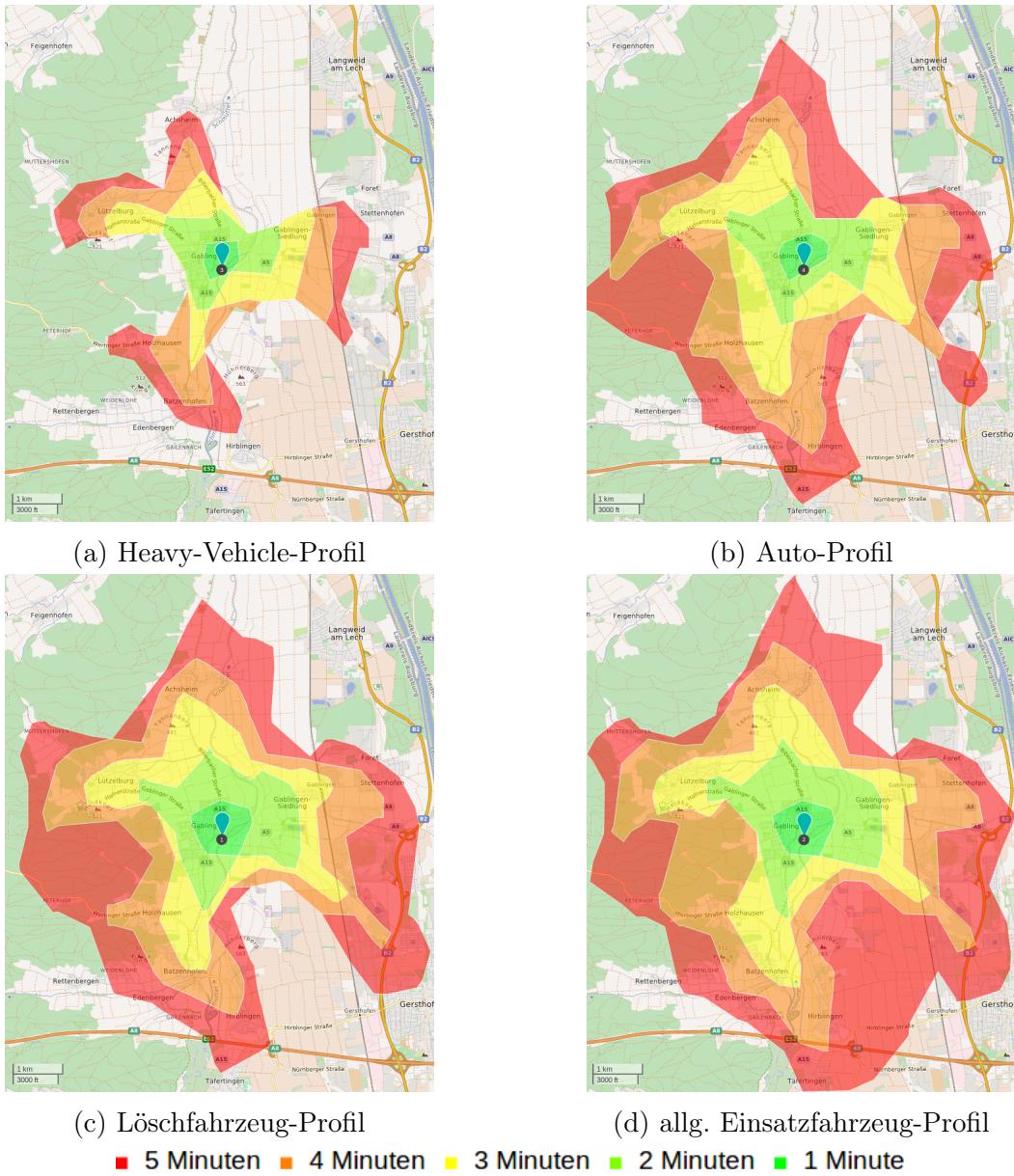


Abbildung 15: Ergebnis Isochronen

Nach einer Testfahrt der FFL wurde allerdings ersichtlich, dass die Ergebnisse nicht im realistischen Bereich liegen. In fünf Minuten konnte das Löschfahrzeug auf der Einsatzfahrt vom Startpunkt in Gablingen Richtung Muttershofen nur den nordwestlichen Rand von Lützelburg erreichen. Das Profil des Löschfahrzeugs erreichte allerdings Orte über Muttershofen hinaus.

Um genaue Anpassungen am Backend vorzunehmen, wurde zunächst eine weitere Testfahrt durchgeführt, bei der für jede volle Minute der Aufenthaltsort des Fahrzeugs markiert wurde (Abb. 16). Diese Angaben wurden mit den bisherigen Rückgabewerten des Profils verglichen. Wie aus der Gesamtdauer für die Strecke in Tabelle 5 ersichtlich wird,

ist das Profil für Einsatzfahrzeuge ungefähr 90 Sekunden zu schnell.

