

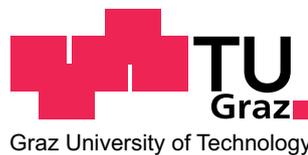
Christoph Pöllabauer

# Ansätze zur Ermittlung der energieeffizientesten Route

## MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geomatics Science



Technische Universität Graz

Betreuer:

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Wieser  
Institut für Navigation

Graz, November 2011

Deutsche Fassung:  
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008  
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

## EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....  
(Unterschrift)

Englische Fassung:

## STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....  
date

.....  
(signature)

# Kurzfassung

Zur Ermittlung einer Route in einem Straßennetz können verschiedene Optimierungskriterien herangezogen werden. Typische an Navigationssysteme für Kraftfahrzeuge gerichtete Anfragen betreffen die Ermittlung der kürzesten oder der schnellsten Route. In dieser Masterarbeit werden Ansätze zur Ermittlung der energieeffizientesten Route untersucht. Hierzu wird analysiert, welche straßen- und fahrzeugseitigen Parameter den Kraftstoffverbrauch eines PKWs beeinflussen und welche Geodaten für eine entsprechende Routing-Anwendung erforderlich sind.

Die Elemente eines Straßennetzwerks werden in einem Programm aufbereitet und entsprechend aller fahrbahn- und fahrzeugtechnischen Einflussgrößen bewertet. Es werden Kanten und Traversen, d. h. Kanten-Kanten-Relationen mit Kostenzahlen versehen. Auf Basis der so gewonnenen Knoten-Kanten-Struktur können Routen durch entsprechende Algorithmen ermittelt werden.

Als Quelle zweidimensionaler Geodaten fungiert OpenStreetMap (OSM). Es wird gezeigt, dass die Daten dieses Projekts zur Erstellung von Routing-Applikationen geeignet sind, auch wenn aufgrund teilweise fehlender Attributisierung und inkorrekt erfasster Daten eine Reihe von Korrekturen vorzunehmen ist. Für diese spezielle Anwendung müssen die OSM-Daten zudem durch ein Geländemodell, d. h. Informationen über die Höhe ergänzt werden. Die Aufbereitung und Verwendung entsprechender Daten wird in dieser Arbeit analysiert.

Zur Analyse der Vielzahl an untersuchten Parametern werden Testszenarios konzipiert, die mittels des erstellten Programms ausgeführt werden. Hierbei werden verschiedene Strecken hinsichtlich ihres Energieverbrauchs simuliert und die Ergebnisse diskutiert.

# Abstract

To determine a route within a road network various optimisation criteria are employed. Today, car navigation systems are commonly used to establish the shortest or the fastest route to a given destination. In this thesis, the author investigates approaches to determining the most energy-efficient route for a passenger car and highlights the influence of road and vehicle characteristics on a car's fuel consumption. This thesis also includes an analysis of the geospatial data needed to implement a routing application.

A specific focus lies on the development of a custom-built software designed for pre-processing the objects of a road network and also for valuating the graph based on various road and vehicle parameters. Arcs and traverses, which are topological arc-arc-relations, are provided with cost numbers. Routing algorithms can consequently be performed on this valuated graph.

OpenStreetMap (OSM) is used as a source for two-dimensional road data as the OSM data structure has proven suitable for routing applications. Nevertheless, a variety of topological corrections have to be made to compensate for imprecise attributions and insufficiencies in the data acquisition process. A digital elevation model is integrated in the application. The process of importing and using elevation data is also discussed in detail.

The software is finally tested to investigate the influence of all the parameters included. Several trajectories are simulated and the results are discussed in detail.

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonders herzlich bedanke ich mich bei Dipl.-Ing. Martin Abart (Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz bzw. AVL List GmbH) für die fachliche Beratung auf dem Gebiet der Fahrzeugtechnik.

Weiters danke ich Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger vom Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz, der mir wertvolle Hinweise zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs geben konnte.

Ich bedanke mich bei Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Kühtreiber vom Institut für Navigation der TU Graz für die Akquirierung und Aufbereitung der Höhendaten vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen.

Weiterer Dank gebührt meinem Betreuer, Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Wieser vom Institut für Navigation der TU Graz. Ich danke herzlich für die Unterstützung und die konstruktive Kritik während der Entstehungsphase dieser Arbeit.

Last but not least möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Unschätzbare Dank gebührt meinen Eltern, die mir durch ihre moralische und finanzielle Unterstützung mein Studium an der TU Graz ermöglicht haben. Zudem bedanke ich mich bei meinen Schwestern Julia und Sonja für die lektorische Beratung sowie bei meiner Freundin Andrea für die Geduld während der letzten Zeit.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>2</b>
1.1 Motivation . . . . .	2
1.2 Zielsetzung . . . . .	4
1.3 Überblick . . . . .	4
<b>2 Graphentheorie</b>	<b>6</b>
2.1 Datenmodelle . . . . .	6
2.2 Elemente von Graphen . . . . .	7
2.2.1 Knoten und Kanten . . . . .	7
2.2.2 Punkte . . . . .	7
2.2.3 Gerichtete Kanten . . . . .	8
2.2.4 Traversen . . . . .	8
2.2.5 Kantenfolgen und Eigenschaften von Graphen . . . . .	9
2.3 Graphenbewertung . . . . .	10
2.3.1 Kantenbewertung . . . . .	10
2.3.2 Traversenbewertung . . . . .	11
2.4 Verspeicherung . . . . .	12
<b>3 Routenplanung</b>	<b>14</b>
3.1 Der kürzeste Weg . . . . .	14
3.2 Ermittlung der kürzesten Wege in einem Graphen . . . . .	15
3.3 Dijkstra-Algorithmus . . . . .	16
3.3.1 Funktionsweise . . . . .	16
3.3.2 Praktisches Beispiel . . . . .	17
3.4 Traversen . . . . .	20
3.5 Cycles . . . . .	22
<b>4 Kraftfahrzeugtechnik</b>	<b>24</b>
4.1 Antriebskonzepte . . . . .	24
4.1.1 Fahrzeugmotoren . . . . .	25
4.1.2 Kennfeld von Verbrennungskraftmaschinen . . . . .	26
4.2 Fahrwiderstand . . . . .	27
4.2.1 Radwiderstand . . . . .	28
4.2.2 Luftwiderstand . . . . .	30
4.2.3 Steigungswiderstand . . . . .	31
4.2.4 Beschleunigungswiderstand . . . . .	31
4.2.5 Gesamtfahrwiderstand und Fahrwiderstandsleistung . . . . .	32

4.3	Fahrzeugdynamik . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Energieverbrauch von Kraftfahrzeugen</b>	<b>36</b>
5.1	Normverbrauch . . . . .	36
5.2	Kenngrößen . . . . .	37
5.3	Kraftstoffverbrauch . . . . .	38
5.3.1	Bedarfskennfeld und Angebotskennfeld . . . . .	38
5.3.2	Streckenverbrauch . . . . .	39
5.3.3	Schubbetrieb und Rekuperation . . . . .	40
5.3.4	Ermittlung des spezifischen Verbrauchs . . . . .	40
<b>6</b>	<b>Geodaten</b>	<b>44</b>
6.1	Anforderungen . . . . .	44
6.2	OpenStreetMap . . . . .	45
6.2.1	Allgemeines . . . . .	45
6.2.2	Lizenz . . . . .	45
6.2.3	Datenakquisition und -bereitstellung . . . . .	46
6.2.4	OSM-Datenstruktur . . . . .	48
6.2.5	OSM Map Features . . . . .	51
6.3	Höhendaten . . . . .	52
6.3.1	BEV-Datensatz . . . . .	52
6.3.2	SRTM . . . . .	53
<b>7</b>	<b>Softwareentwicklung</b>	<b>55</b>
7.1	Einlesen von OpenStreetMap-Daten . . . . .	55
7.1.1	Straßendaten . . . . .	55
7.1.2	Ortsgebiete . . . . .	58
7.2	Datenaufbereitung . . . . .	59
7.2.1	Räumliche und thematische Selektion . . . . .	59
7.2.2	Verknüpfung mit Höhendaten . . . . .	59
7.2.3	Korrektur der Topologie . . . . .	60
7.2.4	Verspeicherung . . . . .	62
7.3	Graphenbewertung . . . . .	63
7.3.1	Kantenbewertung . . . . .	64
7.3.2	Traversenbewertung . . . . .	67
7.4	Anwendungen . . . . .	69
7.4.1	Routing . . . . .	69
7.4.2	Sequentielles Routing . . . . .	70
7.4.3	Reichweitenberechnung . . . . .	71
<b>8</b>	<b>Testszenarien</b>	<b>72</b>
8.1	Ausgewählte Routen . . . . .	72
8.1.1	Route im städtischen Bereich . . . . .	72
8.1.2	Route außerorts . . . . .	74
8.2	Einfluss der Fahrgeschwindigkeit . . . . .	77
8.3	Einfluss der Traversenbewertung . . . . .	78
8.4	Einfluss unterschiedlicher Höhendaten . . . . .	79
8.4.1	Extremfall: Kurze Strecke . . . . .	79
8.4.2	Testrouten . . . . .	80

Inhaltsverzeichnis	vi
<b>9 Resümee</b>	<b>82</b>
9.1 Umgesetzte Software . . . . .	82
9.2 OpenStreetMap und Routing . . . . .	83
9.3 Ausblick . . . . .	84
<b>A Fahrzeugdaten</b>	<b>86</b>
<b>B Programmstruktur</b>	<b>87</b>
<b>C UTM-Projektion</b>	<b>93</b>
<b>D Inhalt der CD-ROM</b>	<b>95</b>
<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>96</b>
Literatur . . . . .	96
Online-Quellen . . . . .	97

# Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface
BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen
CC-BY-SA	Creative Commons Attribution-ShareAlike
DGM	Digitales Geländemodell
DGPS	Differential Global Positioning System
DOM	Digitales Oberflächenmodell
ECE	Economic Commission for Europe
ECU	Engine Control Unit
EGM	Earth Gravitational Model
EU	Europäische Union
EUDC	Extra Urban Driving Cycle
FC	Fuel Consumption
GIS	Geoinformationssystem
GML	Geography Markup Language
GPS	Global Positioning System
HBEFA	Handbook of Emission Factors for Road Transport
ITS	Intelligent Transportation System
JOSM	Java OpenStreetMap Editor
KML	Keyhole Markup Language
MBR	Minimum Bounding Rectangle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
OSM	OpenStreetMap
PHEM	Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model
PKW	Personenkraftwagen
PNG	Portable Network Graphics
POI	Point of Interest
SAR	Synthetic Aperture Radar
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
UTM	Universale Transversale Mercatorprojektion
WGS	World Geodetic System
XML	Extensible Markup Language

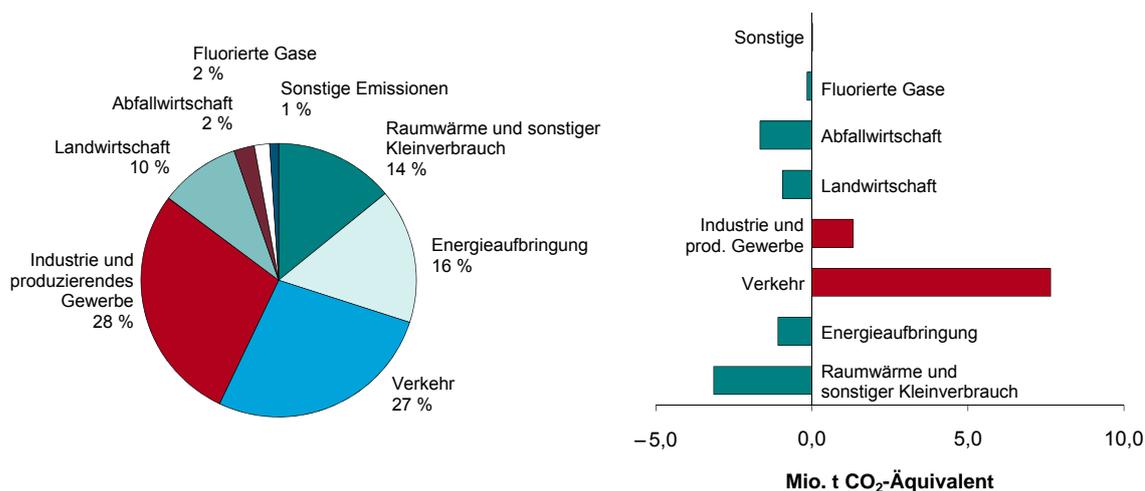
# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Motivation

Auf den Verkehrssektor fällt heute mit ca. 34% der größte Anteil der in der EU verbrauchten Energie (vgl. [19, S. 3]). Davon entfallen mehr als 95% auf fossile Energieträger, d. h. nahezu der gesamte Verkehr beruht auf der Verbrennung von Benzin, Diesel und Gas (vgl. [10, S. 328]).

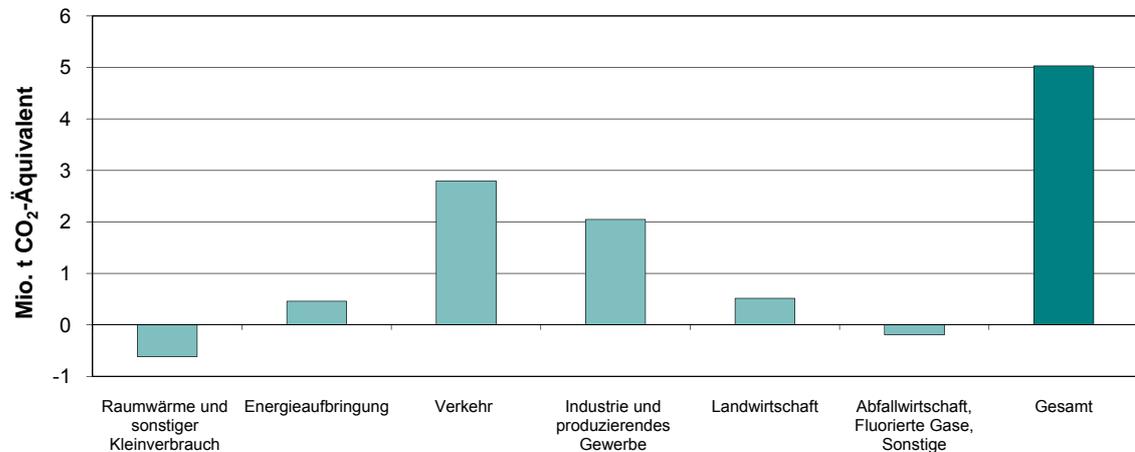
Das wachsende Bedürfnis nach Mobilität verursacht neben einem steigenden Ressourcenverbrauch einen Anstieg der Treibhausgasemissionen. Nach dem Sektor der Industrie und des produzierenden Gewerbes stellt der Verkehrssektor in Österreich mit 27,1% den zweitgrößten Emittenten von Treibhausgasen dar (vgl. [18, S. 23]). Der Verkehr erfuhr jedoch in den letzten beiden Jahrzehnten mit einem Plus von 7,6 Mio. Tonnen Kohlendioxid-Äquivalent bzw. 54,4% (bezogen auf das Jahr 1990) den stärksten Anstieg aller Sektoren. Dies ist in Abb. 1.1 dargestellt.



