

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT  
HEIDELBERG

Bachelorarbeit

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

*Amandus Stefan Butzer*

Fakultät für Chemie und Geowissenschaften  
Geographisches Institut  
Abteilung Geoinformatik

Betreut von  
Prof. Dr. Alexander Zipf

3. Oktober 2017

# Zusammenfassung

## Deutsche Kurzfassung

Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet.

## Abstract

**Abstract in English** Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet.

# 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.

Heidelberg den 3. Oktober 2017

.....  
(Unterschrift)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>6</b>
1.1 Motivation . . . . .	6
1.2 Zielsetzung . . . . .	7
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>8</b>
2.1 Graphentheorie . . . . .	8
2.1.1 Gerichtete Graphen . . . . .	9
2.1.2 Gewichtete Graphen . . . . .	9
2.1.3 Bau eines Graphen aus OpenStreetMap Daten . . . . .	11
2.2 Routing . . . . .	12
2.2.1 Shortest Path Problem . . . . .	13
2.2.2 Dijkstra-Algorithmus . . . . .	13
2.2.3 Speedup Techniken . . . . .	15
2.3 Isochronen Berechnung . . . . .	17
2.3.1 Gitterbasierter Ansatz . . . . .	17
2.3.2 Dreiecksvermaschung . . . . .	18
2.3.3 Formenbasierter Ansatz . . . . .	18
<b>3 Generierung des Routing-Profiles/Methodik?</b>	<b>19</b>
3.1 Informations Erhebung . . . . .	19
3.2 Aufbau graph backend . . . . .	21
3.3 Limitierende Faktoren . . . . .	21
3.4 Erweiternde Faktoren . . . . .	21
<b>4 Ergebnisse</b>	<b>22</b>
<b>5 Fazit</b>	<b>23</b>
<b>6 Future Work or Ausblick</b>	<b>24</b>

## Abbildungsverzeichnis

1	Ein simpler Graph $G$ . . . . .	8
2	Zwei isomorphe Graphen $G$ und $H$ . . . . .	10
3	Ein gerichteter Graph $G$ . . . . .	11
4	Ein gewichteter Graph $G$ . . . . .	11
5	Simplifizierung eines OSM Datensatzes . . . . .	12
6	Ein gewichteter und gerichteter Graph $G$ . . . . .	14
7	Kompletter Durchlauf eines Dijkstra Algorithmus . . . . .	15
8	Speedup Techniken für den Dijkstra Algorithmus . . . . .	16
9	Marching Squares Algorithmus . . . . .	17

## Abkürzungsverzeichnis

**APSP** All Pairs Shortest Path Problem 13

**FFL** Freiwilligen Feuerwehr Lützelburg 6, 7, 19

**GIS** Geoinformationssysteme 12

**ORS** Openrouteservice 6, 7, 18

**OSM** OpenStreetMap 11, 19

**SPP** Single Pair Problem 13, 15

**SSP** Single Source Problem 13–15, 17, 18

**TSP** Traveling Salesman Problem 13

# 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, wie Geocoding und Routing, auch einen Isochronen-Service an. Mit Isochronen werden Orte bestimmt, die von einem Standort aus in einer bestimmten Zeit erreicht werden können. Für Unternehmen ist so 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.

Da mit dem Isochronen-Service jene zeitlichen Erreichbarkeitsanalysen durchgeführt werden können, ist dieser für die Erstellung eines Brandschutzbedarfsplans der Feuerwehr geeignet. Jedoch kann der Dienst in seiner bisherigen Form noch nicht alle erforderlichen Anforderungen für Einsatzfahrzeuge erfüllen. Um diese Nachteile zu überwinden, wurde eine Forschungs Kooperation mit der Freiwilligen Feuerwehr Lützelburg (FFL) eingegangen.

### §35 Abs. 1 StVO:

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

Dieser kurze Absatz der Straßenverkehrs-Ordnung ermöglicht es Einsatzfahrzeugen sich unter Benutzung von Martinshorn und Blaulicht über je-

de 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 keinen, der diese Tatsache 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 MLF 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-Profils darauf geachtet, dass Erweiterungen für diverse Einsatzfahrzeuge einfach möglich sind.