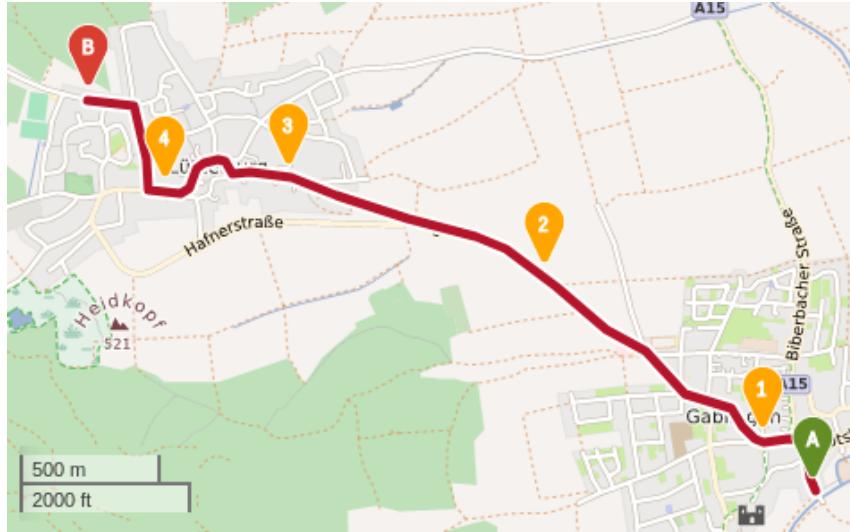


Abbildung 16: Testfahrt 1

Wegpunkt	1	2	3	4	B
Distanz	363,2m	1352,8m	2331,9m	2862,3m	3387,3m
Fahrtzeit (Profil)	28,6s	88,7s	139,4s	177,6s	209,8s
Fahrtzeit (Fahrt 1)	60,0s	120,0s	180,0s	240,0s	300,0s
Fahrtzeit Abschnitt	28,6s	60,1s	50,7s	38,2s	32,2s
Fahrtzeit Abschnitt (Fahrt 1)	60,0s	60,0s	60,0s	60,0s	60,0s
Geschwindigkeit	45,7km/h	59,3km/h	69,5km/h	50,0km/h	58,7km/h
Geschwindigkeit (Fahrt 1)	21,8km/h	59,4km/h	58,7km/h	31,8km/h	31,5km/h

Tabelle 5: Fahrt 1 – 1. Auswertung

Die große Differenz tritt aufgrund von fehlenden Beschleunigungs- und Bremszeiten auf. Bisher wird bei der Berechnung der Fahrzeit lediglich 90% des für ein Segment vorgegebenen Geschwindigkeitslimits verwendet. Damit soll sichergestellt sein, dass die Geschwindigkeitsbegrenzung definitiv eingehalten wird. Dieser Faktor wurde allerdings für die Implementierung in dieser Arbeit entfernt. Demnach wird ein Straßensegment auf dem 50 km/h gefahren werden dürfen über die komplette Distanz mit 50 km/h befahren. In der Realität benötigt ein Fahrzeug dieser Größenordnung allerdings einige Sekunden um diese Geschwindigkeit aus dem Stand zu erreichen. Der selbe Zusammenhang besteht für Bremsvorgänge ebenfalls. Daraus gehen drei Szenarien hervor, welche nach festgelegter Route einen Einfluss auf die Fahrzeit haben können. Das sind der Start, ein Abbiegevorgang (engl.: Turn) und die Ankunft. Es gibt weitere Faktoren die beispielsweise andere Verkehrsteilnehmer betreffen, allerdings sind die drei genannten Szenarien aus jeder Routenführung ersichtlich und werden bei einer Einsatzfahrt in der Regel auftreten.

Anhand dieses Zusammenhangs wurde eine weitere Java-Klasse `AccelerationWeighting` in der die zusätzliche Zeit für diese Szenarien berechnet wird, implementiert (Siehe Anhang S.47). Diese Klasse soll zwei Funktionen erfüllen: Zum einen muss bereits bei der Suche nach dem schnellsten Weg im Gegensatz zu geraden Strecken eine zusätzliche Zeit für Abbiegevorgänge mit einfließen. Zum anderen müssen bei der Berechnung der Fahrzeit Start-, Ankunfts- und Abbiegezeit mit berücksichtigt werden.

Es stellt sich nun die Frage, wie ein Abbiegevorgang auf dem Graphen identifiziert werden kann. Die Änderung des Straßennamens ist sicherlich eine Möglichkeit viele Abbiegevorgänge abzudecken. Allerdings ist nicht immer ein Straßenname vorhanden und nicht immer bedeutet der Wechsel des Straßennamens, dass in diese Straße eingebogen werden muss. Eine effizientere Lösung bietet die Ausrichtung der Straßensegmente, da hier die Daten in allen Fällen vorhanden sind. Deshalb wird in der AccelerationWeighting Klasse an Tower Nodes (Kreuzungen) der Winkel zwischen dem letzten und dem nächsten Straßensegment berechnet. Eine Abbiegung bzw. eine enge Kurve wird in dieser Arbeit durch einen Winkel zwischen 50 und 140 Grad definiert. Bei einer Routing-Abfrage wird in einem solchen Fall das Gewicht der auf die Kurve folgenden Kante erhöht. Ebenso wird sobald der schnellste Weg ermittelt ist an diesen Stellen die Bremszeit vor der Abbiegung und die Beschleunigungszeit nach der Abbiegung zur Gesamtzeit des folgenden Wegsegmentes addiert. Der gleiche Vorgang wird für Start und Ziel durchgeführt. Die addierte Zeit wird als *Penalty* (dt.: Strafe) bezeichnet.

Wegpunkt	Fahrtzeit	Differenz
1min	78,3s	+18,3s
2min	138,5s	+18,5s
3min	188,5s	+8,5s
4min	226,7s	-3,3s
5min	298,9s	-1,1s

Tabelle 6: Fahrt 1 – Fahrzeit

Anhand der vorliegenden Testfahrt wurde das Profil derart kalibriert, dass durch die Penalties für Abbiegungen, Start und Ziel die fehlenden 90 Sekunden benötigt wurden. Für Start sowie Ankunft wurden 15 und für Abbiegungen 20 Sekunden veranschlagt.

Mit dem neu eingestellten Profil wurde nun erneut eine Anfrage für die erste Testfahrt gesendet. Wie erwartet, benötigte das Profil nun für diesen Weg ebenfalls fast genau fünf Minuten. In Tabelle 6 ist die Differenz zu den einzelnen Minutenmarkern der 1. Testfahrt

für diese Anfrage zu sehen. Diese Ergebnisse zeigen dass das Profil den ersten Teil der Route zu langsam und den zweiten Teil zu schnell absolviert.