**Abbildung 1.1:** Anteil der Sektoren an den gesamten Treibhausgasemissionen in Österreich 2009 (l.) und Änderung der Treibhausgasemissionen zwischen 1990 und 2009 nach Sektoren (r.). Quelle: [18, S. 23].

Die Anteile des Kyoto-Ziels zur Reduktion der globalen Erderwärmung können auf die einzelnen Staaten abgebildet werden. Aufgeteilt auf Sektoren zeigt sich am Beispiel Österreich auch hier, dass die Treibhausgasemissionen des Verkehrs am stärksten vom Soll

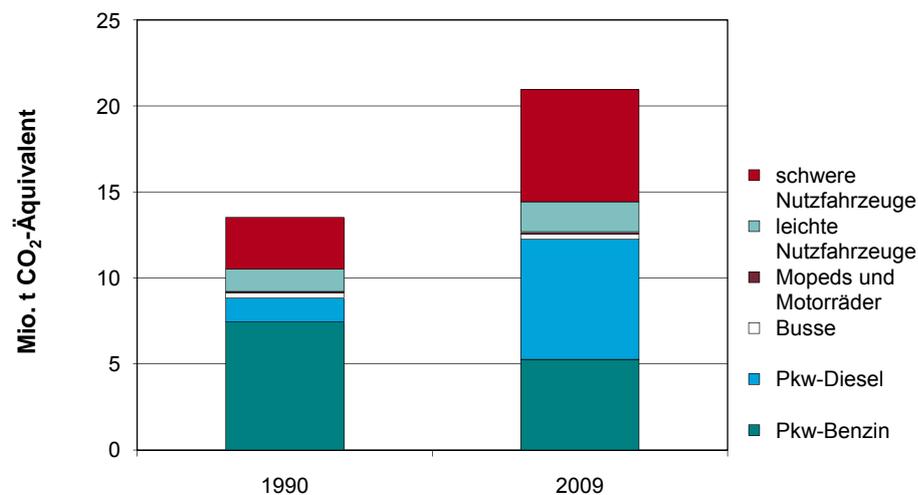
abweichen und somit maßgeblich zum Verfehlen der Kyoto-Ziele beitragen (siehe Abb. 1.2).



**Abbildung 1.2:** Sektorale Verteilung der Abweichungen 2009 vom Ziel der Klimastrategie 2007 (nach Umsetzung der flexiblen Maßnahmen). Quelle: [18, S. 25].

Aus den genannten Gründen der Ressourcenknappheit und der Emissionsproblematik ist ein Strukturwandel im Verkehrssektor notwendig. Dieser umfasst Änderungen am System (Ausbau des öffentlichen Verkehrs, CO<sub>2</sub>-Abgabe, Änderungen in Raumordnung und Siedlungsentwicklung, Wechsel der Verkehrsmittel u. a.) bzw. die Einführung neuer Technologien im Kraftfahrzeugbereich (Downsizing, Hybridisierung, Elektromobilität, Fahrerassistenzsysteme u. a.; vgl. [19, S. 4]).

Nahezu alle Studien deuten jedoch darauf hin, dass das globale Verkehrsaufkommen in der nahen Zukunft weiter stark zunehmen wird. Auch wenn konjunkturbedingt Pausen im Wachstum entstehen können, so wird das Bedürfnis nach Mobilität steigen, mit den größten Zuwachsraten im Individualverkehr (vgl. [10, S. 332]). Bereits heute werden in Österreich im Straßenverkehr knapp 60 % der Treibhausgasemissionen von PKWs verursacht (vgl. [18, S. 120]). Dies ist in Abb. 1.3 dargestellt.



**Abbildung 1.3:** Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs nach Fahrzeugkategorien, 1990 und 2009. Quelle: [18, S. 121].

Bis zum Zeitpunkt eines markanten Strukturwandels (Stichwort „*Peak Oil*“) wird der Großteil des Verkehrs weiterhin auf fossile Energieträger angewiesen sein. In der näheren Zukunft muss somit neben Ansätzen zur Reduktion des Individualverkehrs die Energieeffizienz bestehender Systeme durch neue Technologien gesteigert werden. Neben der Einführung von Hybridfahrzeugen und Elektrofahrzeugen zur Steigerung des Wirkungsgrads wird die Verbreitung von Fahrassistenzsystemen und die verstärkte Nutzung von Systemen der Verkehrstelematik (*Intelligent Transportation Systems, ITS*) als Möglichkeit gesehen, den Verkehr effizienter zu gestalten.

## 1.2 Zielsetzung

Der Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs hängt von einer Vielzahl an Parametern ab. Die Eigenschaften eines PKWs (Größe, Masse, Motorleistung usw.) definieren den Rahmenbereich des Verbrauchs. Entscheidend ist zusätzlich der Fahrzustand, d. h. die Werte von Fahrgeschwindigkeit und Beschleunigung. Bei der Bewegung von A nach B wirkt sich neben der individuellen Fahrweise somit auch die Wahl der Route auf den Kraftstoffverbrauch aus.

Nahezu alle Autohersteller haben – aus unterschiedlichen Gründen – Teile ihrer Produktpalette bereits in Richtung „Green Technology“ ausgerichtet. Neben effizienteren Motoren sollen Fahrassistenzsysteme (z. B. Tempomat, Start-Stopp-System u. a.) zur Effizienzsteigerung beitragen (siehe [40]). Auch Navigationssysteme gelten als Technologie mit dem Potenzial, den Energieverbrauch (und somit die Treibhausgasemissionen) des Verkehrssektors durch die Beeinflussung von Verkehrsströmen zu reduzieren. Namhafte Hersteller von Auto-Navigationssystemen bieten bereits heute Funktionen zur Ermittlung kraftstoffsparender Routen an (siehe [26]). Die eingesetzten Algorithmen und Methoden sind i. Allg. jedoch nicht zugänglich.

In dieser Masterarbeit soll untersucht werden, welche fahrzeug- und straßenabhängigen Größen für ein Navigationssystem bzw. einen Routing-Algorithmus notwendig sind, um Wege des geringsten Energieverbrauchs ermitteln zu können. Darauf aufbauend soll eine Software zur Planung entsprechender Routen erstellt werden. Es soll weiters analysiert werden, wie Navigationssysteme im Gesamtkontext ITS zur Effizienzsteigerung eingesetzt werden können.

## 1.3 Überblick

Im Folgenden wird ein Überblick über die Inhalte der einzelnen Abschnitte der Arbeit gegeben.

In Kap. 2 werden grundlegende Ansätze zur Modellierung von Straßennetzwerken erklärt. Die Elemente Knoten, Kante und Traverse werden als Basis eines Graphen, d. h. einer Knoten-Kanten-Struktur eingeführt. Weiters werden die Grundlagen zur Bewertung und Verspeicherung von Graphen dargestellt.

Die Methoden zur Ermittlung einer Route in einem Straßennetzwerk auf Basis eines Graphen werden in Kap. 3 dargestellt. Der Algorithmus von Dijkstra wird theoretisch und anhand eines Beispiels erklärt. Zudem wird die Verwendung von Traversen zur Modellierung von Abbiegeverboten und Cycles im Detail behandelt.

Die Kap. 4 und 5 dienen zur Darstellung der fahrzeugtechnischen Grundlagen, die später zur Bewertung eines Graphen benötigt werden. In Kap. 4 werden die Fahrwiderstände,

die bei der Bewegung eines Fahrzeugs auftreten, im Detail erklärt. Zusätzlich werden die Grundlagen zur Fahrzeugbewegung dargestellt. Kap. 5 behandelt den Kraftstoffverbrauch von PKWs. Es wird erklärt, welche Modelle zur Ermittlung des Streckenverbrauchs herangezogen werden müssen.

Geodaten bilden die Grundlage für einen Straßengraphen. In Kap. 6 wird das Projekt OpenStreetMap als Grundlage zweidimensionaler Straßendaten vorgestellt. Die Struktur des Datenmodells wird im Detail erklärt. Zudem werden Datenquellen für die Höheninformation beschrieben.

In Kap. 7 wird die praktische Umsetzung der Arbeit erklärt. Die Akquisition der Geodaten sowie die zugehörigen Korrekturen werden im Detail beschrieben. Außerdem wird erklärt, wie die Bewertung von Kanten und Traversen als Grundlage für verschiedene Anwendungen umgesetzt wird.

In Kap. 8 erfolgt eine Demonstration des umgesetzten Programms. Einige Testszenarien werden hinsichtlich des Einflusses der fahrzeug- und straßenseitigen Parameter analysiert.

In Kap. 9 werden die Ergebnisse der Arbeit diskutiert. Weiters wird ein Ausblick auf potenzielle Entwicklungen gegeben.

# Kapitel 2

## Graphentheorie

### 2.1 Datenmodelle

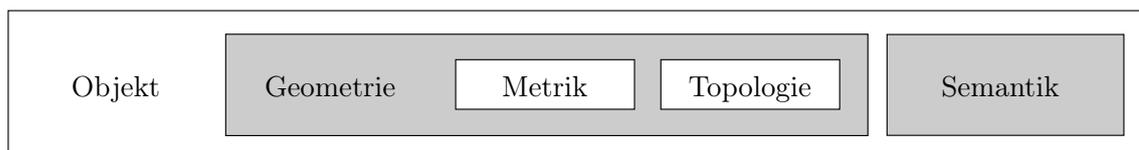
Die Grundlage für Anwendungen der Navigation bilden Geodaten in Form digitaler Karten. Zur Abbildung der realen Welt sind in Geoinformationssystemen (*GIS*) zwei Modellierungsansätze vorherrschend: *Raster-* und *Vektormodelle*.

Rastermodelle basieren auf dem *feldbasierten Ansatz*. Hierbei wird ein Interessensbereich in Teilflächen mit homogener Thematik aufgeteilt (vgl. [2, S. 64]). Dies sind in den meisten Fällen quadratische Rasterzellen, wie sie etwa zur Modellierung eines digitalen Geländemodells (*DGM*) verwendet werden. Dieses Konzept wird in Kap. 6 genauer betrachtet.

Vektormodelle verfolgen den *objektorientierten Ansatz*. Die Grundelemente bilden hierbei Punkte und Linien. Diese werden als *Knoten* und *Kanten* bzw. in Kombination als *Graph* bezeichnet. Zur Modellierung von Straßennetzen für Routinganwendungen werden in den meisten Fällen Vektormodelle in Form von Knoten-Kanten-Strukturen verwendet. Deren Aufbau und Eigenschaften werden in diesem Kapitel betrachtet.

Bei der Modellierung in Geoinformationssystemen wird zwischen *Geometrie* und *Semantik* unterschieden (siehe Abb. 2.1).

Die Geometrie umfasst die *Metrik* und die *Topologie* von Objekten. Die Metrik beschreibt Position, Form und Größe von Objekten, wie sie durch zwei- oder dreidimensionale Koordinaten definiert werden. Die topologischen Eigenschaften eines Objekts beschreiben die Relationen zu anderen Objekten (Nachbarschaften, Überschneidungen, usw.). Die semantischen Eigenschaften beschreiben Objekte abseits ihrer Geometrie und werden als *Attribute* bezeichnet. Für eine Straße etwa sind die Straßenklasse, die Straßenbreite oder der Fahrbahnzustand als Attribute denkbar.



**Abbildung 2.1:** Definition von Geometrie und Semantik in der Geoinformatik.

## 2.2 Elemente von Graphen

### 2.2.1 Knoten und Kanten

Ein Graph  $G = G(V, E)$  wird durch einen Satz  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  von  $n$  Knoten (engl. *Vertices*) und einen Satz  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{m_e}\}$  von  $m_e$  Kanten (engl. *Edges*) definiert (vgl. [8, S. 85]).

Eine Kante  $e_{ij}$  wird durch zwei Knoten  $v_i$  und  $v_j$  festgelegt. Jeder der beiden Knoten ist somit *inzident* mit der Kante. Sind zwei Knoten  $v_i$  und  $v_j$  über eine Kante  $e_{ij}$  verbunden, sind die Knoten *adjazent*, d. h. benachbart.

Zwei Kanten  $e_{ij}$  und  $e_{jk}$  sind adjazent, wenn sie sich in einem Knoten  $v_j$  berühren (siehe Abb. 2.2). Die Anzahl der Nachbarn eines Knotens wird durch den *Grad*, auch *Valenz* genannt, definiert.

Die Knoten eines Graphen repräsentieren im Rahmen dieser Arbeit i. Allg. Straßenkreuzungen. Folglich sind zumindest drei Kanten inzident mit einem Knoten (vgl. [8, S. 85]). Die Kanten entsprechen den Straßenabschnitten zwischen den Kreuzungen.

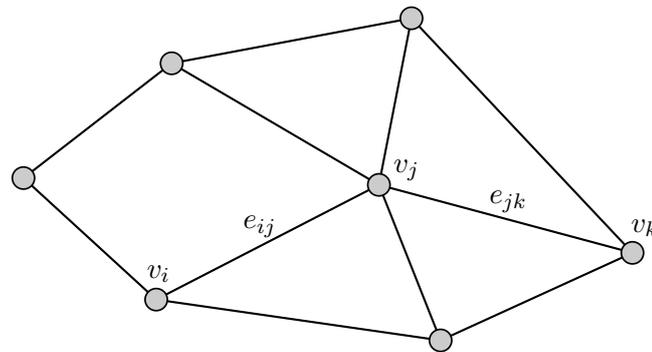


Abbildung 2.2: Eine einfache Knoten-Kanten-Struktur.

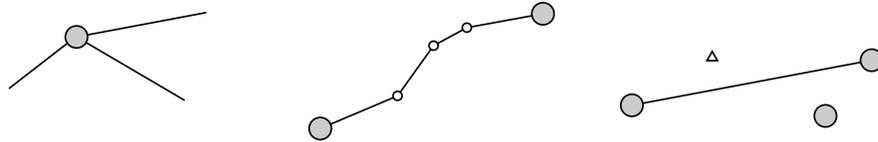
### 2.2.2 Punkte

In einem Graphen steht in erster Linie die Topologie im Vordergrund: Knoten sind Punkte, die als topologische Elemente angesehen werden. Zwischen zwei Knoten wird durch eine Kante eine topologische Beziehung hergestellt. Die metrischen Eigenschaften sind in einer Knoten-Kanten-Struktur zunächst zweitrangig (vgl. [2, S. 75]).

Punkte werden i.d.R. durch Koordinaten im zwei- oder dreidimensionalen Raum definiert, wodurch ein Graph mit einer Lageinformation versehen wird. Die Kanten können folglich als geradlinige Verbindungen zwischen Knoten angesehen werden. Unter dem Aspekt der Topologie ist es jedoch irrelevant, wie die Kanten geometrisch ausgeprägt sind. Alle beliebig geformten Verbindungen zwischen zwei Knoten sind *topologisch äquivalent* (vgl. [2, S. 74]). In der Praxis – etwa bei der Visualisierung eines Straßennetzes – sollen die Kanten eines Graphen oft entsprechend den tatsächlichen geometrischen Gegebenheiten dargestellt, d. h. mit einer Metrik versehen werden. Die Form einer Kante lässt sich mithilfe von *Polygonpunkten* modellieren (siehe Abb. 2.3).