Als Basis wird das Profil auf dem Backend<sup>1</sup> des bereits bestehenden Routing Service des ORS aufgebaut. Zusätzlich sollen Java Funktionen implementiert werden, die speziell auf das Emergency Profil zugeschnitten sind. Zur Darstellung wird das ORS Frontend<sup>2</sup> mit Hilfe der Java-Script Programmiersprache angepasst. Dadurch können die Ergebnisse in verständlicher und anschaulicher Weise präsentiert werden.

---

<sup>1</sup>Programm und Datenbanken die sich zur Berechnung von Routen auf einem über das Internet ansprechbaren Server befinden

<sup>2</sup>Graphische 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)

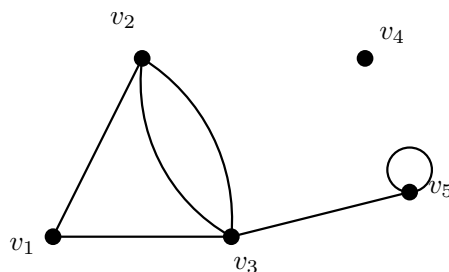
Mathematisch ausgedrückt ist ein Graph  $G$  die Funktion aus einer endlichen Eckenmenge  $V$  und einer endlichen Kantenmenge  $E$  (Aigner 2015, S. 4)

$$G = (V, E)$$

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

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

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



(a)  $G$

$$\begin{matrix} & v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

(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 bezeichnet man sie als *adjazent* (benachbart). 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 sehr gut 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 Endecken. 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 folglich halbiert werden, 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.

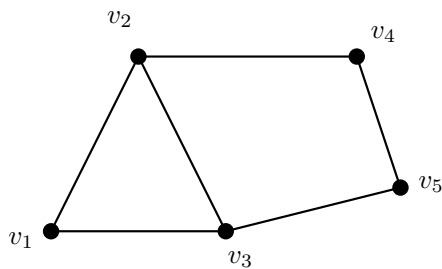
$$G = (V, R)$$

Demnach muss in Abbildung 3a um von  $v_5$  nach  $v_4$  zu gelangen der Weg über die Ecken  $v_3$  und  $v_2$  führen.

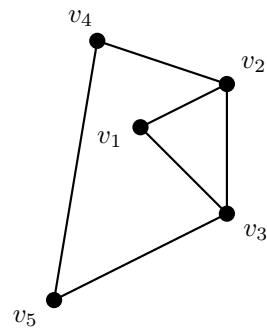
### 2.1.2 Gewichtete Graphen

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

$$G = (V, E)$$



(a) G



(b) H

$$\begin{array}{c}
 v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad v_4 \quad v_5 \\
 \begin{pmatrix}
 v_1 & \ddots & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 v_2 & & \ddots & 1 & 1 & 0 \\
 v_3 & & & \ddots & 0 & 1 \\
 v_4 & & & & \ddots & 1 \\
 v_5 & & & & & \ddots
 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

(c) Adjazenzmatrix von G und H

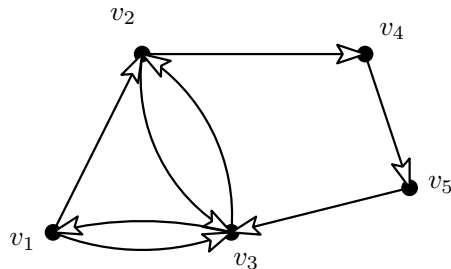
Abbildung 2: Zwei isomorphe Graphen G und H

mit

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

Neben dem Kanten-gewichteten gibt es auch Knoten-gewichtete Graphen, bei welchen entsprechend die Knoten 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 Knotenpunkte einzelne Haltestellen darstellen und die Kantengewichte die benötigten Minuten beinhalten.

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 für Routing-Zwecke eingesetzt werden, indem räumliche Positionen sowie Eigenschaften von Straßen in der Datenstruktur eines Graphen gespeichert werden.