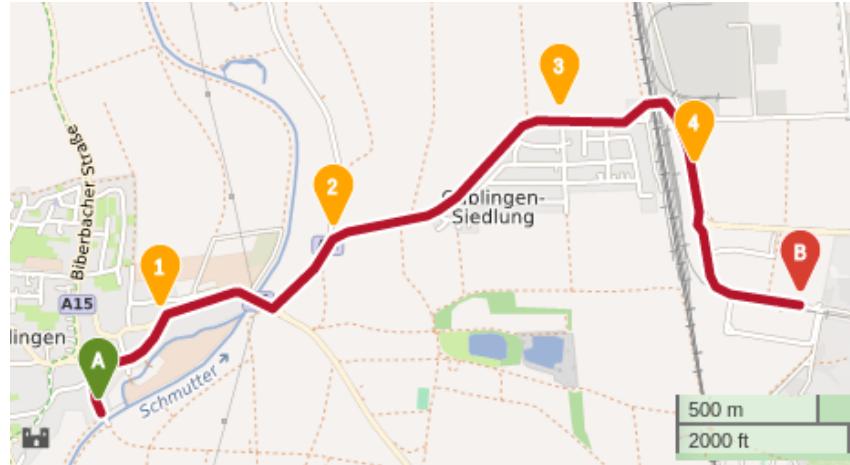


Abbildung 17: Testfahrt 2

Wegpunkt	Fahrtzeit	Differenz
1min	86.6s	+26.6s
2min	149.9s	+29.9s
3min	207.5s	+27.5s
4min	253.5s	+13.5s
5min	318.6s	+18.6s

Tabelle 7: Fahrt 2 – Fahrzeit

Diese Kalibrierung wurde an zwei weiteren Testfahrten (Abb. 17 und 18) vom selben Ausgangspunkt überprüft.

In den Tabellen 7 und 8 ist zu sehen, das 8 von 10 Wegpunkten um mehr als 20 Sekunden, in 3 Fällen sogar 40 Sekunden zu spät erreicht werden. Mit den Ergebnissen dieser Testfahrten steht fest: das Profil ist noch erheblich zu langsam und die Penalties zu hoch.

Die Penalties für Start und Ankunft wurden für die folgenden Analysen um die Hälfte reduziert und lagen somit bei 7,5 Sekunden. Penalties für Abbiegungen wurden auf 16 Sekunden reduziert.

Wegpunkt	Fahrtzeit	Differenz
1min	89.8s	+29.8s
2min	162.4s	+42.4s
3min	213s	+33s
4min	282.3s	+42.3s
5min	343.9s	+43.9s

Tabelle 8: Fahrt 3 – Fahrzeit

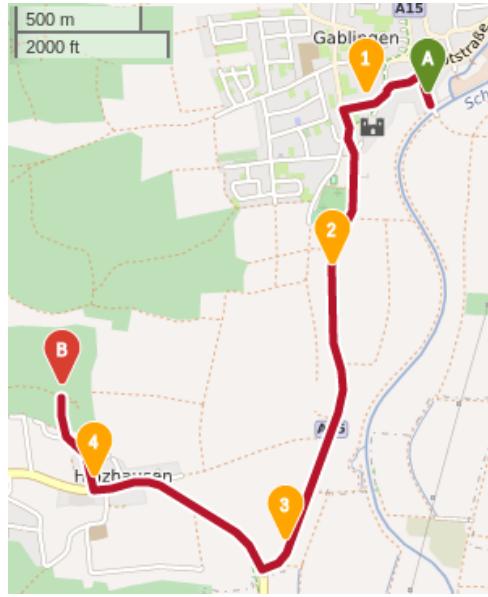


Abbildung 18: Testfahrt 3

Mit der neuen Gewichtung wurden die Anfragen für die drei Testfahrten erneut gesendet und mit den Minuten-Markierungen der wirklich benötigten Zeiten verglichen. Die Ergebnisse sind der Tabelle 9 zu entnehmen.

Wegpunkt	Fahrt 1		Fahrt 2		Fahrt 3	
	Fahrtzeit	Differenz	Fahrtzeit	Differenz	Fahrtzeit	Differenz
1min	59.5s	-0.5s	67.6s	+7.6s	70.8s	+10.8s
2min	119.5s	-0.5s	126.9s	+6.9s	139.4s	+19.4s
3min	169.5s	-10.5s	184.5s	+4.5s	190s	+10s
4min	207.7s	-32.2s	230.5s	-10.5s	255.2s	+15.2s
5min	271.9s	-28.1s	291.6s	-8.4s	312.9s	+12.9s