Bei anderen Untersuchungen, die auf Knoten-Kanten-Strukturen basieren, spielt die Metrik nur eine untergeordnete Rolle. Die Polygonpunkte können oft vernachlässigt werden bzw. kann die metrische Information in Form von Attributen im Graphen gespeichert werden.

Punkte, welche die übrigen Elemente des Graphens nicht berühren, werden als *isolierte Punkte* bezeichnet. Sie können etwa zur Modellierung von *Points of Interest* (POIs) dienen (vgl. [8, S. 85]). Entsprechend werden Knoten mit dem Grad 0 als *isolierte Knoten* bezeichnet.



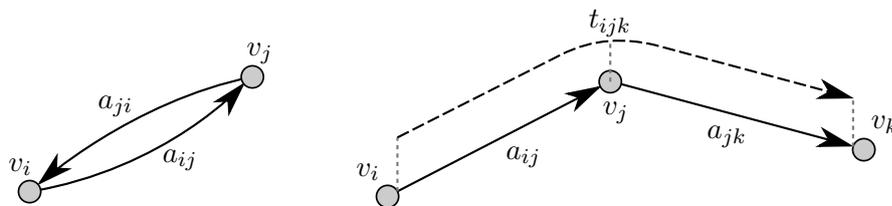
**Abbildung 2.3:** Knoten, Polygonpunkte, isolierte Punkte und isolierte Knoten. Abb. modifiziert nach [8, S. 85]

### 2.2.3 Gerichtete Kanten

Eine gerichtete Kante  $a_{ij}$  (engl. *Arc*) stellt die Verbindung zwischen zwei Knoten  $v_i$  und  $v_j$  unter Beachtung einer Reihenfolge dar, d. h.  $v_i$  ist der Anfangs-,  $v_j$  der Endknoten von  $a_{ij}$ . Zwei gegensätzlich zueinander orientierte gerichtete Kanten entsprechen einer ungerichteten Kante (siehe Abb. 2.4).

Ein Graph, dessen Verbindungen zwischen jeweils zwei Knoten ausschließlich aus gerichteten Kanten bestehen, wird als *Digraph* (engl. *Directed Graph*) bezeichnet. Ein Digraph  $G = G(V, A)$  wird neben einem Satz  $V$  von  $n$  Knoten aus einem Satz  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{m_a}\}$  von  $m_a$  gerichteten Kanten gebildet (vgl. [8, S. 87]).

Neben ihrer Funktion als topologisches Element können gerichtete Kanten auch thematische Informationen implizieren (z. B. Festlegung einer Einbahnstraße).



**Abbildung 2.4:** Gerichtete Kanten (l.) und Traverse (r.) in einem Digraphen.

Routingfähige Straßennetze werden meist als Digraphen modelliert. Daher – und aus Gründen der Einfachheit – werden die gerichteten Kanten eines Digraphen in weiterer Folge ebenfalls als „Kanten“ bezeichnet. Dort, wo dies aus dem Zusammenhang nicht erkennbar ist, wird explizit auf die Unterscheidung zwischen ungerichteten und gerichteten Kanten hingewiesen. Selbiges gilt für die Unterscheidung zwischen „Graph“ und „Digraph“.

### 2.2.4 Traversen

Eine Traverse  $t_{ijk}$  beschreibt die Verbindung von einem Knoten  $v_i$  über einen Knoten  $v_j$  zu einem Knoten  $v_k$  (vgl. [8, S. 85]). Dies ist in Abb. 2.4 dargestellt. Da eine Traverse zwei adjazente Kanten  $a_{ij}$  und  $a_{jk}$  in Verbindung setzt, stellt eine Traverse als topologisches Element eine Kanten-Kanten-Beziehung dar.

Traversen eignen sich in Verkehrsnetzen zur Modellierung von Abbiegeverböten und ermöglichen die Lösung komplexer Routingprobleme wie z. B. die Behandlung von *Cycles* (siehe Kap. 3).

### 2.2.5 Kantenfolgen und Eigenschaften von Graphen

Nach [8, S. 86–87] sind die folgenden Eigenschaften von Graphen essentiell für Routinganwendungen.

#### Kantensequenz

Eine *Kantensequenz* zwischen den Knoten  $v_s$  und  $v_t$  ist eine endliche Folge adjazenter Kanten, welche auf dem Weg von  $v_s$  nach  $v_t$  durchschritten werden, wobei Kanten auch mehrfach in der Sequenz enthalten sein können. Dies gilt für ungerichtete und gerichtete Kanten (vgl. [8, S. 85]).

#### Kette und Weg

Eine *Kette* beschreibt eine Kantensequenz, wobei jede Kante der Folge genau einmal durchschritten wird. Werden zusätzlich alle Knoten einer Kette genau einmal passiert, spricht man von einer *einfachen Kette*.

Ein *Weg* beschreibt eine Kantensequenz in einem Digraphen, wobei jede gerichtete Kante der Folge genau einmal durchschritten wird. Man spricht von einem *einfachen Weg*, wenn alle Knoten des Weges genau einmal passiert werden (vgl. [8, S. 86]). Dies ist in Abb. 2.5 dargestellt.

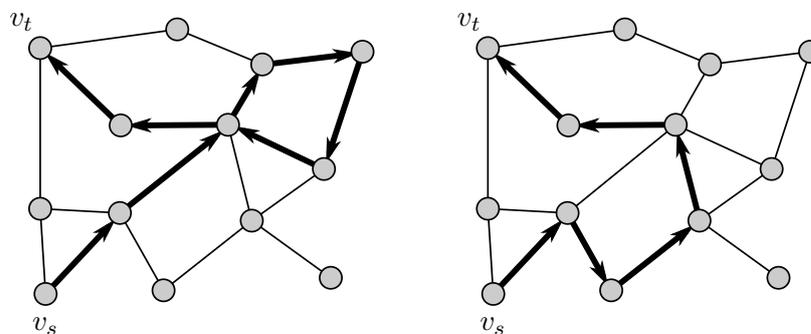


Abbildung 2.5: Ein Graph mit einem Weg (l.) bzw. einem einfachen Weg (r.).

#### Kreis und Zyklus

Eine geschlossene Kette wird als *Kreis* bezeichnet. In einem Kreis stimmen Anfangs- und Endknoten überein ( $v_s = v_t$ ). Wenn alle Knoten eines Kreises mit Ausnahme von  $v_s = v_t$  genau einmal vorkommen, wird der Kreis als *einfacher Kreis* bezeichnet (vgl. [8, S. 86]).

Ein geschlossener Weg wird als *Zyklus* bezeichnet. In einem *einfachen Zyklus* kommen alle Knoten des Weges mit Ausnahme von  $v_s = v_t$  genau einmal vor (siehe Abb. 2.6).

Ein *zyklischer* Graph ist ein Digraph, in dem zumindest ein Zyklus auftritt.

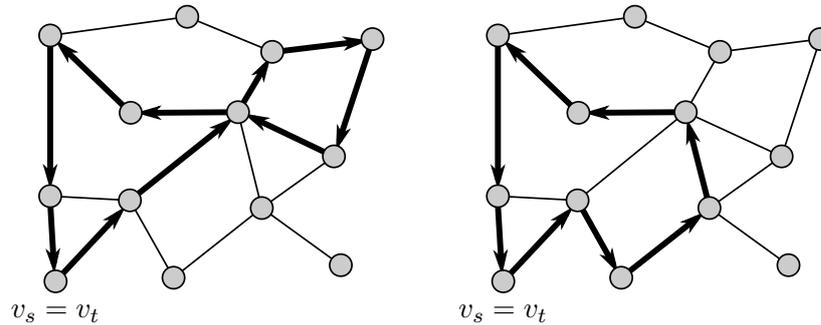


Abbildung 2.6: Ein Graph mit einem Zyklus (l.) bzw. einem einfachen Zyklus (r.).

### Zusammenhängender Graph

Ein Graph ist *zusammenhängend*, wenn es zwischen jedem beliebigen Knotenpaar zumindest eine Kette gibt (siehe Abb. 2.7). Ein Digraph wird als *stark zusammenhängend* bezeichnet, wenn für jedes Knotenpaar  $\{v_s, v_t\}$  ein Weg von  $v_s$  nach  $v_t$  und ein Weg von  $v_t$  nach  $v_s$  existiert (vgl. [8, S. 86]).

### Baum

„Ist ein Graph zusammenhängend und hat er keine Zyklen, so nennen wir ihn einen *Baum* [2, S. 119]“. In einem Baum existiert zwischen einem definierten Anfangsknoten  $v_s$  und einem beliebigen anderen Knoten somit genau ein Weg. Sind alle Knoten eines Graphen in einem Baum enthalten, so wird der Baum als *aufspannender Baum* bezeichnet. Dies ist nur in einem zusammenhängenden Graphen möglich (siehe Abb. 2.7).

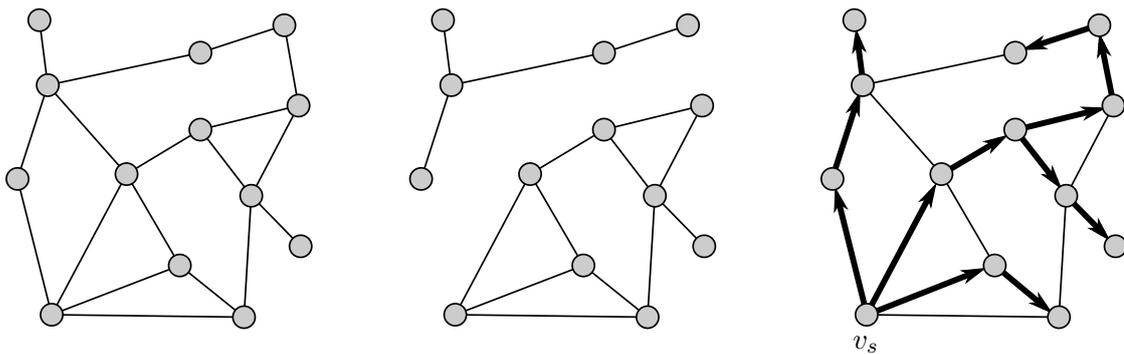


Abbildung 2.7: Zusammenhängender (l.) bzw. nicht zusammenhängender Graph (m.) und aufspannender Baum (r.).

## 2.3 Graphenbewertung

### 2.3.1 Kantenbewertung

In einem bewerteten Graphen  $G = G(V, A, c)$  existiert eine *Kostenfunktion*  $c(a_{ij})$ , die jeder Kante  $a_{ij}$  vom Knoten  $v_i$  zum Knoten  $v_j$  eine reelle *Kostenzahl*  $c_{ij}$  zuordnet. „Die

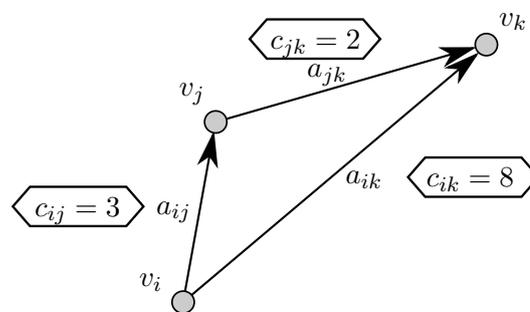
Kostenzahl  $c_{ij}$  bewertet eine Kante im negativen Sinn, d. h. je größer die Zahl ist, desto schwieriger ist es, die Kante  $a_{ij}$  zu durchschreiten [8, S. 88].

Die Kostenzahl kann auf vielfältige Weise gebildet werden. Im einfachsten Fall entspricht sie der geometrischen Länge einer Kante. Alternativ können etwa die Fahrzeit, der Höhenunterschied einer Kante oder der Energieaufwand für das Durchschreiten einer Kante als Kostenzahlen herangezogen werden. Für die Kostenzahlen sind auch abstrakte Einheiten denkbar, etwa durch Multiplikation der geometrischen Länge mit der Straßenklasse.

Wird für die Bewertung einer Kante  $a_{ij}$  eine andere Größe als die euklidische Distanz zwischen  $v_i$  und  $v_j$  verwendet, so trifft

$$c_{ij} + c_{jk} > c_{ik} \quad (2.1)$$

nicht mehr zwangsläufig zu, d. h. die Kosten von  $v_i$  nach  $v_j$  zuzüglich der Kosten von  $v_j$  nach  $v_k$  sind nicht größer als die (direkten) Kosten von  $v_i$  nach  $v_k$  (vgl. [8, S. 88]). Dies ist in Abb. 2.8 dargestellt.



**Abbildung 2.8:** Beispiel für Kostenzahlen in einem Digraphen. Auf dem Weg von  $v_i$  über  $v_j$  nach  $v_k$  fallen Kosten von 5 an, die direkten Kosten über die Kante  $a_{ik}$  betragen hingegen 8.

### 2.3.2 Traversenbewertung

Analog zu Kanten können auch Traversen bewertet werden. Dies geschieht über eine Kostenfunktion  $b_{t_{ijk}}$ , die einer Traverse  $t_{ijk}$  eine Kostenzahl  $b_{ijk}$  zuordnet. Die Zahl  $b_{ijk}$  definiert die Kosten, die beim Durchschreiten der Knotenfolge  $v_i - v_j - v_k$  entstehen. In einem Straßengraphen kann so der Aufwand für Abbiegevorgänge entsprechend den Verkehrsregeln modelliert werden. Hier sei die Kostenzahl  $b_{ijk} = \infty$  erwähnt, durch die ein Abbiegeverbot definiert werden kann (vgl. [8, S. 88]). Dies wird in Kap. 3 im Detail beschrieben.

Die Bewertung eines Graphen stellt eine wichtige Grundlage für Routinganwendungen dar. Diese verfolgen das Ziel, zwischen einem Anfangsknoten  $v_s$  und einem Endknoten  $v_t$  den Weg mit den niedrigsten Kosten zu ermitteln. Die Kosten  $c_{st}$  vom Knoten  $v_s$  zum Knoten  $v_t$  werden durch Summation der Kosten aller durchlaufenen Kanten  $c_{ij}$  ermittelt:

$$c_{st} = \sum_{\text{Weg}} c_{ij} \quad (2.2)$$

Werden bewertete Traversen in die Ermittlung der Kosten eines Weges miteinbezogen, wird Gl. 2.2 zu

$$c_{st} = \bar{b}_{ijk} \sum_{\text{Weg}} c_{ij} \quad (2.3)$$

erweitert. Die mittleren Kosten aller Traversen entlang des Weges werden hierbei mit  $\bar{b}_{ijk}$  bezeichnet (vgl. [8, S. 88]).