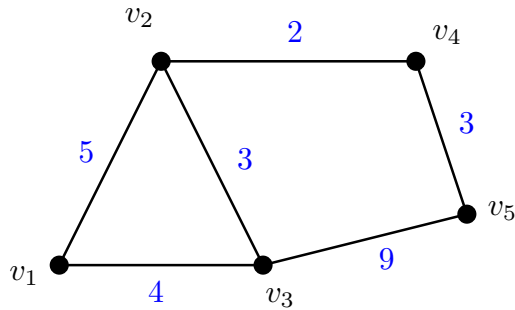


(a) G

	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$	$v_5$
$v_1$	0	1	1	0	0
$v_2$	0	0	1	1	0
$v_3$	1	1	0	0	0
$v_4$	0	0	0	0	1
$v_5$	0	0	1	0	0

(b) Adjazenzmatrix von G

Abbildung 3: Ein gerichteter Graph G



(a) G

	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$	$v_5$
$v_1$	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

Abbildung 4: Ein gewichteter Graph G

### 2.1.3 Bau eines Graphen aus OpenStreetMap Daten

Die OpenStreetMap (OSM) 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 Nodes. Zusätzlich gibt es *Relations*(Relationen) die einem Set aus Nodes und Ways einen funktionalen Zusammenhang zuschreiben. Für Straßennetze kann dies durchaus hilfreich sein um beispielsweise unterschiedliche Segmente eines Autobahnsegmentes zusammenzufassen oder um Abbiegebeschränkungen an Kreuzungen zu beschreiben (OpenStreetMap-Wiki 2015).

Um aus den OSM Daten einen routingfähigen Graphen zu erhalten, müssen zuerst alle benutzbaren Nodes und Ways extrahiert werden und werden anhand ihrer OSM-Tags identifiziert. Dazu gehören alle Arten von Straßen und Wegen sowie als befahrbar gekennzeichneten Ways (zum Beispiel asphaltiert, allerdings ohne Straßentyp). Für das Routing sind vor allem Verbindungspunkte wie Kreuzungen, Ab- und Auffahrten etc. sowie Sackgassen interessant. Daher werden diese *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 Edges an (Rehrl u. a. 2012). Die Punkte zwischen zwei Tower Nodes werden *Pillar Nodes* genannt. Sie werden als *WayGeometry* auf der jeweiligen Edge 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* auf der Edge gespeichert. Diese sind für die individuelle Gewichtung bei der Routenfindung interessant. (Mehr zu Gewichtung später in Kapitel 3.2(stimmt die reihenfolge max?). Zuletzt wird der Graph abgespeichert und ist für Routing Abfragen bereit (Rehrl u. a. 2012).

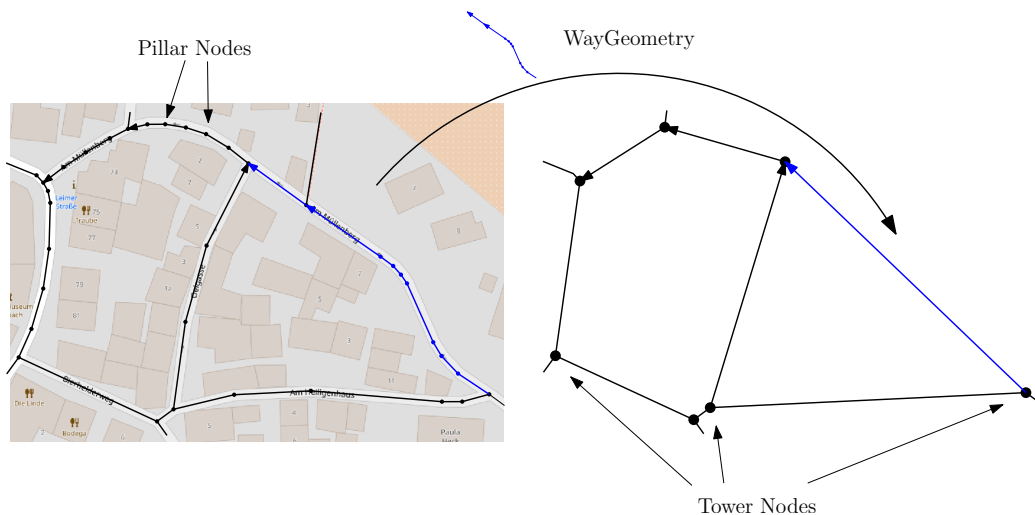


Abbildung 5: Simplifizierung eines OSM Datensatzes

## 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 (GIS) werden hauptsächlich Straßennetze für Routing-Analysen verwendet (Wolfgang Kresse 2012, S. 165). Ein Weg  $P$  (*engl.: path*) von einem Startecke  $s$  zu einer Zielecke  $z$  ist eine Folge von benachbarten Ecken mit  $s$  als erster Ecke und  $z$  als letzter Ecke der Folge (Abb). Die Weglänge entspricht in einem gewichteten Graphen der Summe aller Kantengewichte.