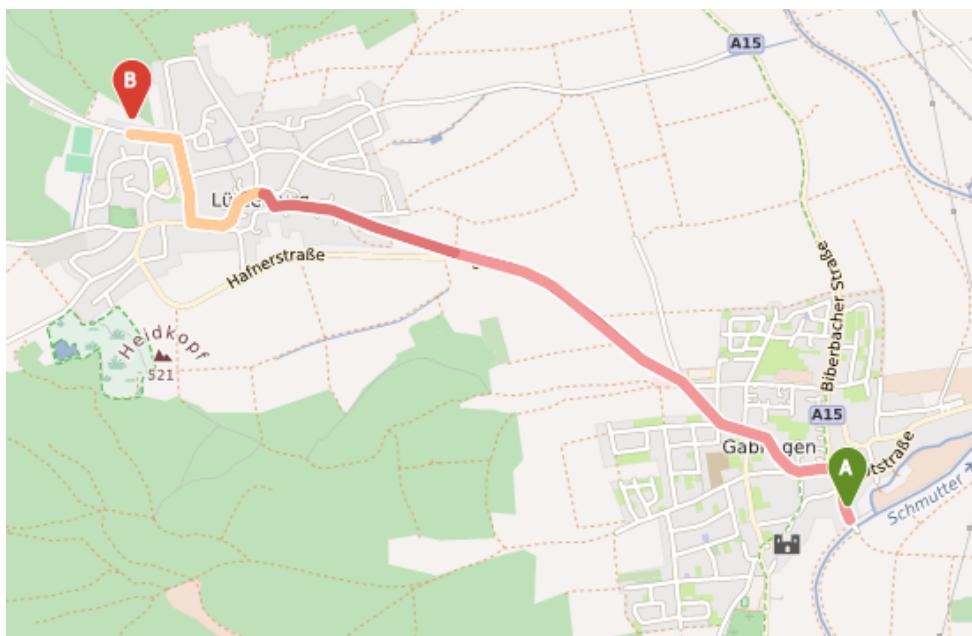
Tabelle 9: Fahrt 1,2,3 – 2. Auswertung

Um die Testfahrten genauer analysieren zu können, wurde das Backend um bisher fehlende Funktionen für die Rückgabe von zusätzlichen Informationen erweitert. Dabei wurden die Speicherobjekte für Wegtypen und Wegoberfläche hinzugefügt und zusätzlich die Höheninformationen der Punkte zurückgegeben. Im Frontend konnten dadurch nun die Wegtypen und Wegoberflächen aber auch die Steigung und somit auch ein Höhenprofil angezeigt werden. Außerdem wurde ein Feature zur Darstellung der Höchstgeschwindigkeit der einzelnen Streckensegmente eingebaut.

5 Diskussion

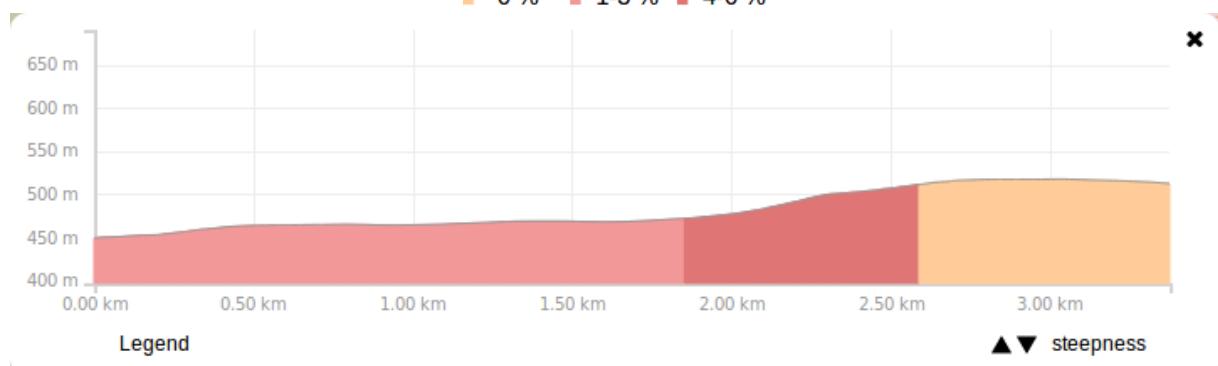
5.1 Teststrecke 1

Durch die implementierten Funktionen wurde ersichtlich, dass bei der Berechnung der Zeit bisher die Steigung als entscheidender Faktor nicht betrachtet wurde. Auf der ersten Teststrecke muss das Löschfahrzeug insgesamt einen Höhenunterschied von ungefähr 70 Metern überwinden (Abb. 19b). Über die Hälfte der Distanz hat dabei eine Steigung von 1-3% und auf einem Viertel der Strecke sogar eine Steigung von 4-6%. Ein Fahrzeug dieser Gewichtsklasse kann auf dieser Strecke folglich nicht die für den größten Teil dieses Anstiegs geltende Maximalgeschwindigkeit von 80 km/h erreichen.



(a) Strecke 1 mit Steigung

■ 0 % ■ 1-3 % ■ 4-6 %



(b) Höhenprofil der ersten Strecke

Abbildung 19: Fahrt 1 – Steigung und Höhenprofil

Darüber hinaus liegen auf der Strecke im inneren Lützelburgs einige langgezogene aber dennoch enge Kurven (Abb. 20). Auch hier kann das Löschfahrzeug nicht die gegebene Geschwindigkeit beibehalten und muss abbremsen. Diese Kurven werden allerdings von Löschfahrzeug-Profil nicht als Abbiegung erkannt, da der Winkel zwischen den Segmenten zu groß ist. Daher absolviert das Profil diesen Streckenabschnitt in geringerer Zeit als das echte Fahrzeug.

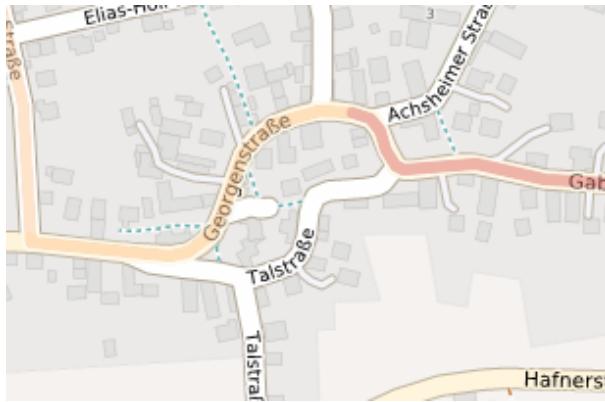


Abbildung 20: Fahrt 1 – Unregistrierte Abbiegungen

Weiterhin wurde für jede der drei Fahrten beobachtet, dass auf den Segmenten mit Maximalgeschwindigkeit (80 km/h) das Profil ebenfalls konstant ein paar Sekunden gegenüber der Testfahrt gutmachen kann. Die Erklärung dafür ist, dass das Löschfahrzeug die angegebene Maximalgeschwindigkeit nicht komplett erreichen kann. Auch wenn die Angabe mit der Geschwindigkeitsanzeige übereinstimmt, ist die effektive Geschwindigkeit geringer.

Die Zeitdifferenzen aus Tabelle 9 zeigen: das Profil fährt dem echten Fahrzeug mit der derzeitigen Gewichtung über die ganze Strecke hinweg. Wenn die genannten Faktoren der Steigung, der nicht mit einberechneten schärferen Kurven und der Maximalgeschwindigkeit mit einbezogen werden, ist ein Ergebnis von etwa 5 Minuten zu erwarten.