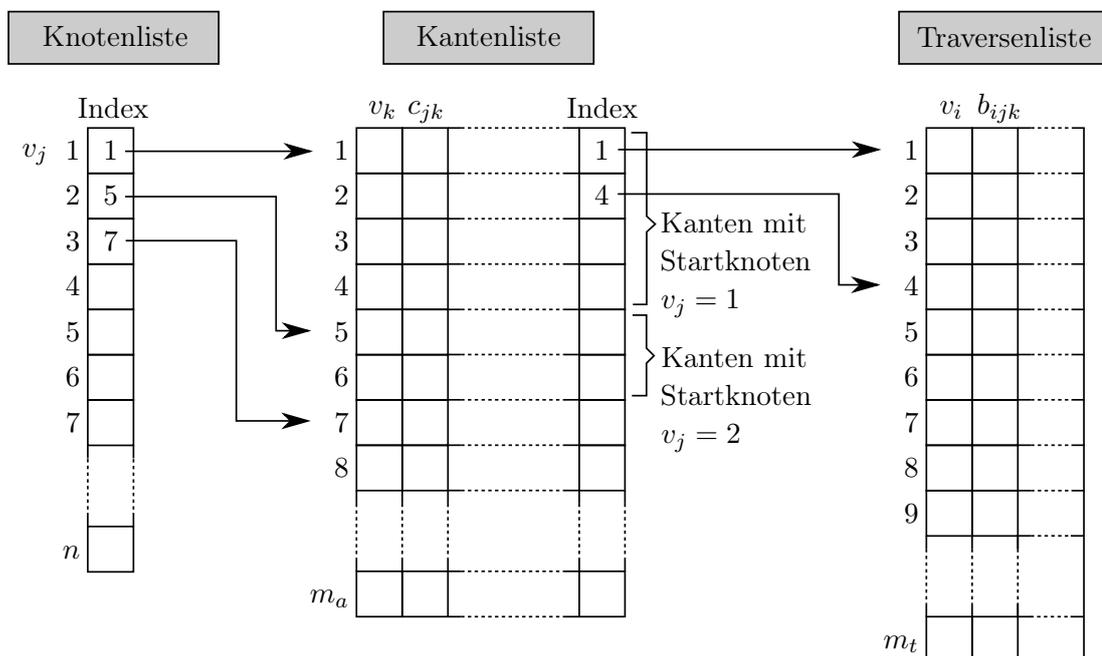
Sind die Eigenschaften eines Graphen (z. B. die Kostenzahlen von Kanten und Traversen) zeitlich konstant, so spricht man von einem *statischen Graphen*. Im Gegensatz dazu ist ein Graph *dynamisch*, falls sich die Eigenschaften zeitlich ändern. Dies trifft auf ein Straßennetz zu, wenn sich die Kostenzahlen einzelner Kanten in Folge von Überlastung, Unfällen usw. vergrößern (vgl. [8, S. 89]).

## 2.4 Verspeicherung

Neben der topologischen und geometrischen Modellierung eines Graphen spielt die Art der Verspeicherung eine große Rolle. Große Graphen sollen möglichst ökonomisch, d. h. platzsparend gespeichert werden und gleichzeitig schnelle Zugriffszeiten ermöglichen.

Straßennetze werden oft in Form von *Adjazenzlisten* gespeichert. Im einfachsten Fall werden Adjazenzlisten durch eine Tabelle realisiert, in der jede Zeile die Charakteristika einer gerichteten Kante enthält. Dies sind die adjazenten Knoten  $v_i$  und  $v_j$  sowie ein Kantenattribut wie z. B. die Kostenzahl  $c_{ij}$ . Somit lässt sich die Information in drei Listen, jeweils bestehend aus  $m_a$  Komponenten, verspeichern (vgl. [8, S. 90]). Der Speicherbedarf besteht somit aus  $3 \cdot m_a$  Elementen.

Hinsichtlich der Verwendung von Graphen als Basis für Routinganwendungen stellt die Methode der *verketteten Adjazenzlisten* eine optimale Lösung dar. Das Prinzip der Verspeicherung in verketteten Adjazenzlisten ist in Abb. 2.9 dargestellt.



**Abbildung 2.9:** Schema der Verspeicherung eines Graphen mittels verketteter Adjazenzlisten. Neben der Verspeicherung von Knoten und Kanten lässt sich der Ansatz auch auf Traversen erweitern (r.)

In einer Liste mit  $n$  Komponenten wird für jeden Knoten des Graphen ein *Pointer* gespeichert. Der Pointer eines Knotens  $v_j$  zeigt in einer Liste aller im Graphen enthaltenen Kanten auf den Datensatz, der die erste Kante mit dem Anfangsknoten  $v_j$  repräsentiert. Ein

Datensatz der Kantenliste kann neben dem Endknoten  $v_k$  einer Kante ein oder mehrere Attribute (z. B. eine Kostenzahl  $c_{jk}$ ) beinhalten. Alle Kanten mit dem Anfangsknoten  $v_j$  bilden in der Kantenliste eine Gruppe, d. h. sie sind hintereinander gespeichert. Der Speicherbedarf bei der Verwendung verketteter Adjazenzlisten reduziert sich im einfachsten Fall auf  $n + 2 \cdot m_a$  Elemente (vgl. [8, S. 90]).

Beinhaltet ein Graph auch Traversen, so kann das Schema leicht um eine Liste aller Traversen erweitert werden. Die Indizierung einer Gruppe von Traversen erfolgt ähnlich wie die bei einer Gruppe von Kanten: Neben dem Endknoten und den Attributen einer Kante  $a_{jk}$  wird in der Kantenliste ein Pointer gespeichert, der auf die erste Traverse  $t_{ijk}$  einer Gruppe von Traversen zeigt. Für jede Traverse wird der Vorgänger  $v_i$  des Knotens  $v_j$  sowie fakultativ ein oder mehrere Attribute  $b_{ijk}$  gespeichert (vgl. [8, S. 90]).

In der Praxis wird das Schema in Abb. 2.9 um zusätzliche Listen erweitert, welche die Träger der geometrischen Information darstellen. So ist eine Tabelle der Dimension  $n \times 2$  denkbar, welche die Koordinaten sämtlicher Knoten beinhaltet. Weiters kann eine Tabelle zur Speicherung der Polygonpunkte der Kanten über Indizes mit Einträgen der Kantenliste verknüpft werden, so wie dies für die Traversenliste dargestellt ist. Die praktische Umsetzung des Modells der verketteten Adjazenzlisten wird in Kap. 7 im Detail beschrieben.

# Kapitel 3

## Routenplanung

Die Routenplanung (engl. *Route Planning* oder *Routing*) als Teilbereich der Fahrzeugnavigation dient zur Planung einer Fahrstrecke vor oder während einer Reise (vgl. [22, S. 105]). Ziel ist es, zwischen zwei Orten A und B eine Verbindung zu finden, die nach einem oder mehreren Kriterien bestimmt wird. Das Ergebnis der Routenplanung wird folglich als *Route* bezeichnet.

Auf dem Gebiet der Routenplanung kann zwischen Routinganwendungen für mehrere Fahrzeuge (engl. *Multi-vehicle Route Planning*) und Routinganwendungen für ein einzelnes Fahrzeug (engl. *Single-vehicle Route Planning*) unterschieden werden. Im ersten Fall sollen für alle Fahrzeuge eines Straßennetzes individuelle Routen abhängig von den jeweiligen Start- und Zielpunkten ermittelt werden. Im zweiten Fall gilt es, für ein einzelnes Fahrzeug eine Route zu planen, die durch die Fahrzeugposition und ein gegebenes Ziel festgelegt wird (vgl. [22, S. 105]). Die Routenplanung in dieser Arbeit wird vor dem zweiten Kontext, d. h. für ein einzelnes Fahrzeug betrieben.

### 3.1 Der kürzeste Weg

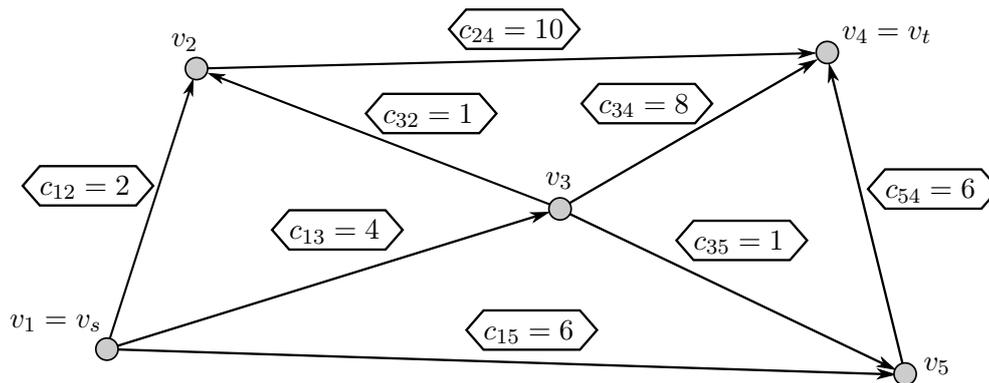
Straßennetze sind häufig in Form von Digraphen modelliert. Eine Route vom Anfangsknoten  $v_s$  zum Endknoten  $v_t$  entspricht graphentheoretisch somit einem Weg, d. h. einer Abfolge adjazenter Kanten.

Um auf Basis eines Graphen Routing betreiben zu können, muss die Knoten-Kanten-Struktur bewertet sein, d. h. jede Kante  $a_{ij}$  muss mit einer Kostenzahl  $c_{ij}$  versehen sein. Die Kosten eines Weges von  $v_s$  nach  $v_t$  ergeben sich aus der Summe der Kosten aller Kanten des Weges (siehe Gl. 2.2 auf S. 11). In Abb. 3.1 sind die Kostenzahlen eines Graphen dargestellt, wodurch die Kosten des Weges zwischen zwei beliebigen Knoten abgeleitet werden können.

Der Weg mit den niedrigsten Kosten wird als *kürzester Weg* bezeichnet. Entsprechend wird die Aufgabe, diesen Weg zwischen zwei Knoten zu finden, als *Problem des kürzesten Weges* (engl. *Shortest-Path Problem*) bezeichnet (vgl. [8, S. 303]). Mathematisch lässt sich dies durch das Kriterium

$$d_{st} = \sum_{\text{Weg}} c_{ij} \stackrel{!}{=} \min \quad (3.1)$$

ausdrücken, wobei  $d_{st}$  als *Distanz* des Weges bezeichnet wird. Entgegen der Bezeichnung „kürzester Weg“ wird die Kostenzahl einer Kante nicht zwangsläufig durch ihre geometrische Länge definiert (siehe Abschn. 2.3).



**Abbildung 3.1:** Bewerteter Digraph. Wird  $v_1$  als Startknoten  $v_s$  und  $v_4$  als Zielknoten  $v_t$  definiert, so existieren mehrere Wege von  $v_s$  nach  $v_t$ . Die Kosten eines Weges ergeben sich durch Summation der Kostenzahlen der durchschrittenen Kanten. Der Weg mit den niedrigsten Kosten – und somit der kürzeste Weg – verläuft über die Kanten  $a_{13}$ ,  $a_{35}$ , und  $a_{54}$ .

## 3.2 Ermittlung der kürzesten Wege in einem Graphen

Nach [3, S. 492] können an einen bewerteten Graphen folgende Anforderungen gestellt werden:

1. Von einem gegebenen Startknoten  $v_s$  sollen die kürzesten Wege zu allen anderen Knoten  $v_j$  des Graphen ermittelt werden (engl. *Single-Source Shortest-Path Problem*). Auf diesem Ansatz basieren weitere Anwendungen:
  - Von jedem Knoten  $v_j$  des Graphen soll der kürzeste Weg zu einem gegebenen Zielknoten  $v_t$  gefunden werden (engl. *Single-Destination Shortest-Path Problem*). Durch Umkehrung der Kantenrichtung kann dieses Problem in Aufgabe 1 übergeführt werden.
  - Von einem gegebenen Startknoten  $v_s$  soll der kürzeste Weg zu einem gegebenen Zielknoten  $v_t$  ermittelt werden (engl. *Single-Pair Shortest-Path-Problem*). Für den Fall, dass Aufgabe 1 mit dem Startknoten  $v_s$  berechnet wird, ergibt sich eine implizite Lösung dieses Problems.

Als Erweiterung kann die Aufgabe gesehen werden, zwischen zwei Knoten den kürzesten Weg zu finden, der weitere Knoten in einer genau definierten Reihenfolge beinhaltet. Dies wird als *sequentielle Ausführung* des Problems der kürzesten Wege bezeichnet und stellt einen häufigen Anwendungsfall in der Routenplanung dar (vgl. [8, S. 301]).

  - Die kürzesten Wege zwischen allen Knotenpaaren sollen ermittelt werden. Obwohl dies in den Bereich von Aufgabe 2 fällt, lässt sich diese Problemstellung auf Basis der 1. Aufgabe lösen.
2. Es sollen die kürzesten Wege zwischen allen Knotenpaaren  $\{v_s, v_t\}$  des Graphen ermittelt werden (engl. *All-Pairs Shortest-Path Problem*). Diese Anwendung eignet sich etwa dazu, Distanzmatrizen eines Graphen zu erstellen.

Im Zuge dieser Arbeit wird der Fokus auf die Umsetzung der 1. Aufgabe gelegt: Ziel ist es, ausgehend von einem Startknoten  $v_s$  zu jedem anderen Knoten des Graphen den kürzesten Weg zu ermitteln.

Zur Lösung dieser Problemstellung existiert eine Vielzahl von Algorithmen. Im Bereich der Single-Source-Shortest-Path-Anwendungen zählt der Algorithmus von *Dijkstra* neben dem Algorithmus von *Bellman-Ford* zu den am häufigsten verwendeten Algorithmen. Der Dijkstra-Algorithmus wird im folgenden Abschnitt im Detail erklärt. Für All-Pairs-Shortest-Path-Anwendungen seien die Algorithmen von *Floyd-Warshall* bzw. *Johnson* genannt (vgl. [3, S. 529]).

### 3.3 Dijkstra-Algorithmus

Der Dijkstra-Algorithmus, benannt nach seinem Erfinder Edsger Wybe Dijkstra, zählt zu den *Greedy-Algorithmen*. Diese Algorithmen produzieren in jedem Einzelschritt eine lokal optimale Lösung und schließen daraus, dass die globale Lösung ebenfalls optimal ist (vgl. [22, S. 107]). In einem Graphen  $G(V, A, c)$  lassen sich durch diesen Algorithmus die kürzesten Wege von einem Startknoten  $v_s$  zu allen anderen Knoten ermitteln. Voraussetzung ist, dass die Kostenzahlen  $c_{ij}$  positiv sind (vgl. [8, S. 303]).

#### 3.3.1 Funktionsweise

Jeder Knoten  $v_j$  des Graphen wird mit einem *Label*, d. h. einer Beschriftung  $l_j$  versehen. Der Wert des Labels steht für die Distanz vom Startknoten  $v_s$  zum Knoten  $v_j$ . Dies entspricht der Summe der Kostenzahlen  $c_{ij}$  aller Kanten eines Weges von  $v_s$  nach  $v_j$ . Die Labels können entweder *temporär* oder *permanent* sein. Dementsprechend werden die Knoten der Menge  $T$  (temporär) oder der Menge  $P$  (permanent) zugeordnet (vgl. [8, S. 303]). Während der Laufzeit des Algorithmus können sich die Labels – sofern sie temporär sind – mehrfach ändern. Nach Beendigung des Algorithmus besitzt ein Label  $l_j$  jedoch den Wert  $d_{sj}$ , d. h. die Kosten des kürzesten Weges von  $v_s$  nach  $v_j$ . Der Algorithmus liefert somit optimale Lösungen vom Startknoten  $v_s$  zu allen anderen Knoten  $v_j$ .

Neben dem Label wird jedem Knoten  $v_j$  ein Vorgängerknoten  $p_j$  zugewiesen, wodurch sich nach Beendigung des Algorithmus die Kantensequenz von  $v_s$  zu jedem beliebigen Knoten des Graphen ableiten lässt.