Eine der wichtigsten Netzwerk-Analyse-Operationen ist die Berechnung des kürzesten Weges zwischen zwei Knoten. 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 nächstliegende 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  $G = (V, E) = K_n^3$  mit der Gewichtsfunktion  $c : E \rightarrow \mathbb{R}_+$  gesucht, die jede des Graphen besucht (Sven Oliver Krumke 2012, S. 135). Das Shortest Path Problem lässt sich in drei Typen untergliedern denen jeweils ein gerichteter Graph  $G = (V, R)$  mit der Gewichtsfunktion  $c : R \rightarrow \mathbb{R}$  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 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 Kantengewichte<sup>4</sup> 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

<sup>3</sup> $K_n$  bezeichnet einen vollständigen Graphen bei dem jede Ecke aus  $V$  mit jeder anderen Ecke verbunden ist

<sup>4</sup>Das 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.)

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.

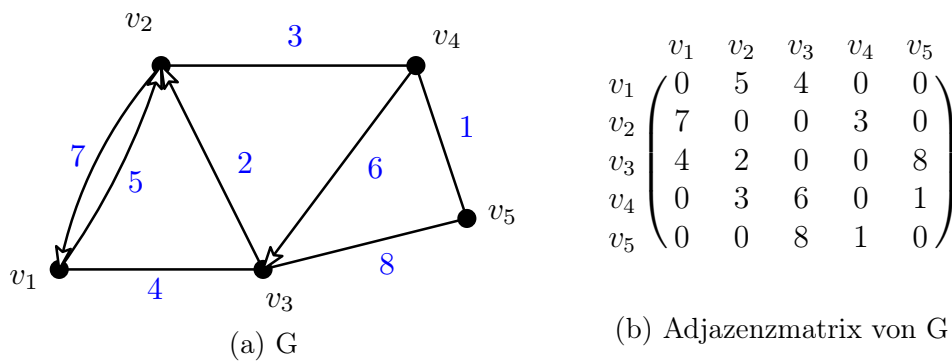
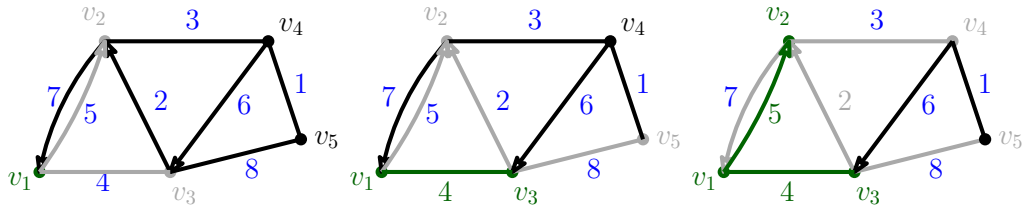


Abbildung 6: Ein gewichteter und gerichteter Graph G

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 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.

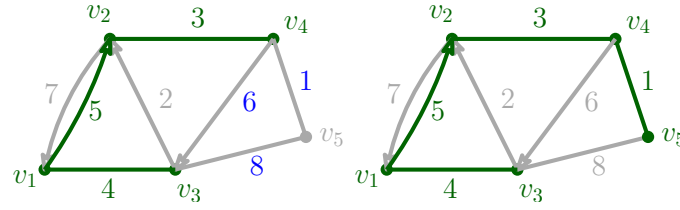
Damit wurde das SSP gelöst und einen kürzeste Wege zu jeder Ecke des



(a) 1. Iteration

(b) 2. Iteration

(c) 3. Iteration



(d) 4. Iteration

(e) 5. Iteration

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

(f)  $W_s$  und  $K_s$  für jede Iteration

Abbildung 7: Kompletter Durchlauf eines Dijkstra Algorithmus

Graphen vom Startpunkt. Daraus ergibt sich auch die Lösung aller SPP für  $s$  zu jeder anderen Ecke 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 reduzieren<sup>5</sup>.