5.2 Teststrecke 2

Da die 2. Strecke nur in der Ebene verläuft, sind keine Abweichungen durch die Steigung zu erwarten. Die Differenzzeiten betragen für alle fünf Wegpunkte ungefähr 10 Sekunden. Auffallend ist der Sprung vom 3. zum 4. Wegpunkt, bei welchem das Profil 14 Sekunden aufholt. Nach einer genaueren Betrachtung dieses Segments stellte sich heraus, dass hier

eine einspurige Unterführung durchfahren werden musste auf die eine durch die Topologie unübersichtliche Kurve folgt (Abb. 21). Daher kam es auf der Fahrt zu Verzögerungen, welches das Aufholen des Profils gegenüber der Testfahrt erklärt.



Abbildung 21: Fahrt 2 – Unterführung

5.3 Teststrecke 3

Bei den Ergebnissen der 3. Strecke (Tab. 9) ist das Profil bereits nach dem ersten Wegpunkt um mehr als 10 Sekunden zu langsam. Bis zum Zwei-Minuten-Wegpunkt wird dieser Rückstand fast verdoppelt. Nach genauerer Überprüfung der Durchschnittsgeschwindigkeiten stellte sich heraus, dass der Weg hier durch eine 30er-Zone führt. Allerdings wird diese nicht mit den erwarteten 50 km/h sondern nur mit den durch den `maxspeed` Tag festgelegten 30 km/h durchfahren. Offensichtlich ist dies ein Fehler im Backend welcher behoben werden muss.

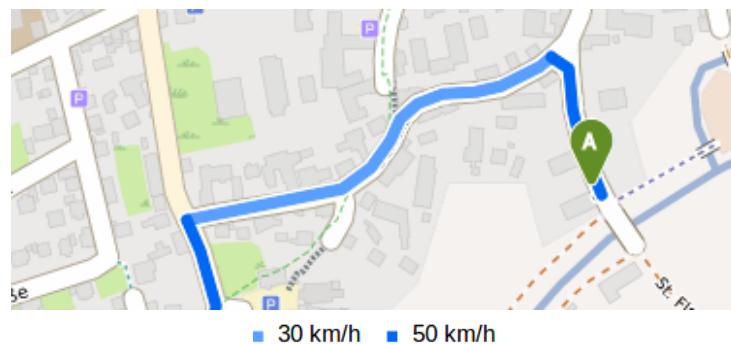


Abbildung 22: Fahrt 3 – Tempo-30-Zone

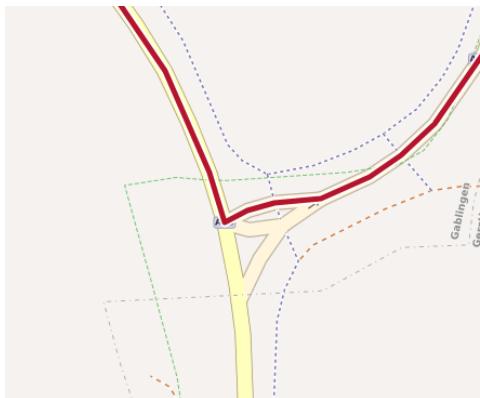
Die anfängliche 30er-Zone ist fast 350m lang. Diese Strecke kann mit 50 km/h in 25,2 Sekunden und mit 30 km/h in 42 Sekunden durchfahren werden. Wird die Differenz von 16.8 Sekunden von den bisherigen Abweichungen für die 3. Fahrt abgezogen, werden die neuen Werte aus Tabelle 10 erhalten.

Wegpunkt	Fahrzeit	Abweichung
1min	58.2s ^a	-1.8s
2min	122.6s	+2.6s
3min	173.2s	-6.8s
4min	238.4s	-1.6s
5min	296.1s	-3.9s

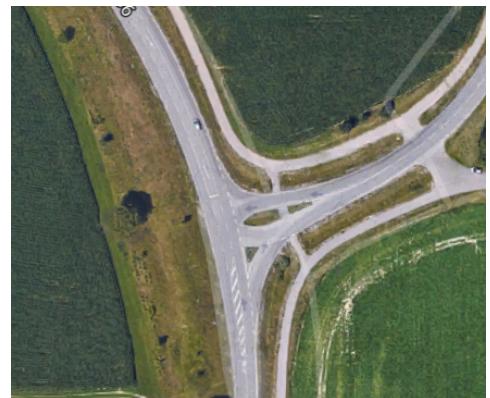
Tabelle 10: Fahrt 3 – neue Fahrzeit

^aZum ersten Wegpunkt beträgt die Strecke nur 260m weshalb hier nur 12.6 Sekunden abgezogen werden

Vor der 2-Minuten-Marke beginnt eine Überlandstraße, die bis kurz vor Holzhausen (zwischen Marker 3 und 4) reicht. Das sind 56% der Gesamtstrecke. Wie bei der Diskussion der 1. Fahrt bereits erwähnt, ist zu erwarten, dass die Maximalgeschwindigkeit von 80km/h zu hoch angesetzt ist, welches den leichten Vorsprung zur 3-Minuten-Marke erklärt.



(a) Abbiegung auf OSM-Datenebene



(b) Eigentliche Abbiegung

Abbildung 23: Fahrt 3 – Vergleich eines Abbiegevorgangs

Zwischen Punkt 3 und 4 fällt das Löschfahrzeug-Profil um fünf Sekunden zurück. Zwischen diesen Punkten befindet sich eine Abbiegung, die deutlich schneller als andere Kurven gefahren werden kann. Abbildung 23 zeigt einen Vergleich dieses Abbiegevorgangs zwischen den OSM Daten(23a) und der eigentlichen Straße(23b). Es ist zu erkennen, dass die Abbiegung um einiges "weicher" ist als die Daten beschreiben. Daher konnte das Löschfahrzeug gegenüber dem Profil hier Zeit gewinnen.

Schließlich zeigte auch diese Strecke nach einer Untersuchung des Höhenprofils einen Anstieg auf den letzten 150 Metern um 7-9% (Abb. 24), der noch nicht mit einberechnet wird, und dem Löschfahrzeug-Profil somit einen kleinen Vorsprung gibt.