In Alg. 3.1 ist der Algorithmus von Dijkstra in Form von Pseudocode dargestellt. Das Schema folgt den zur praktischen Anwendung modifizierten Ausführungen in [8, S. 304] und [22, S. 110].

Am Beginn des Algorithmus werden die Labels aller Knoten initialisiert. Dem Label des Startknotens  $v_s$  wird der Wert 0 zugeordnet. Die Labels aller übrigen Knoten des Graphen werden auf  $\infty$  gesetzt (Zeilen 1 - 4). Gleichzeitig wird der Startknoten als erster Knoten der Menge der Knoten mit temporären Labels  $T$  zugeordnet (Zeile 5). Die Menge aus Knoten mit permanenten Labels  $P$  ist vorerst leer (Zeile 6).

Der Rumpf des Algorithmus besteht aus einer While-Schleife, die ausgeführt wird, bis die Menge  $T$  leer ist (Zeile 7). In jedem Durchlauf der While-Schleife wird zunächst derjenige Knoten  $v_j$  aus der Menge  $T$  ausgewählt (bzw. „betreten“), dessen Label den kleinsten Wert besitzt. Dies ist der Knoten  $v_i$  (Zeile 8). In der Folge wird  $v_i$  der Menge  $P$  zugeordnet (Zeile 9). Das Label von  $v_i$  ändert sich somit im Laufe des Algorithmus nicht mehr. Dies ist auch in Zeile 10 erkennbar, in der  $v_i$  aus der Menge  $T$  entfernt wird.

Die For-Schleife des Dijkstra-Algorithmus ist für die Abarbeitung aller Nachbarknoten von  $v_i$  zuständig (Zeile 11). Jeder adjazente Knoten  $v_j$  (der über eine Kante  $a_{ij}$  vom Knoten  $v_i$  aus erreicht werden kann) wird nun entsprechend seiner Zugehörigkeit bzw. seines Labels verändert.

Ist ein Nachbarknoten  $v_j$  weder in der Menge  $T$ , noch in der Menge  $P$  enthalten (Zei-

---

**Algorithmus 3.1:** Pseudocode des Dijkstra-Algorithmus zur Ermittlung der kürzesten Wege ausgehend von einem Startknoten  $v_s$ . Quelle: [8, S. 304]

---

```

1 for j = 1 : n
2   l(j) = inf;
3 end % for
4 l(s) = 0;
5 T = {v(s)};
6 P = { };
7 while T != { }
8   v(i) = v(j) aus T mit l(j) = min;
9   P = P + v(i);
10  T = T - v(i);
11  for v(j) = N(v(i))
12    if (v(j) not in T) && (v(j) not in P)
13      l(j) = l(i) + c(ij);
14      p(j) = v(i);
15      T = T + v(j);
16    end % if
17    if (v(j) in T) && (l(i) + c(ij) < l(j))
18      l(j) = l(i) + c(ij);
19      p(j) = v(i);
20    end % if
21  end % for
22 end % while

```

---

le 12), so wird dem Label von  $v_j$  ein neuer Wert zugewiesen. Dieser Fall trifft zu, wenn ein Knoten zum ersten Mal betrachtet wird. Der Wert des Labels  $l_j$  ergibt sich aus dem Label von  $v_i$  zuzüglich der Kosten der Kante  $c_{ij}$  (Zeile 13). Dies ist plausibel, da die Distanz zwischen  $v_s$  und  $v_j$  größer als die Distanz zwischen  $v_s$  und  $v_i$  ist. Der Knoten  $v_i$  wird zudem als Vorgängerknoten von  $v_j$  festgelegt (Zeile 14). Da der Knoten  $v_j$  nun erstmals betrachtet wurde, wird  $v_j$  der Menge  $T$  zugeordnet (Zeile 15).

Im Anschluss wird überprüft, ob der Nachbarknoten von  $v_i$  bereits in der Menge  $T$  enthalten ist und ob die Summe aus  $l_i$  und  $c_{ij}$  kleiner als das Label  $l_j$  ist (Zeile 17). Dieser Fall tritt ein, wenn ein Knoten über einen anderen Weg als einen bereits beschrifteten erreicht werden kann. Kann der Wert des Labels  $l_j$  verkleinert werden, so geschieht dies mit der Anweisung in Zeile 18. Dem Knoten  $v_j$  wird außerdem der Knoten  $v_i$  als neuer Vorgängerknoten zugeordnet (Zeile 19).

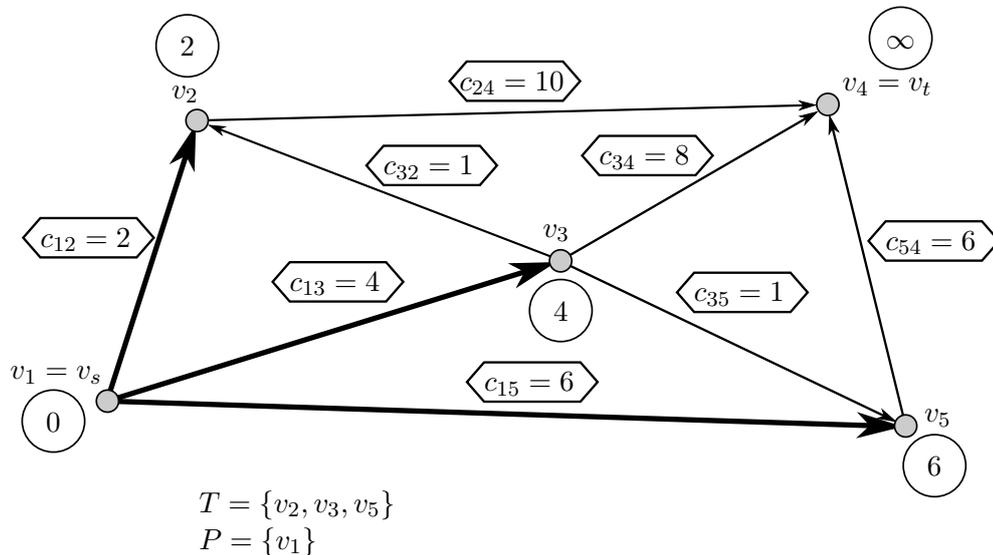
Nach Beendigung des Algorithmus ist die Menge  $T$  leer, d. h. die Labels aller Knoten sind permanent. Jeder Knoten  $v_j$  – sofern er über einen Weg vom Startknoten aus erreichbar ist – besitzt einen Vorgängerknoten  $p_j$ . Dadurch lassen sich die Wege von allen Knoten des Graphen bis zum Startknoten  $v_s$  zurückverfolgen.

### 3.3.2 Praktisches Beispiel

Die Umsetzung des Dijkstra-Algorithmus wird im Folgenden anhand des Graphen aus Abb. 3.1 dargestellt. Es sollen die kürzesten Wege vom Knoten  $v_1 = v_s$  zu allen anderen Knoten des Graphen ermittelt werden. Im ersten Schritt erfolgt die Initialisierung der Labels aller Knoten. Das Label  $l_1$  nimmt den Wert 0 an, alle übrigen Labels werden auf  $\infty$  gesetzt. Die Menge  $T$  besteht aus dem Knoten  $v_1$ , die Menge  $P$  ist leer.

Im ersten Durchlauf der While-Schleife wird  $v_1$  als einziger Knoten aus der Menge  $T$  ausgewählt und folglich von der Menge  $T$  in die Menge  $P$  verschoben. Das Label von

$v_1$  kann sich somit nicht mehr ändern. Entsprechend der For-Schleife (Zeile 11) und der ersten If-Abfrage (Zeile 12) werden die Labels aller adjazenten Knoten von  $v_1$  aktualisiert. Es betrifft dies die Knoten  $v_2$ ,  $v_3$  und  $v_5$ , denen jeweils ihr Vorgängerknoten, nämlich  $v_1$ , zugeordnet wird. Die Knoten  $v_2$ ,  $v_3$  und  $v_5$  werden zur Menge  $T$  hinzugefügt. Die Situation nach dem ersten Durchlauf der While-Schleife ist in Abb. 3.2 dargestellt.



**Abbildung 3.2:** Situation nach dem ersten Durchlauf der While-Schleife. Die Zahlen in den Kreisen geben die Labels der Knoten an, die hervorgehobenen Pfeile stellen die Vorgängerknoten dar.

Im zweiten Durchlauf der While-Schleife wird der Knoten  $v_2$  als Knoten der Menge  $T$  mit dem kleinsten Labelwert ausgewählt. Das Label des einzigen Nachbarknotens  $v_4$  wird aktualisiert und der Knoten  $v_2$  wird als Vorgängerknoten von  $v_4$  gespeichert. Zur Menge  $T$  zählen nun  $v_3$ ,  $v_4$  und  $v_5$ , die Menge  $P$  wird durch die Knoten  $v_1$  und  $v_2$  gebildet.

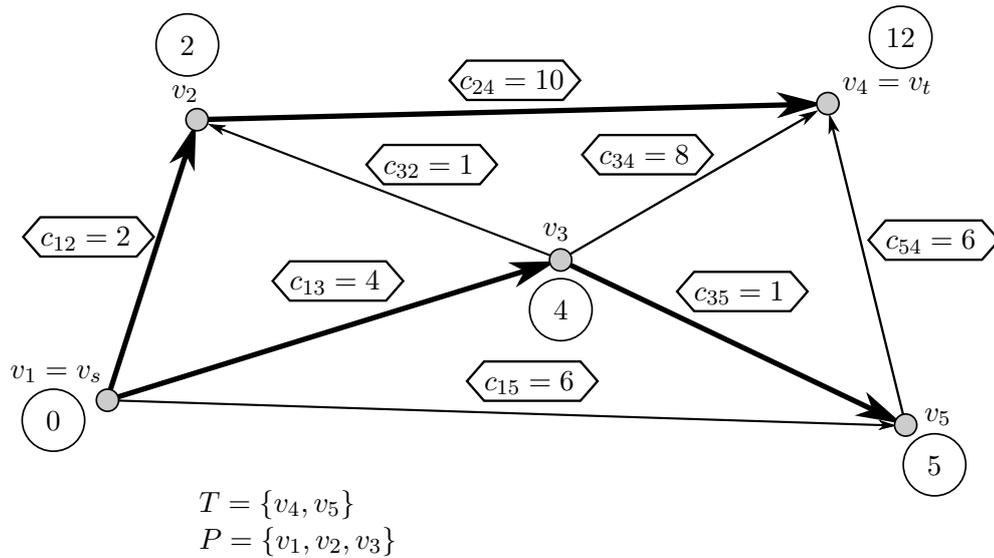
Im dritten Durchlauf der While-Schleife stellt der Knoten  $v_3$  den Knoten aus  $T$  mit dem kleinsten Labelwert dar. Folglich geht  $v_3$  in die Menge der permanenten Labels  $P$  über. In diesem Durchlauf der While-Schleife kommt für die beiden adjazenten Knoten  $v_4$  und  $v_5$  die zweite If-Abfrage (Zeile 17) zum Tragen. Das Label von Knoten  $v_5$  wird folglich von 6 auf 5 verbessert und  $v_3$  wird zum neuen Vorgängerknoten von  $v_5$  (siehe Abb. 3.3).

Im vierten Durchlauf der While-Schleife wird der Knoten  $v_5$  in die Menge  $P$  verschoben. Der einzige Nachfolger von  $v_5$  ist der Knoten  $v_4$ , dessen Label durch den Wert  $l_5 + c_{54}$  aktualisiert wird.  $v_5$  wird somit zum neuen Vorgängerknoten von  $v_4$ .

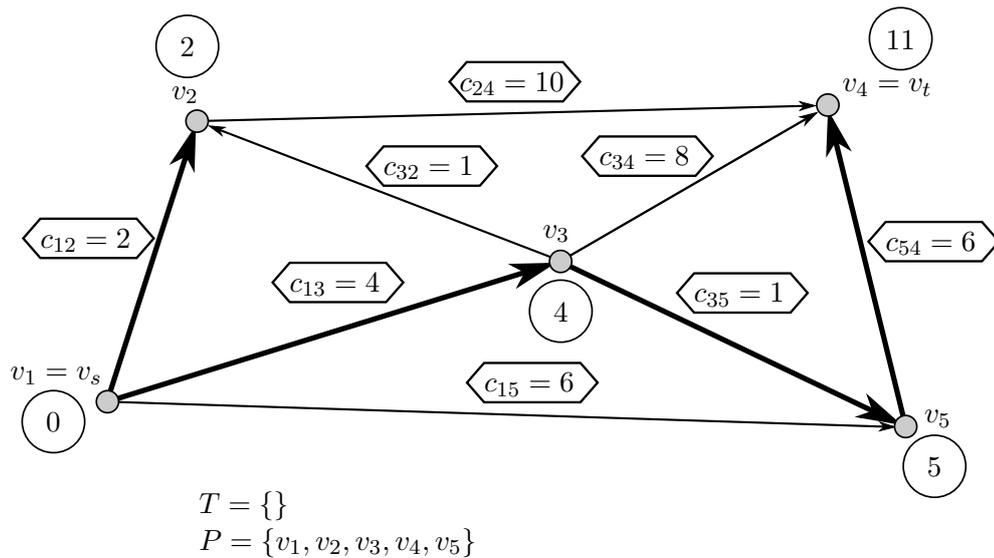
Im letzten Durchlauf der While-Schleife wird  $v_4$  als letzter verbleibender Knoten der Menge  $T$  in die Menge  $P$  verschoben. Da der Knoten  $v_4$  keine Nachbarknoten besitzt, erfolgt keine Aktion und die While-Schleife wird zu Beginn des nächsten Durchlaufs abgebrochen. Der Zustand nach Absolvierung des Dijkstra-Algorithmus ist in Abb. 3.4 dargestellt.

Die Labels der Knoten geben die Distanz zum Startknoten  $v_s$  an. Wird ein beliebiger Knoten des Graphen als Zielknoten  $v_t$  ausgewählt, lässt sich der Weg von  $v_s$  nach  $v_t$  durch Rückverfolgung der Vorgängerknoten ermitteln. Im aktuellen Beispiel verläuft der kürzeste Weg von  $v_1$  nach  $v_4$  über die Knoten  $v_3$  und  $v_5$ . Die Kosten des Weges betragen – wie leicht ersichtlich ist – 11 Einheiten.

Aus Abb. 3.4 ist ersichtlich, dass der Algorithmus von Dijkstra einen Baum, genannt *Suchbaum*, erzeugt. Können alle Knoten des Graphen vom Startknoten  $v_s$  aus erreicht



**Abbildung 3.3:** Situation nach dem dritten Durchlauf der While-Schleife.



**Abbildung 3.4:** Situation nach Beendigung des Dijkstra-Algorithmus.

werden, handelt es sich um einen aufspannenden Baum. Der Baum dehnt sich, ausgehend vom Startknoten  $v_s$ , radial aus (siehe Abb. 3.5). Algorithmen, deren Suchbäume auf diesem Weg gebildet werden, basieren auf dem Prinzip der *Breitensuche* (engl. *Breadth-first Search*). Für den Fall, dass alle Kanten die selben Kosten aufweisen, nimmt der Suchbaum die Form eines Kreises an. Algorithmen, deren Suchbäume sich in eine bestimmte Richtung stärker ausbreiten, verfolgen das Prinzip der *Tiefensuche* (engl. *Depth-first Search*) (vgl. [8, S. 307]).