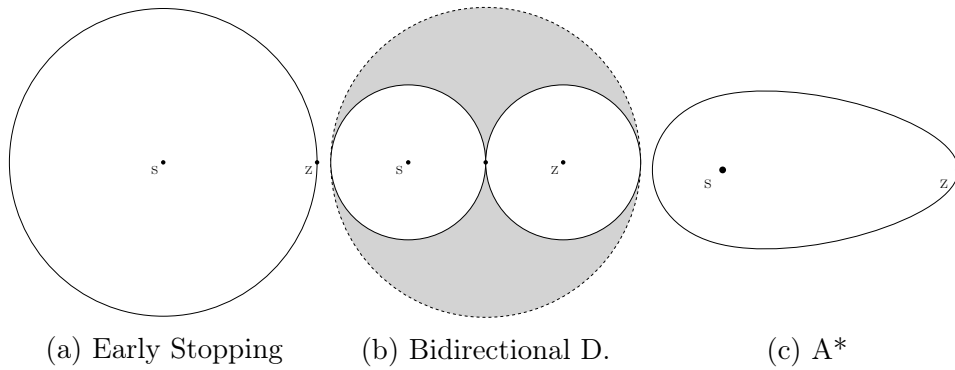


Abbildung 8: Speedup Techniken für den Dijkstra Algorithmus

**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.

<sup>5</sup>In der Realität wird dieser Wert selten erreicht. Bei Graphen mit einer höheren Ecken-  
dichte in Nähe von  $z$  könnte die Bearbeitungszeit sogar größer werden. Allgemein wird  
aber ein signifikanter Vorteil erzielt.

## 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 einem Knoten zum 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.

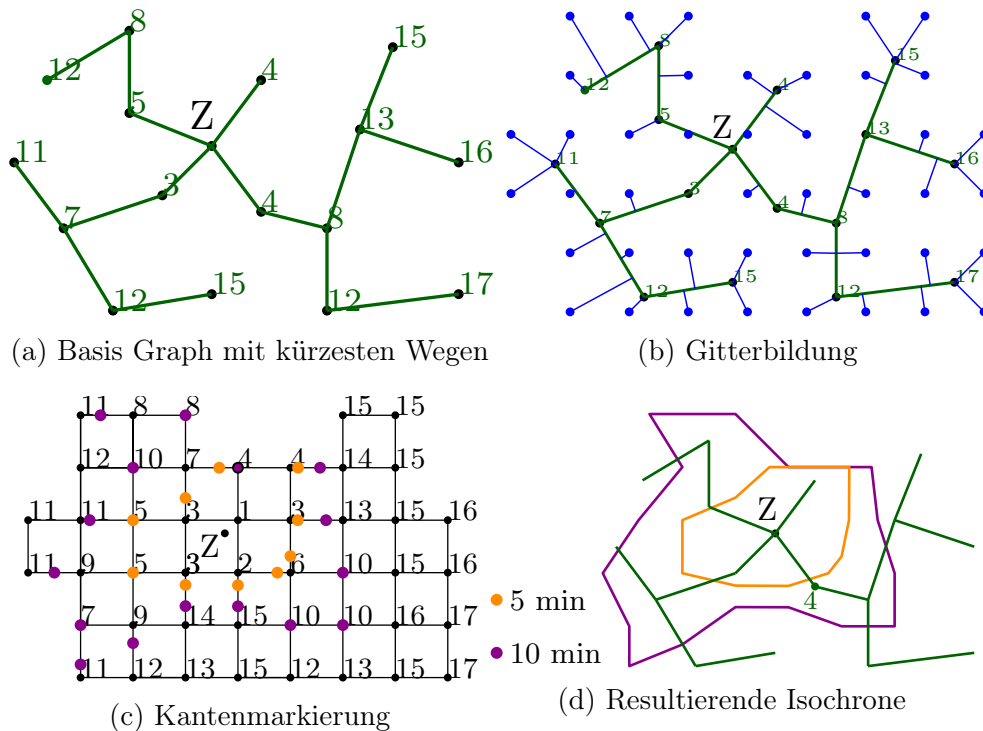


Abbildung 9: Marching Squares Algorithmus

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 gebraucht. Daher können nur kleine Gebiete und geringe Zeitlimits berechnet werden. Bei weiten Maschen ist der Algorithmus dagegen sehr schnell und kann große Distanzen und lange Zeitspannen berechnen. Das Ergebnis ist dementsprechend aber auch ungenauer. Auch in Abbildung 9d wurde die Größe der Maschen unglücklich gewählt. Eine Ecke mit Abstand 4 Minuten vom Zentrum liegt dadurch außerhalb der 5-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 die geographische Koordinate der repräsentierten Kreuzung zugeteilt. Die Kanten werden nicht benötigt und daher entfernt. Es liegt also 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. Es 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 ist einen Form-basierten 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 11). 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 diese Punktwolke wird nun der Alpha-Shape Algorithmus (Zitat) angewandt um die Isochrone als Hülle um die Erreichbaren Wegsegmente zu zeichnen. (Abb. Pictures shape based stuff) Dieser Ansatz liefert präzise Ergebnisse bei schnellen Berechnungszeiten. Die Verwendung der Alpha-Shapes verhindert allerdings die Möglichkeit der Darstellung von nicht erreichbaren 'Löchern' innerhalb der Isochronen.