Abbildung 24: Fahrt 3 – Höhenprofil

5.4 Benötigte Änderungen

Wie durch die vorliegenden Analysen zu sehen ist, müssen einige Änderungen vollzogen werden, damit das Profil realistischere Ergebnisse zurückgibt.

- 30er Zonen werden noch nicht richtig erkannt.
- Die Steigung muss berücksichtigt werden.
- Abbiegevorgänge innerhalb von Segmenten (Abb. 20), an Pillar Nodes, werden bisher nicht berücksichtigt und müssen mit einbezogen werden.
- Die Zeit für einen Abbiegevorgang sollte sowohl anhand des effektiven Winkels als auch anhand der Geschwindigkeiten des vorherigen und folgenden Wegsegmentes bestimmt werden. Ansätze hierfür wurden bereits entwickelt (siehe Source Code), wurden allerdings noch nicht getestet.
- Für die Penalties muss die Zeit, sofern vorhanden, aus der eigentlichen Beschleunigung und falls diese nicht vorhanden, zum Beispiel aus dem Gewicht des Fahrzeugs berechnet werden. Dadurch können einfacher spezifische Fahrzeugprofile erstellt und getestet werden. Da das `AccelerationWeighting` sowohl für das Löschfahrzeug als auch für allgemeine Einsatzfahrzeuge benutzt wird, erhalten diese bisher die gleichen Penalties.

-
- Weiterhin muss für Einbahnstraßen, die in Gegenrichtung durchfahren werden, ein Penalty (ca. *0.9) gesetzt werden, da diese oft nicht mit der selben Geschwindigkeit durchfahren werden können, wie in der eigentlichen Fahrtrichtung (auch wenn es erlaubt ist). Auf diese Weise kann außerdem ein Routing auf der Gegenfahrbahn, lediglich für den Gewinn von wenigen Sekunden, verhindert werden. Darüber hinaus werden damit bevorzugt vorhandene Parallelstraßen benutzt.

6 Fazit & Future Work

Das erstellte Profil für Löschfahrzeuge wird als Prototyp betrachtet und kann bereits die grundlegenden Anforderungen des FFL erfüllen. Es werden bei der Suche nach dem kürzesten Weg in einem Straßennetz die für andere Fahrzeuge geltenden Geschwindigkeitslimits auf geeigneter Werte angehoben.

Es ist für das Profil möglich Einbahnstraßen in beide Richtungen zu befahren. Dadurch kann die Distanz zum Ziel signifikant reduziert werden. Das führt aber auch dazu, dass häufig über längere Strecken auf der Gegenfahrbahn gefahren wird und Abbiegespuren des Gegenverkehrs wegen wenigen gewonnenen Metern verwendet werden. Infolgedessen sollte ein Penalty-Faktor eingebaut werden, der bei einer Nutzung entgegen der Fahrtrichtung eine Verzögerung mit einberechnet.

Darüber hinaus werden bisher nicht befahrbare Straßentypen wie Fußgängerzonen und Radwege für das Profil verfügbar gemacht. Eine Routenführung bis zum Zielpunkt wird so gegenüber den normalen Fahrzeug Profilen in den meisten Fällen erreicht.

Derzeit wird die Schwerfälligkeit des Löschfahrzeugs durch positive Faktorisierung¹¹ der Gewichtung für Start, Ankunft und Abbiegevorgängen bei der Suche nach dem schnellsten Weg berücksichtigt. Anhaltspunkte hierfür wurden mit Hilfe der FFL bestimmt. Für die durchgeföhrten Teststrecken wurde beim Routing von Start bis Endpunkt jeweils die richtige Route zurückgegeben. Ob diese Faktorisierung allgemein gültig ist, muss durch weitere Analysen überprüft werden. Für die Berechnung der Zeit werden zur Berücksichtigung der Schwerfälligkeit Penalties für Start, Ankunft und Abbiegevorgänge verwendet. Hierbei wird ein Abbiegevorgang durch den Winkel zwischen zwei Straßensegmenten an einer Kreuzung ermittelt. Bisher erhält jeder Abbiegevorgang den gleichen Penalty obwohl manche Kurven schneller befahren werden können. Kurven innerhalb eines zusammenhängenden Segmentes werden bisher noch nicht betrachtet, die für realistischere Ergebnisse ebenfalls als Abbiegevorgang registriert werden sollten.

Darüber hinaus muss der Öffnungswinkel einer Kurve mit in die Berechnung der zusätzlichen Zeit einfließen, da Abbiegungen mit größerem Winkel ebenfalls schneller befahren werden können. Gleichzeitig muss auch die Geschwindigkeit des vorherigen und folgenden Straßensegments beachtet werden, da diese die Brems- bzw. Beschleunigungsstrecke

¹¹Die Gewichtung wird mit Werten größer 1.0 multipliziert

alterieren. Die Steigung eines Straßensegments hat einen signifikanten Einfluss auf die benötigte Zeit und muss daher ebenfalls einkalkuliert werden. Es werden für die Implementierung dieser Funktionen noch weitere Analysen zu speziellen Testfahrten für das jeweilige Szenario (Steigung, Abbiegevorgang) benötigt.

Die Fahrzeugdimensionen und die Höchstgeschwindigkeit sind nicht im Backend fest codiert sondern können als Parameter bei der Abfrage mitgeliefert werden. Damit ist eine Erweiterung für andere Fahrzeugklassen der Feuerwehr als auch des Rettungsdienstes oder der Polizei möglich, da für alle die selbe Grundprämisse gilt (1.1).

Im Hinblick auf OSM-Daten kann keine endgültige Sicherheit gewährleistet werden, da die Ergebnisse höchstens so gut wie die Daten sein können.

Für die Erstellung von Einzugsgebieten für das Profil für Einsatzfahrzeug muss letztlich die Gewichtung für den Isochrones- Service verfügbar gemacht werden und wird als nächsten Schritt implementiert.