Abbildung 3.5: Beispiel für einen Suchbaum.

### 3.4 Traversen

Zum Planen einer Route in einem realen Straßennetz eignen sich die bisher verwendeten Elemente des Graphen nur bedingt. In der Realität ergeben sich Einschränkungen der Bewegungsfreiheit, etwa durch *Einbahnen* oder *Abbiegeverbote* (vgl. [8, S. 312]).

Einbahnen werden durch die Charakteristika eines Digraphen implizit modelliert: Eine in beide Richtungen befahrbare Straße wird durch zwei entgegengesetzt gerichtete Kanten gebildet. Im Fall einer Einbahnstraße existiert nur eine gerichtete Kante in der entsprechenden Richtung. Analog dazu lassen sich Spezialfälle wie etwa ein Kreisverkehr in einem Graphen abbilden (siehe Abb. 3.6). Die Modellierung von Einbahnen durch gerichtete Kanten bedingt keine Abänderung des vorgestellten Dijkstra-Algorithmus. Dies ist in Abb. 3.1 auf S. 15 dargestellt.

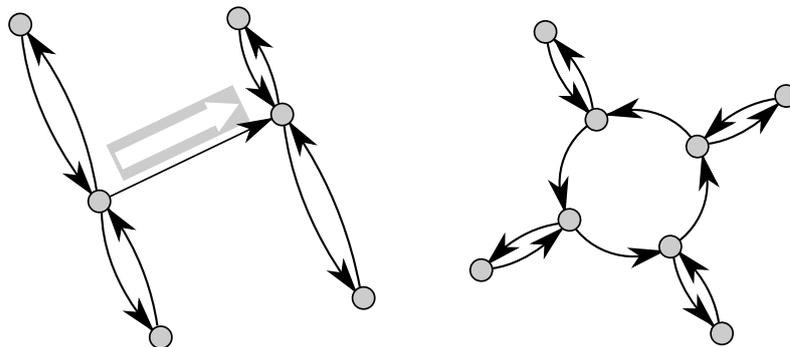
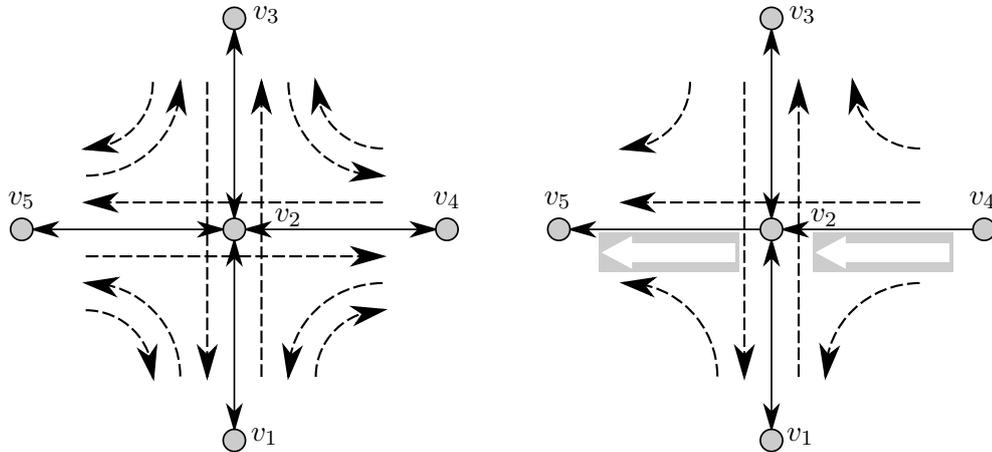


Abbildung 3.6: Modellierung einer Einbahnstraße (l.) und eines Kreisverkehrs (r.) durch gerichtete Kanten.

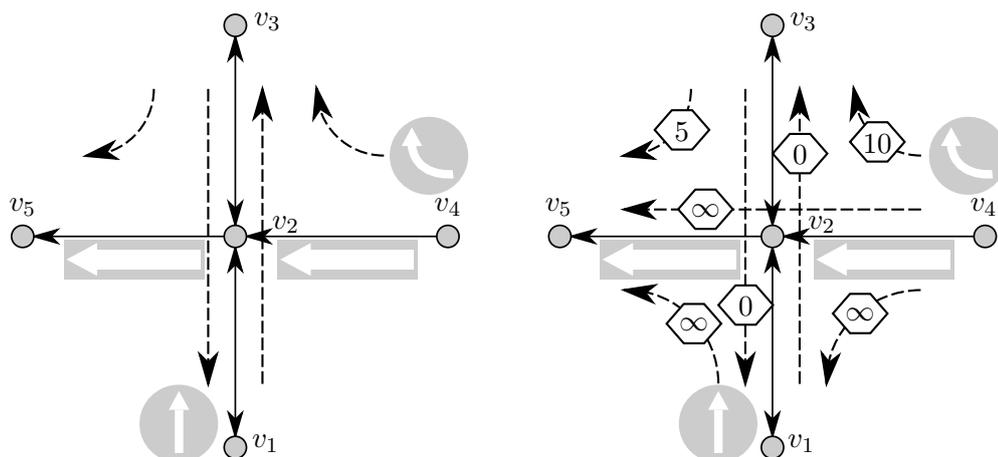
Zur Modellierung von Abbiegeverbotten wird das in Kap. 2 vorgestellte Konzept der Traversen verwendet. Für einen Knoten  $v_j$  können sämtliche, in diesem Knoten möglichen Bewegungsabläufe durch Traversen  $t_{ijk}$ , d. h. Kanten-Kanten-Relationen dargestellt

werden. Für den Allgemeinfall einer Kreuzung, in der vier Straßen ohne Einschränkung aufeinander treffen, sind dies zwölf Traversen. Die Anzahl der Traversen eines Knotens  $v_j$  reduziert sich für den Fall, dass Einbahnstraßen vorhanden sind (siehe Abb. 3.7).



**Abbildung 3.7:** Alle möglichen Traversen eines Knotens  $v_2$  im Allgemeinfall (l.) sowie im Fall vorhandener Einbahnstraßen (r.). Die Traversen sind strichliert dargestellt.

In der For-Schleife des Dijkstra-Algorithmus werden die adjazenten Knoten eines gerade betrachteten Knotens ausgewählt, wie dies in Zeile 11 von Alg. 3.1 gezeigt wird. Bei der Verwendung von Traversen  $t_{p_i i j}$  werden die Nachbarknoten  $v_j$  eines Knotens jedoch nicht mehr durch die Kanten  $a_{ij}$  bestimmt, sondern auch vom Vorgängerknoten  $p_i$  beeinflusst (vgl. [8, S. 313]). Abbiegeverbote lassen sich nun durch Entfernen einzelner Traversen eines Knotens realisieren. Dies ist im linken Teil von Abb. 3.8 dargestellt. Wird der Knoten  $v_i = v_2$  in der While-Schleife des Dijkstra-Algorithmus betrachtet und wird zusätzlich angenommen, dass  $v_4$  der Vorgängerknoten von  $v_2$  ist, stellt der Knoten  $v_3$  den einzigen Nachfolgeknoten von  $v_2$  dar.



**Abbildung 3.8:** Modellierung von Abbiegeverboten durch Entfernen von Traversen (l.) bzw. Bewertung vorhandener Traversen (r.).

In vielen Fällen macht es jedoch Sinn, Abbiegeverbote nicht durch das Entfernen von Traversen zu modellieren, sondern die Traversen entsprechend zu bewerten. Analog zur

Kostenzahl einer Kante  $c_{ij}$  wird eine Traverse mit einer Kostenzahl  $b_{p_i ij}$  versehen. Auf diese Weise kann der Aufwand eines Abbiegevorgangs modelliert werden. Der Wechsel von einer Straße mit niedrigerem Rang auf eine höherrangige Straße könnte etwa durch Brems- und Beschleunigungsvorgänge eine höhere Kostenzahl aufweisen als der umgekehrte Weg.

Abbiegeverbote können definiert werden, indem die Kostenzahl einer Traverse auf  $\infty$  gesetzt wird. Dies ist im rechten Teil von Abb. 3.8 dargestellt. Wird der Knoten  $v_i = v_2$  mit dem Vorgängerknoten  $v_4$  in der While-Schleife erreicht, ergeben sich aus den Traversen drei Nachfolgeknoten von  $v_2$ . Die Knoten  $v_1$  und  $v_5$  fallen wegen  $b_{421} = \infty$  bzw.  $b_{425} = \infty$  weg. Als einziger Nachfolger von  $v_2$  bleibt der Knoten  $v_3$  über, der mit den Traversenkosten von 10 erreicht wird.

Die Einbindung des Konzepts der Traversen bei der Bestimmung der kürzesten Wege erfordert eine Modifikation des bereits vorgestellten Dijkstra-Algorithmus. In Alg. 3.2 ist dargestellt, wie bewertete Traversen den Routing-Algorithmus beeinflussen.

---

**Algorithmus 3.2:** Modifikation des Dijkstra-Algorithmus zur Umsetzung des Konzepts der Traversen.

---

```

11  for v(j) = N(v(i)) mit t(p(i),v(i),v(j))
12      if (v(j) not in T) && (v(j) not in P)
13          l(j) = l(i) + c(ij) + b(pij);
14          p(j) = v(i);
15          T = T + v(j);
16      end % if
17      if (v(j) in T) && (l(i) + c(ij) + b(pij) < l(j))
18          l(j) = l(i) + c(ij) + b(pij);
19          p(j) = v(i);
20      end % if
21  end % for

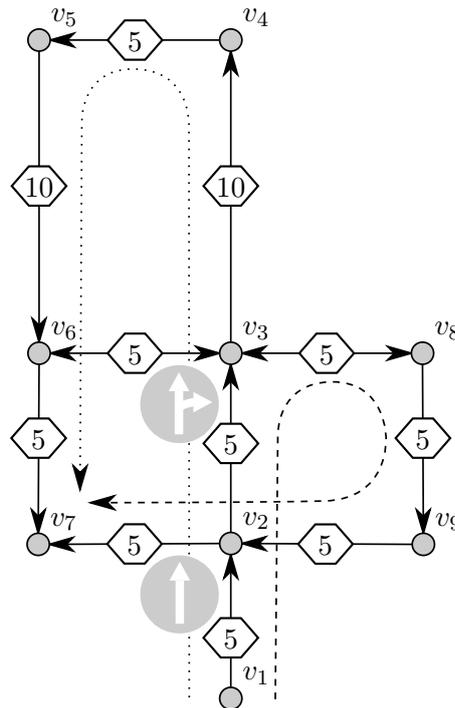
```

---

Es ist ersichtlich, dass sich Alg. 3.1 und Alg. 3.2 nun in der For-Schleife ab Zeile 11 unterscheiden. Wird ein Knoten  $v_i$  als Knoten mit dem kleinsten Label aus der Menge  $T$  ausgewählt, so werden wiederum die Nachbarknoten  $v_j$  selektiert. Dies geschieht unter Beachtung der Traversen  $t_{p_i ij}$ , d. h. die Nachbarknoten von  $v_i$  werden durch seinen Vorgänger  $p_i$  beeinflusst. Für jeden Nachbarknoten  $v_j$  werden die beiden bekannten If-Abfragen durchgeführt (Zeilen 12 und 16). Bei der Berechnung bzw. Aktualisierung des Labels von  $v_j$  wird neben der Kostenzahl der Kante  $c_{ij}$  nun auch die Kostenzahl der Traverse  $b_{p_i ij}$  berücksichtigt (Zeilen 13 und 18). Die in Alg. 3.2 dargestellte additive Methode setzt voraus, dass Kostenzahlen der Kanten und Traversen die selbe Einheit besitzen. Wird stattdessen nach Gl. 2.3 auf S. 11 vorgegangen, kann zur Traversenbewertung eine beliebige Einheit verwendet werden. In der praktischen programmiertechnischen Umsetzung muss zudem die Vorgehensweise bei  $v_i = v_s$ , d. h. am Beginn des Algorithmus berücksichtigt werden. In diesem Fall existiert kein Vorgängerknoten  $p_i$ , sodass die Kostenzahlen der adjazenten Knoten  $v_j$  entsprechend Alg. 3.1 ermittelt werden müssen.

### 3.5 Cycles

Die Ermittlung der kürzesten Wege nach der bisher vorgestellten Methode erzeugt einen Suchbaum, der per Definition frei von Zyklen ist (vgl. [2, S. 119]). Die Wege von einem Startknoten  $v_s$  zu allen anderen Knoten sind somit einfach. In der Realität können kürzeste Wege jedoch durchaus zyklisch sein, d. h. Knoten eines Weges können mehrfach besritten werden. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 3.9 dargestellt.



**Abbildung 3.9:** Durch Verkehrsvorschriften (z. B. Abbiegeverbote) können kürzeste Wege durchaus zyklisch sein. Der kürzeste Weg von  $v_s$  nach  $v_t$  verläuft über die Knoten  $v_2, v_3, v_7, v_8$  und wiederum  $v_2$  (strichliert dargestellt). Bei Berechnung durch den Alg. 3.1 verläuft der kürzeste Weg jedoch über  $v_4$  (punktiert dargestellt).

Die Berücksichtigung von Zyklen erfordert eine Erweiterung der in Alg. 3.1 und Alg. 3.2 vorgestellten Vorgehensweise. Ein entsprechend erweiterter Dijkstra-Algorithmus ist in Alg. 3.3 dargestellt.

---

**Algorithmus 3.3:** Erweiterung des Dijkstra-Algorithmus zur Berücksichtigung von Zyklen.

---

```

21     if (v(j) in P) && (l(i) + b(pij) + b(ijk) + c(ij) + c(jk) < l(k))
22         l(k) = l(i) + b(pij) + b(ijk) + c(ij) + c(jk);
23         p(k) = [v(j),v(i)];
24         T = T + v(k);
25     end % if
26 end % for
27 end % while

```

---

Die For-Schleife des Dijkstra-Algorithmus wird in Alg. 3.3 um eine If-Abfrage erweitert. Zählt ein Nachbarknoten  $v_j$  bereits zur Menge  $P$ , so werden die Traversen  $t_{ijk}$  betrachtet. Für den Fall, dass ausgehend vom aktuellen Knoten  $v_i$  über den adjazenten Knoten  $v_j$  ein weiterer Knoten  $v_k$  erreicht werden kann, wird das Label von  $v_k$  aktualisiert (Zeile 22). Dies tritt ein, wenn die Summe  $l_i + b_{pij} + b_{ijk} + c_{ij} + c_{jk}$  kleiner als das aktuelle Label  $l_k$  ist (Zeile 21). Als Vorgänger werden dem Knoten  $v_k$  zwei Knoten, nämlich  $v_j$  und  $v_i$ , zugeordnet (Zeile 23). Zusätzlich wird  $v_k$  in die Menge  $T$  verschoben (Zeile 24).

# Kapitel 4

## Kraftfahrzeugtechnik

Dieses Kapitel befasst sich mit den fahrzeugtechnischen Grundlagen, welche die Basis für die Verbrauchsberechnung darstellen. Von besonderer Bedeutung ist hier die Ermittlung der Fahrwiderstände, welche während der Bewegung eines Fahrzeugs die Motorleistung beeinflussen. Die Grundlagen zur Fahrzeugdynamik dienen zur Erstellung von Bewegungsmodellen, welche Voraussetzung für die Bewertung des Straßengraphen sind.