## 3 Generierung des Routing-Profiles/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 ist allerdings in wie weit von diesen Rechten im Ernstfall Gebrauch gemacht werden kann. Um dieser Sache auf den Grund zu gehen, wurde ein Fragenkatalog für die FFL zusammengestellt. Dieser wurde als Datei auf Google Docs gespeichert und ist auch weiterhin verfügbar (Link im 6). Die Fragen wurden mit Hinblick auf die OSM Datenstruktur und das vorhandene ORS Backend gewählt. **Umsetzung Infos auf in OSM Daten / Konformität** Einarbeitung der Funktionen in Backend scripts. Anpassung des Clients.

### 3.1 Informations Erhebung

**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 - Achslast: k.A. **ask Stefan** Tonnen

**2. Maximale Geschwindigkeiten auf unterschiedlichen Straßentypen:** Für Für genauere Beschreibungen der Typen: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Ke>

Bisherige Angaben für HGV in km/h

// highways (Autobahnen) motorway (Autobahn) : 80 bisher 80 (Kommt natürlich auf den Verkehr und dann auf die Rettungsgasse an) (Wenn es nur als Zubringer verwendet wird geht es wenn kein Stau ist schon. Ist der Einsatzort auf der Autobahn (VU oder ähnliches) Kommt es natürlich zu einem Stau, dann langsamer. Hier wäre vielleicht ein Schalter interessant auch auf der Gegenfahrbahn anfahren zu können auf der gleichen Höhe, bzw. auch gegen die Verkehrsrichtung auf der gleichen Bahn.

motorway\_link (Autobahn-Zubringer) : bisher 50 motorroad () : bisher 80 trunk (Schnellstraße/Autobahnähnliche Straße/ Kraftfahrtstraße) : bisher 80 trunk\_link (Zubringer zu Schnellstraße) : bisher 50

// settlements primary (Bundesstraßen) : 80 bisher 60 primary\_link : bisher 50 secondary (Landes-/Staatsstraßen) : 80 bisher 60 secondary\_link :

bisher 50 tertiary (Kreisstraßen) : 80 bisher 60 tertiary\_link : bisher 50 unclassified (Nebenstraße (oft keine Mittellinie)) : bisher 60 residential (Straße an und in Wohngebieten) : 50 bisher 60 living\_street ("Spielstraße") : bisher 10 service (Erschließungsstraße) : bisher 20 road (unbekannte Straße) : bisher 20 track (Wald-/Feldweg) : bisher 15

grade1: 25 bisher 20 // paved grade2: 15 bisher 15 // now unpaved - gravel mixed with ... grade3: 15 bisher 10 // ... hard and soft materials grade4: 10 bisher 5 // ... some hard or compressed materials grade5: 5 bisher 5 // ... no hard materials. soil/sand/grass

**3. Dürfen vorgegebene Geschwindigkeiten (Bsp. 30er Zone/ Tempo-limit 70 etc) überschritten werden?** Es dürfen vorgegebene Geschwindigkeiten überschritten werden, jedoch ist immer noch auf die Unversehrtheit der anderen Verkehrsteilnehmer (vor allem Kinder) zu achten.

Maximale Geschwindigkeit in 30 Zone: 50 Maximale Geschwindigkeit in Spielstraße: 20

**4. Dürfen Gewicht und/oder Achslast für Straßen mit Vorgabe überschritten werden?** Allgemein zu Achslasten: Befestigung und Tragfähigkeit Zu- oder Durchfahrten für die Feuerwehr, Aufstellflächen und Bewegungsflächen sind so zu befestigen, 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. Straße durch Fahrzeug(e) blockiert ist?** Hier muss der Maschinist (Fahrer) abschätzen ob das sinnvoll ist. Kann er noch ausweichen/weiterfahren wenn einer entgegenkommt? Hängt natürlich von der Breite/Parksituation und Länge der Straße ab. Und natürlich wie viel Zeit er dadurch gewinnt..