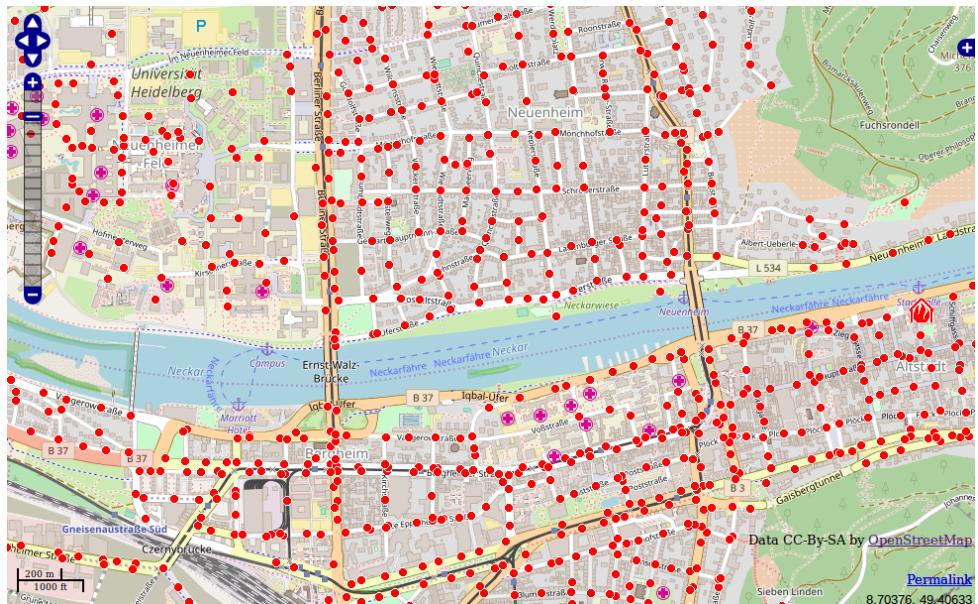


Abbildung 25: Hydranten Informationen in Heidelberg

Das Analysieren der Teststrecken ist durch das einzelne Senden der Anfragen und das anschließende Extrahieren der benötigten Werte zeitaufwändig. Es wäre demnach hilfreich ein Service zum gleichzeitigen senden von allen Test Anfragen zu entwickeln mit welchem danach ebenso die Antworten adäquat dargestellt werden können. Dabei sollten zum Beispiel die Distanzen zwischen wichtigen Änderungspunkten auf einer Route berechnet werden können und tabellarisch aufgelistet werden.

Ein weiterer interessanter Aspekt den es zu beleuchten gilt, ist das unterschiedliche Verkehrsaufkommen auf einer Straße oder Fußgängerzone. So könnten Geschwindigkeiten für bestimmte Wegsegmente je nach Zeit anhand von Berufsverkehr oder Tageszeit angepasst werden. Nachts sollten beispielsweise generell weniger Autos auf der Straße sein, wodurch Zeit gespart wird, umgekehrt zum Berufsverkehr.

Die im Fragebogen erwähnte Suche nach Löschwasser Quellen am Zielort kann und sollte verwirklicht werden. In der OSM-Datengrundlage existieren bereits diverse Tags für Objekte, die von Einsatzkräften genutzt werden können. Für die Feuerwehr besonders interessant ist zum Beispiel der `emergency=fire_hydrant` Tag für Hydranten. In vielen Städten sind diese durch das OpenFireMap-Projekt¹² flächendeckend digitalisiert und der OSM-Datenbank zur Verfügung gestellt worden (Abb. 25).

¹²<https://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:OpenFireMap>

Literatur

- [Aig15] Martin Aigner. *Graphentheorie*. 2015.
- [Akk+95] Nataraj Akkiraju u. a. „Alpha shapes: definition and software“. In: *Proceedings of the 1st International Computational Geometry Software Workshop*. Bd. 63. 1995, S. 66.
- [Con14] OpenStreetMap Contributers. *OSM Wiki*. 2014. URL: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/>.
- [Con15] OpenStreetMap Contributers. *DE:Relationen*. 2015. URL: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Relationen>.
- [Dij59] Edsger W. Dijkstra. „A note on two problems in connexion with graphs“. In: *Numerische Mathematik 1*. 1959.
- [Kar16] Peter Karich. *Low Level API*. 2016. URL: <https://github.com/graphhopper/graphhopper/blob/master/docs/core/low-level-api.md>.
- [Kur08] Peter Sanders Kurt Mehlhorn. *Algorithms and Data Structures*. 2008.
- [Nei+08] Pascal Neis u. a. „Webbasierte Erreichbarkeitsanalyse – Vorschläge zur Definition eines Accessibility Analysis Service (AAS) auf Basis des OpenLS Route Service“. In: *Aktuelle Arbeiten auf dem Gebiet der Informations- und Messtechnik*. 2008.
- [Nei06] Pascal Neis. „Routenplaner für einen Emergency Route Service auf Basis der OpenLS(TM) Spezifikation“. Diss. Fachhochschule Mainz, 2006.
- [Reh+12] Karl Rehrl u. a. „Evaluierung von Verkehrsgraphen für die Berechnung von länderübergreifenden Erreichbarkeitspotenzialen am Beispiel von OpenStreetMap“. In: *Angewandte Geoinformatik 2012*. 2012.
- [Ste15] Jochen Stein. *Qualitätskriterien für die Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten*. 2015. URL: <http://www.agbf.de/pdf/Fortschreibung%20der%20Empfehlung%20der%20Qualitätskriterien%20für%20die%20Bedarfsplanung%20in%20Städten%20Layout%20neu%202016.pdf>.
- [Sve12] Harmut Noltemeier Sven Oliver Krumke. *Graphentheoretische Konzepte und Algorithmen*. 2012.

-
- [Wol12] David M. Danko Wolfgang Kresse, Hrsg. *Handbook of Geographic Information*.
2012.

8 Anhang

Copyrights

Die Rechte für die mit geojson.io generierten Abbildungen(10, 11, 12, 13, 14) gehen an ©Mapbox für den Kartenstil und ©OSM für die Daten.