Ein Kraftfahrzeug wird als ein maschinell angetriebenes, selbstfahrendes (automobiles) und nicht schienengebundenes Landfahrzeug definiert (vgl. [5, S. 9]).

Diese Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit Personenkraftwagen der Klasse  $M_1$ . Dies sind Kraftfahrzeuge mit vier Rädern zur Beförderung von maximal neun Personen (vgl. [14, S. 853]).

### 4.1 Antriebskonzepte

Kraftfahrzeuge können auf vielfache Art und Weise angetrieben werden. Die Unterschiede liegen in der mechanischen Ausführung des Antriebs sowie in den verwendeten Energieträgern. An alle Antriebskonzepte wird eine Reihe von Anforderungen gestellt. Nach [12, S. 150] können diese wie folgt definiert werden:

- „Das Fahrzeug muss aus dem Stillstand anfahren können und bis zu einer bestimmten Endgeschwindigkeit jede gewünschte Geschwindigkeit einstellen lassen.
- Antriebsdrehmoment und -drehzahl müssen schnell regelbar sein, um dynamische Fahrvorgänge zu ermöglichen.
- Der Energieträger muss auf kleinem Raum bei geringem Gewicht einen hohen Energieinhalt bereitstellen. Es soll ohne große Nutzlast- und Raumverluste eine möglichst hohe Reichweite ohne Unterbrechung oder Wiederbetankung möglich sein.
- Masse und das Bauvolumen sind möglichst klein zu halten.
- Das gesamte System muss Erschütterungen und Bewegungen ertragen können.
- Der Antrieb soll kurzfristig (auch bei niedrigen und hohen Temperaturen) betriebsbereit sein.“

Diese vorwiegend technischen Anforderungen werden zusätzlich von einer Reihe von ökonomischen und ökologischen Bedingungen überlagert (vgl. [5, S. 15]):

- Der Produktionsprozess des Fahrzeugs soll günstig sein und die verwendeten Materialien sollen wiederverwendbar sein.
- Das Fahrzeug soll zuverlässig sein und eine hohe Lebensdauer besitzen.

- Der Betrieb des Fahrzeugs soll ungefährlich sein.
- Der Antrieb soll einen guten Wirkungsgrad und eine geringe Schadstoffemission aufweisen.
- Die Geräuschemission und die Erzeugung von Schwingungen soll gering sein.

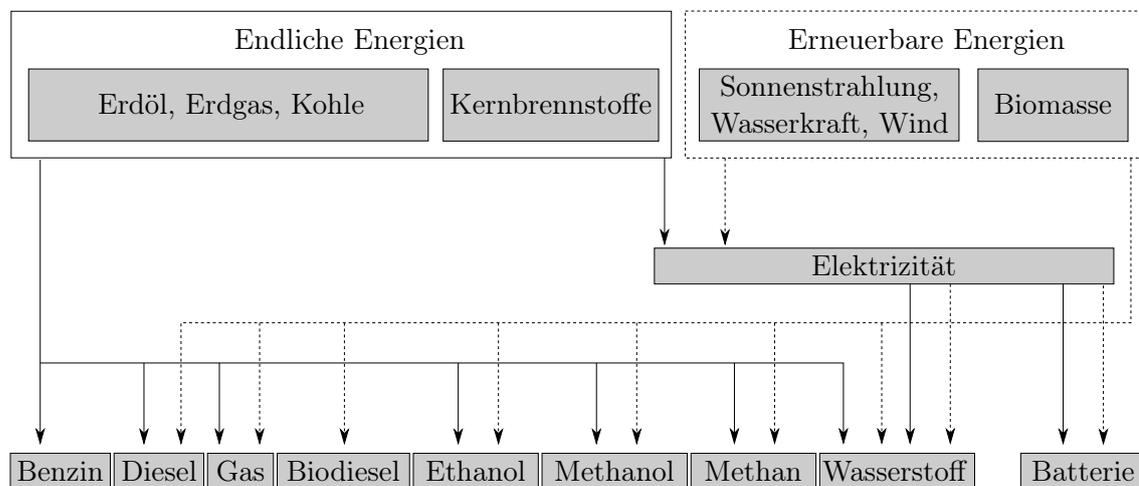
#### 4.1.1 Fahrzeugmotoren

Im Folgenden werden die heute am gebräuchlichsten Antriebskonzepte dargestellt. Neben dem Verbrennungsmotor sind dies der Elektromotor sowie eine Kombination aus beiden.

##### Verbrennungsmotor

Verbrennungsmotoren stellen heute die am häufigsten verwendeten Antriebsmaschinen dar. Chemisch gespeicherte Energie wird in thermodynamischen Prozessen in Bewegungsenergie übergeführt. „Die vorherrschende Bauform von Kraftfahrzeugmotoren ist der Hubkolben-Verbrennungsmotor, welcher nach dem Prinzip des Ottomotors oder des Dieselmotors arbeitet [12, S. 150]“. Über ein manuelles oder automatisches Getriebe und Wellen werden die Fahrzeugräder zumindest einer Achse angetrieben.

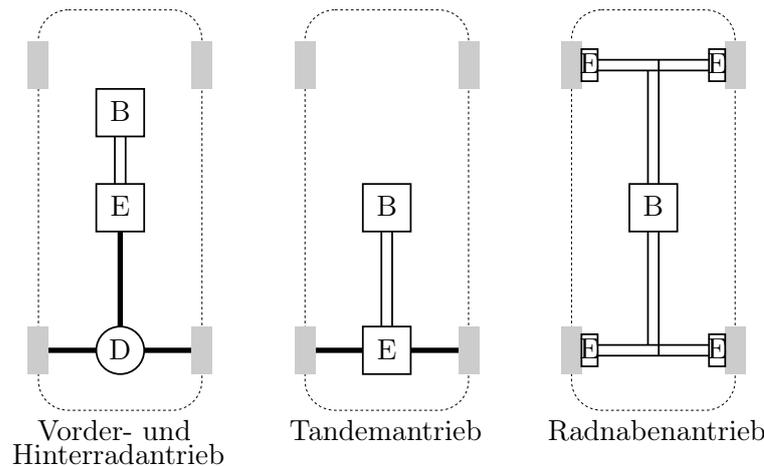
Als Kraftstoffe kommen sowohl flüssige als auch gasförmige Stoffe zum Einsatz. Neben Benzin, Diesel und Gas seien auch Methanol, Ethanol, Methan oder Wasserstoff genannt (siehe Abb. 4.1). Trotz des – verglichen mit dem Elektromotor – schlechten Wirkungsgrads bietet der mit Benzin oder Diesel betriebene Verbrennungsmotor die größte Reichweite, bezogen auf Speichergröße und -gewicht (vgl. [5, S. 19]).



**Abbildung 4.1:** Die für den Straßenverkehr wesentlichen Kraftstoffe und Primärenergien. Abb. modifiziert nach [21, S. 337].

##### Elektroantrieb

Durch die Endlichkeit der fossilen Energieträger sowie durch die Emissionsproblematik wird eine Verbesserung des Wirkungsgrads von Kraftfahrzeugen gefordert. Langfristig werden Elektroantriebe als Alternative zu Verbrennungskraftmaschinen gesehen. Nicht spurgebundene Fahrzeuge mit Elektroantrieb beziehen die nötige Energie aus einer im Fahrzeug mitgeführten Traktionsbatterie (vgl. [20, S. 111]). Die Fahrzeugräder werden direkt oder über ein Getriebe und Differential angetrieben (siehe Abb. 4.2).



**Abbildung 4.2:** Antriebsstrang-Konfigurationen für Elektrofahrzeuge. B: Batterie, D: Differential, E: Elektromotor. Abb. modifiziert nach [20, S. 112].

Die Vorteile des Elektromotors ergeben sich aus seinem guten Wirkungsgrad sowie aus der Möglichkeit der teilweisen Zurückgewinnung von Bremsenergie (*Rekuperation*). Die Nachteile liegen in den hohen Anschaffungskosten sowie der eingeschränkten Reichweite (vgl. [20, S. 116]).

### Hybridantrieb

Mittelfristig gilt das Konzept der *Hybridisierung* als aussichtsreich, den Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren zu verbessern (vgl. [5, S. 19]). Der Benzin- oder Dieselmotor wird hierbei mit einem Elektromotor sowie einer Batterie zur Speicherung elektrischer Energie kombiniert. Hybridantriebe sind in serieller, paralleler und gemischter Bauform ausgeführt (siehe Abb. 4.3).

Die Hybridisierung bietet eine Reihe von Vorteilen (vgl. [5, S. 21]):

- Der Verbrennungsmotor kann in Betriebspunkten mit höherem Wirkungsgrad arbeiten sowie zeitweise abgeschaltet werden.
- Im Bremsbetrieb arbeitet der Elektromotor als Generator, wodurch ein Teil der Bremsenergie zurückgewonnen wird und in die Batterie eingespeist werden kann.
- Der Elektromotor kann zur schnelleren Beschleunigung dem Verbrennungsmotor zugeschaltet werden (*Booster-Betrieb*).

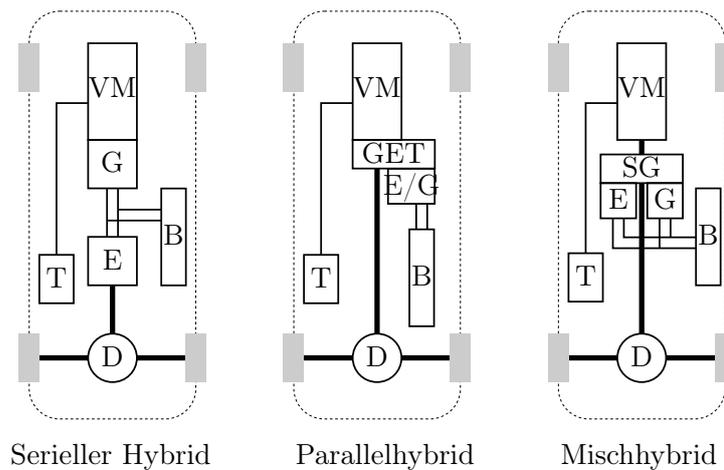
#### 4.1.2 Kennfeld von Verbrennungskraftmaschinen

Die an der Kurbelwelle des Motors abgegebene Nennleistung  $P_M$  steht durch die Beziehung

$$P_M = M_M \cdot \omega = 2\pi \cdot M_M \cdot n_M \quad (4.1)$$

mit dem Motordrehmoment  $M_M$  und der Motordrehzahl  $n_M$  bzw. der Winkelgeschwindigkeit der Kurbelwelle  $\omega$  in Relation (vgl. [12, S. 151]).

Die Drehzahl  $n_M$  einerseits und das abgegebene Drehmoment  $M_M$  bzw. die Motorleistung andererseits definieren den aktuellen *Betriebspunkt* des Motors. Durch das Auftragen aller möglichen Betriebspunkte, d. h. durch die Gegenüberstellung von Motordrehzahl und



**Abbildung 4.3:** Grundkonzepte von Hybridantrieben. B: Batterie, D: Differential, E: Elektromotor, G: Generator, GET: Getriebe, SG: Summiergetriebe, T: Treibstofftank, VM: Verbrennungsmotor. Abb. modifiziert nach [1, S. 133].

Motordrehmoment ergibt sich das *Motorkennfeld*. Der Verlauf des maximalen Motordrehmoments wird durch die *Motorkennlinie* charakterisiert. Befindet sich der Motor in diesem Bereich der maximalen Last, so spricht man von *Volllast*. Dies ist in Abb. 4.4 für einen Dieselmotor exemplarisch dargestellt.

Die Motordrehzahl nimmt Werte zwischen der *Minstdrehzahl*  $n_{min}$  und der *Maximaldrehzahl*  $n_{max}$  an. Die Minstdrehzahl gibt die Drehzahl des Motors an, ab der eine Leistungsabgabe möglich ist. Die Maximaldrehzahl darf zur Vermeidung mechanischer Überbeanspruchungen nicht überschritten werden (vgl. [5, S. 171]). Häufig wird die Drehzahl auf die *Nenn Drehzahl*  $n_{nenn}$  bezogen. Dies ist die Motordrehzahl, bei der die maximale Motorleistung abgegeben wird.

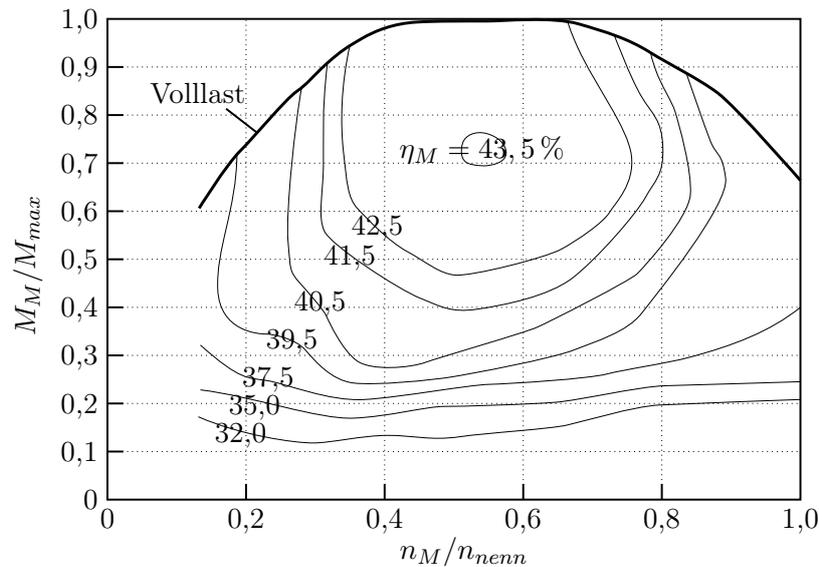
Von großem Interesse ist das Verhalten des Motorwirkungsgrads  $\eta_M$  in Abhängigkeit vom aktuellen Betriebspunkt. Der Wirkungsgrad ist ein Maß für die Effizienz des Motors und wird als das Verhältnis von abgegebener Arbeit zu zugeführter Energie definiert. Moderne Ottomotoren erreichen Maximalwerte von ca. 40 %, Dieselmotoren können bis zu 50 % erreichen und Elektromotoren besitzen oft einen Wirkungsgrad über 80 % (vgl. [5, S. 171 – 175]). Die Bedeutung des Wirkungsgrads und der Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch wird in Kap. 5 genauer erläutert.

## 4.2 Fahrwiderstand

Als Fahrwiderstand  $F_W$  wird die der Fahrzeugbewegung entgegen gerichtete Kraft bezeichnet. Der Fahrwiderstand lässt sich im Wesentlichen in

- *Radwiderstand*,
- *Luftwiderstand*,
- *Steigungswiderstand* und
- *Beschleunigungswiderstand*

unterteilen. Die Größe des Fahrwiderstands hängt von einer Vielzahl an konstanten fahrzeug- und fahrbahnabhängigen Faktoren sowie von der Fahrzeugdynamik ab.



**Abbildung 4.4:** Kennfeld eines Dieselmotors. Aus dem Betriebspunkt des Motors, welcher durch die Motordrehzahl  $n_M$  und das Motordrehmoment  $M_M$  bestimmt wird, kann der Wirkungsgrad abgeleitet werden. Abb. modifiziert nach [5, S. 173].