**7. Zu welchen weiteren Routen bzw. Verkehrsnetz bezogenen Besonderheiten kommt es im Einsatz?** Es darf natürlich in Straßen eingefahren werden, die an sich zum Beispiel wegen einer Brücke auf nur 7,5 t beschränkt ist aber bis zur Brücke ist es keine Problem darüber zu fahren muss man dann vor Ort wissen wie viel die Brücke wirklich aushält. Die

POL, FW und Rettungsdienst dürfen auch die Bus-, Taxi- oder Tram-Spuren verwenden.

**8. Ist es wichtig auf der richtigen Straßenseite anzukommen ?** An sich nicht.

**9. Wäre eine Suche nach Hydranten, Löschwassertanks etc. am Zielort bzw. im Einzugsgebiet sinnvoll?** <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Key:emergency>

Eine Suche nach Hydranten und sonstigen Löschwasser-Quellen ( Seen, Tanks, Flüsse) ist auf jeden Fall sinnvoll. Nicht immer gibt es vor Ort was und dann muss schnell nachgefordert werden, wenn das nicht schon bei der Erst-Alarmierung gemacht worden ist.

**10. Dürfen folgende Wegtypen befahren werden? Wenn ja mit welcher Geschwindigkeit** aeroway=runway (Start/Landebahn): ja 80. . . aeroway=taxilane (Rollweg) : ja, 80. . . highway=raceway (Rennstrecke): ja, 80. . . highway=cycleway (Radweg): ja, 10 .

## 3.2 Aufbau graph backend

to allow different waytypes we have to accept them while creating the graph (kapitel bla)

weightings different weights for different profiles , apply weights to dijkstra?

for unusable edge -> weighting + unendlich (quelle ???) for emergency speed maps

first tests, feedback from firebrigade way too far.

calc weight for dijkstra calc millis for time add up

## 3.3 Limitierende Faktoren

geschwindigkeit limits hgv restrictions

## 3.4 Erweiternde Faktoren

Einbahnstraßen neue Wegtypen

## 4 Ergebnisse

Vergleiche zwischen Firetruck - Emergency Vehicle - Car - Heavy Vehicle + exemplarische reale Beispiele!

Hier ein paar räumliche Beispiele aussuchen und exemplarisch zeigen (Routing und Isochronen), welche Änderungen das Profil mit sich bringt, einerseits innerstädtisch, andererseits auch außerhalb der Stadt. Denn Änderungen als solches ist bisschen schwierig zu definieren. Die Jungs aus Lützelburg fragen, welches Gebiet mit den bereits vorhandenen Profilen wirklich schlechte Ergebnisse bringt und jetzt mit Emergency weitaus realistischere!

## 5 Fazit

Das Vorhandene Profil ist für diesen Zweck geeignet. Much more accurate than previous profile. Für Allgemeingültigkeit weitere Tests nötig. Immer in Hinblick auf OSM-Data, keine endgültige Sicherheit gewährleistet. Welches für weitere Fahrzeugklassen der Feuerwehr als auch des Rettungsdienstes oder der Polizei erweitert werden kann, da für alle die selbe Grundprämisse gilt ( 1.1).



## 6 Future Work or Ausblick

Suche nach Löschwasser quellen um den Zielpunkt ( osm tag emergency=fire\_hydrant ) Beschleunigung, bisher nur Faktor, für genauere Berechnungen exakte Beschleunigungsdaten der Jeweiligen Fahrzeugklasse benötigt. Bremsweg, Kurvengeschwindigkeit, Beschleunigungsweg. rush hour , Tag und Nacht Unterscheidung (nachts weniger los auf Straßen Fußgängerzonen ...)

## Literatur

- [Aig15] Martin Aigner. *Graphentheorie*. 2015.
- [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.
- [Ope15] OpenStreetMap-Wiki. *DE:Relationen*. 2015. URL: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Relationen>.
- [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%20Qualitaetskriterien%20fuer%20die%20Bedarfsplanung%20in%20Staedten%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.

## **Anhang**

### **Links**

Fragenkatalog

Emergency Profil

### **CodeFiles**

## Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich allen danken..

empty last page