Die Rechte der mit dem ORS entworfenen Abbildungen(15, 16, 17, 18, 19a, 20, 22, 23a) gehen an ©OSM contributors für die Daten und ©Maxim Rylov für den Kartenstil. Für Abbildung 23b liegt das Copyright bei ©2017 Google für die Bilder und ©2017 GeoBasis-DE/BKG für die Kartendaten. Für Abbildung 21 liegt das Copyright bei ©DigitalGlobe.

Links

Fragenkatalog: https://docs.google.com/document/d/1nwjmea0jwauJWezk_2TMQs5CbAHv7he2NI4kxqMu2w4/

Emergency Routing Service:

<http://emergency.openrouteservice.org/directions?n1=48.448646&n2=10.826855&n3=14&b=0&c=0&k1=en-US&k2=km>

Testfahrt 1:

GeoJson-Antwort:

[https://disaster-api.openrouteservice.org/emergency/routes?api_key=58d904a497c67e00015b45fcfd837ca3e137425f653e26a676ecd396&attributes=detourfactor|percentage&coordinates=10.824569,48.454111|10.789776,48.466555&elevation=true&extra_info=steepness|waytype|surface|avgspeed&geometry=true&geometry_format=geojson&instructions=true&instructions_format=html&language=en-US&options={"profile_params":{"restrictions":{"width":"2.5","height":"3","weight":"7.5","length":"7"}},"maximum_speed":"80"}&preference=fastest&profile=driving-emergency&units=m](https://disaster-api.openrouteservice.org/emergency/routes?api_key=58d904a497c67e00015b45fcfd837ca3e137425f653e26a676ecd396&attributes=detourfactor|percentage&coordinates=10.824569,48.454111|10.789776,48.466555&elevation=true&extra_info=steepness|waytype|surface|avgspeed&geometry=true&geometry_format=geojson&instructions=true&instructions_format=html&language=en-US&options={)

Anzeige im ORS Client:

```
http://emergency.openrouteservice.org/directions?n1=48.454186&n2=10.825616&n3=18&a=48.454111,10.824569,48.466555,10.789776&b=5b&c=0&f3=3&f1=7.5&f2=2.5&f5=7&d=80&k1=en-US&k2=km
```

Testfahrt 2:

GeoJson-Antwort:

```
https://disaster-api.openrouteservice.org/emergency/routes?api_key=58d904a497c67e00015b45fc837ca3e137425f653e26a676ecd396&attributes=detourfactor|percentage&coordinates=10.824569,48.454111|10.85755,48.457434&elevation=true&extra_info=steepness|waytype|surface|avgspeed&geometry=true&geometry_format=json&instructions=true&instructions_format=html&language=en-US&options={"profile_params":{"restrictions":{"width":"2.5","height":"3","weight":"7.5","length":"7"}}, "maximum_speed":80}&preference=fastest&profile=driving-emergency&units=m
```

Anzeige im ORS Client:

```
http://emergency.openrouteservice.org/directions?n1=48.454236&n2=10.826409&n3=18&a=48.454111,10.824569,48.457434,10.85755&b=5b&c=0&d=80&f3=3&f1=7.5&f2=2.5&f5=7&k1=en-US&k2=km
```

Testfahrt 3:

GeoJson-Antwort:

```
https://disaster-api.openrouteservice.org/emergency/routes?api_key=58d904a497c67e00015b45fc837ca3e137425f653e26a676ecd396&attributes=detourfactor|percentage&coordinates=10.824569,48.454111|10.805097,48.443849&elevation=true&extra_info=steepness|waytype|surface|avgspeed&geometry=true&geometry_format=json&instructions=true&instructions_format=html&language=en-US&options={"profile_params":{"restrictions":{"width":"2.5","height":"3","weight":"7.5","length":"7"}}, "maximum_speed":80}&preference=fastest&profile=driving-emergency&units=m
```

Anzeige im ORS Client:

<http://emergency.openrouteservice.org/directions?n1=48.44654&n2=10.826383&n3=15&a=48.454111,10.824569,48.443849,10.805097&b=5b&c=0&d=80&f3=3&f1=7.5&f2=2.5&f5=7&k1=en-US&k2=km>

Sourcecode

Komplettes Backend:

<https://github.com/TheGreatRefrigerator/openrouteservice/tree/emergencyrouting>

Erstellte Java-Klassen

https://github.com/TheGreatRefrigerator/ba_thesis/tree/master/data/JavaFiles

Frontend:

<https://github.com/GIScience/openrouteservice-app/tree/emergencyrouting>

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig zu Prüfungszwecken vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt, sowie wörtlich und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Amandus Bubel

Heidelberg den 20. Oktober 2017

(Unterschrift)

Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die dazu beigetragen haben diese Arbeit zu verwirklichen.

Ein großes Dankeschön geht natürlich an die Freiwillige Feuerwehr Lützelburg für die Bereitstellung des Fahrzeuges. Insbesondere möchte ich Stefan Witossek für die detaillierten Informationen sowie die Organisation und Durchführung aller Testfahrten danken. Ohne ihn wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Danke an meine Kollegen vom Openrouteservice Team Timothy Ellersiek, Maximilian Rylov und Lu Liu, die mir mit motivierenden Gesprächen und hilfreichen Erklärungen zur Seite gestanden sind und mich in jeder Hinsicht unterstützt haben.

Bei meinem Betreuer Prof. Dr. Alexander Zipf möchte ich mich für das Prüfen der Arbeit und der Möglichkeit bedanken beim Openrouteservice zu arbeiten.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr. João Porto de Albuquerque, der trotz eines mit internationalen Reisen gefüllten Terminkalenders Zeit für das Prüfen meiner Arbeit gefunden hat.

Außerdem möchte ich mich bei meinen Kommilitonen Angelika Kinas und Marcel Reinmuth sowie meinen Freunden Natalie Scherer und Amin Mobasher bedanken, die mich in dieser Zeit mit unterhaltsamen Mittagspausen, motivierenden Gesprächen, Tipps und dem Korrekturlesen der Arbeit besonders unterstützt haben.