#### 4.2.1 Radwiderstand

Aufgrund der vielfältigen Ursachen kann der Radwiderstand in weitere Anteile aufgeteilt werden (vgl. [5, S. 136–149]).

##### Rollwiderstand

„Der Rollwiderstand entsteht aus aus der Formänderungsarbeit zwischen Reifen und Fahrbahn [17, S. 40]“. Beim Belasten des Fahrzeugrads durch die Radlast verformt sich der Reifen im Bereich der Kontaktzone mit der Fahrbahn und es entsteht eine Aufstandsfläche. Beim Abrollen federt der Reifen im vorderen Bereich der Aufstandsfläche ein, im hinteren Bereich federt er aus (vgl. [5, S. 137]).

Aus der Bewegungsrichtung des Reifens entsteht infolge des Zusammenspiels von Feder- und Dämpfkraften eine ungleichmäßige Flächenpressung, die in eine vor der Radmitte angreifende Resultierende übergeführt werden kann (siehe Abb. 4.5). Diese normal auf die Fahrbahn gerichtete Kraft wird als Normalkraft  $F_N$  bezeichnet und entspricht der Radlast. Der Abstand zwischen Radmitte und  $F_N$  wird als  $e_0$  bezeichnet. Die Kräfte, welche die Radlast darstellen, wirken in der Radmitte. Aus dem resultierenden Kräftepaar entsteht ein der Drehbewegung des Rads entgegengesetzt gerichtetes Moment (vgl. [5, S. 137]). Zur Überwindung dieses Moments muss die Kraft  $F_{WRR}$  aufgebracht werden.

Für den Rollwiderstand gilt somit

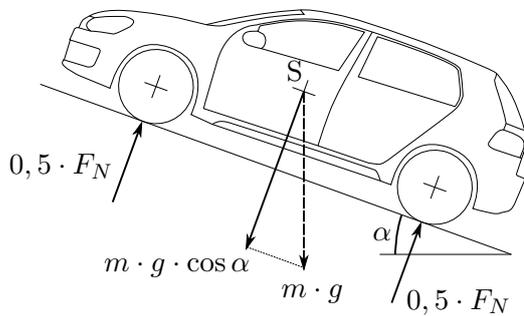
$$F_{WRR} = \frac{e_0}{r_{\text{stat}}} \cdot F_N \quad (4.2)$$

mit  $e_0$  als dem *Hebelarm der rollenden Reibung* und  $r_{\text{stat}}$  als dem *statischen Radhalbmesser*.

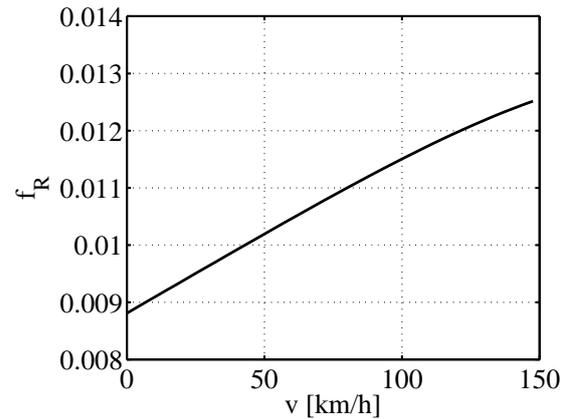
In der Praxis wird der *Rollwiderstandsbeiwert*  $f_R = e_0/r_{\text{stat}}$  eingeführt. Wird eine gleichmäßige Verteilung der Fahrzeugmasse  $m$  auf alle Räder angenommen, so gilt für die Radlast

$$F_N = m \cdot g. \quad (4.3)$$





**Abbildung 4.6:** Einflussgrößen auf den Rollwiderstand in der Steigung. „ $S$ “ kennzeichnet den Fahrzeugschwerpunkt. Abb. modifiziert nach [5, S. 138].



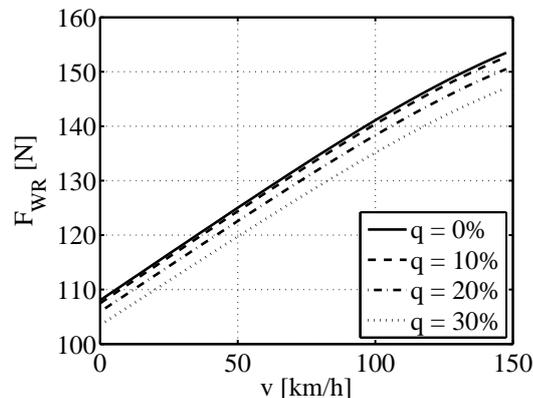
**Abbildung 4.7:** Verlauf des Rollwiderstandsbeiwerts eines PKW-Radialreifens bei normaler Belastung und normalem Reifenluftdruck.

### Gesamter Radwiderstand

Da auf trockener fester Fahrbahn, mit richtig eingestellter Spur und intakten Radlagern der Anteil des Rollwiderstands am Radwiderstand über 80 % beträgt, wird in dieser Arbeit vereinfacht

$$F_{WR} = F_{WRR} \quad (4.7)$$

verwendet (vgl. [5, S. 149]). Abb. 4.8 zeigt die Größenordnung des Radwiderstands in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für verschiedene Steigungen.



**Abbildung 4.8:** Rollwiderstand für einen durchschnittlichen PKW.

### 4.2.2 Luftwiderstand

Bei der Bewegung eines Fahrzeugs entsteht durch die um- und durchströmenden Luftmassen der Luftwiderstand  $F_{WL}$ . Dieser setzt sich aus dem *Druckwiderstand* und dem *Reibungswiderstand* zusammen, die von der Fahrzeugform bzw. von der Oberflächenstruktur des Fahrzeugs bestimmt werden (vgl. [5, S. 150]).

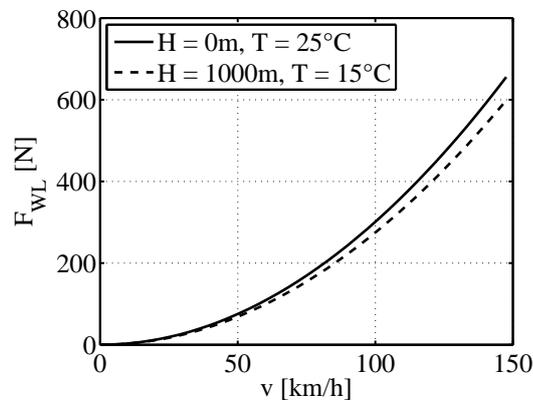
Der Luftwiderstand lässt sich auf Basis der *Bernoullischen Gleichung* nach

$$F_{WL} = c_W \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad (4.8)$$

ermitteln, mit dem Luftwiderstandsbeiwert  $c_W$ , der Fahrzeugstirnfläche  $A$ , der Luftdichte  $\rho$  und der Fahrgeschwindigkeit  $v$ . Der Luftwiderstand wächst somit mit dem Quadrat der Fahrgeschwindigkeit. Dies ist in Abb. 4.9 dargestellt.

Gl. 4.8 gilt nur für Windstille. Bewegen sich die Luftmassen, so entspricht die Fahrgeschwindigkeit nicht mehr der Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und Luft und es treten zusätzliche aerodynamische Kräfte auf.

„Der Luftwiderstandsbeiwert  $c_W$  ist abhängig von der Karosserieform und wird als konstant angesehen, d. h. unabhängig von Fahrgeschwindigkeit und Fahrzeugstirnfläche“ [5, S. 150]. Entsprechende Werte durchschnittlicher PKWs sind in Anh. A angeführt.



**Abbildung 4.9:** Luftwiderstand für einen durchschnittlichen PKW. Bei strenger Modellierung muss berücksichtigt werden, dass die Luftdichte  $\rho$  höhen- und temperaturabhängig ist.

### 4.2.3 Steigungswiderstand

Die Gewichtskraft im Fahrzeugschwerpunkt lässt sich in zwei Komponenten zerlegen (siehe Abb. 4.6 auf S. 30). Die Komponente parallel zur Fahrbahn tritt bei gegebener Fahrbahnsteigung auf (siehe Abb. 4.10) und stellt den Steigungswiderstand  $F_{WS}$  dar:

$$F_{WS} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (4.9)$$

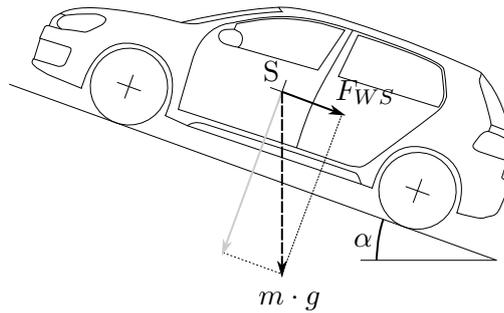
### 4.2.4 Beschleunigungswiderstand

Entsprechend den Newtonschen Axiomen muss zur Beschleunigung eines Körpers eine Kraft aufgebracht werden. Beim Anfahren eines Fahrzeugs ist diese Kraft der Bewegungsrichtung entgegengesetzt und wird als Beschleunigungswiderstand bezeichnet.

Zusätzlich zur translatorischen Beschleunigung  $a$  müssen die Räder und alle übrigen drehbaren Teile des Fahrzeugs rotatorisch beschleunigt werden. Die rotatorische Beschleunigung kann durch Kenntnis der Trägheitsmomente aller Komponenten des Antriebsstrangs streng modelliert werden. Der Einfluss dieser Größen wird im vereinfachten Fall in Form des *Drehmassenzuschlagsfaktors*  $\epsilon$  berücksichtigt.

Für den Beschleunigungswiderstand  $F_{WB}$  gilt somit

$$F_{WB} = m \cdot (1 + \epsilon) \cdot a. \quad (4.10)$$



**Abbildung 4.10:** Entstehung des Steigungswiderstands. Der Fahrzeugschwerpunkt ist mit „S“ gekennzeichnet. Abb. modifiziert nach [5, S. 154].

#### 4.2.5 Gesamtfahrwiderstand und Fahrwiderstandsleistung

Die einzelnen Anteile des Fahrwiderstands ergeben durch Summation den *Gesamtfahrwiderstand*  $F_W$ :

$$F_W = m \cdot g \cdot \left[ f_R \cdot \cos \alpha + \sin \alpha + (1 + \epsilon) \cdot \frac{a}{g} \right] + c_W \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad (4.11)$$

Aus Gl. 4.11 ist ersichtlich, dass der Luftwiderstand mit dem Quadrat der Fahrgeschwindigkeit zunimmt, während die restlichen Anteile als konstant betrachtet werden können. Sie sind im Wesentlichen proportional zur Fahrzeugmasse (vgl. [5, S. 159]).

Bei translatorischen Bewegungen ist die Leistung definiert als das Produkt aus Kraft und Geschwindigkeit. Aus dem Fahrwiderstand und der Fahrgeschwindigkeit ergibt sich somit die (*Gesamt-*)*fahrwiderstandsleistung*  $P_W$ :

$$P_W = F_W \cdot v \quad (4.12)$$

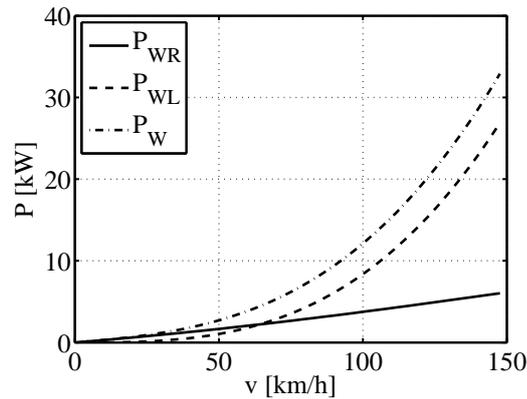
Die Leistung wird in  $[\text{N} \cdot \text{m}/\text{s} = \text{W}]$  angegeben. Die zur Überwindung der Fahrwiderstandsleistung erforderliche Motorleistung ist maßgeblich für den Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs (siehe Kap. 5).

Analog zur Gesamtfahrwiderstandsleistung lässt sich für jede Fahrwiderstandskomponente die entsprechende Leistung angeben:

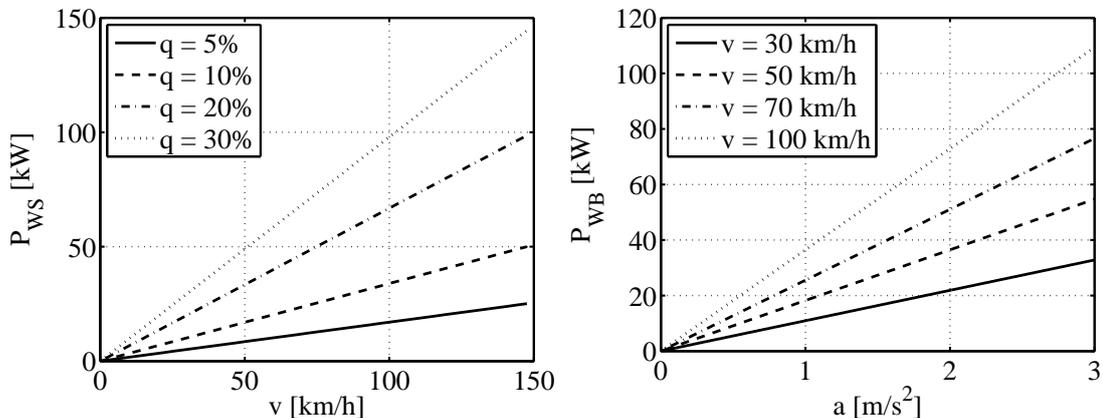
$$P_{WR} = F_{WR} \cdot v \quad P_{WL} = F_{WL} \cdot v \quad P_{WS} = F_{WS} \cdot v \quad P_{WB} = F_{WB} \cdot v \quad (4.13)$$

Der typische Verlauf der Rollwiderstandsleistung  $P_{WR}$ , der Luftwiderstandsleistung  $P_{WL}$  sowie der Gesamtfahrwiderstandsleistung  $P_W$  ist in Abb. 4.11 dargestellt. Bei hohen Geschwindigkeiten dominiert der Einfluss des Luftwiderstands, weshalb die Gesamtfahrwiderstandsleistung  $P_W$  wegen Gl. 4.12 annähernd proportional zur dritten Potenz der Geschwindigkeit ist.

Bei der Bewegung eines Fahrzeugs wird die Fahrwiderstandsleistung zum Großteil durch Roll- und Fahrwiderstand bestimmt. Zusätzlich können die in bestimmten Fahrsituationen auftretenden Steigungs- und Beschleunigungswiderstände beträchtliche Widerstandsleistungen hervorrufen. Dies ist in Abb. 4.12 für einen durchschnittlichen PKW dargestellt.



**Abbildung 4.11:** Fahrwiderstandsleistung  $P_W$  als Funktion der Fahrgeschwindigkeit für einen PKW mittlerer Größe. Bei hohen Geschwindigkeiten überwiegt der Anteil des Luftwiderstands.



**Abbildung 4.12:** Steigungswiderstandsleistung (l.) und Beschleunigungswiderstandsleistung (r.) für verschiedene Fahrbahnsteigungen und Fahrgeschwindigkeiten.

### 4.3 Fahrzeugdynamik

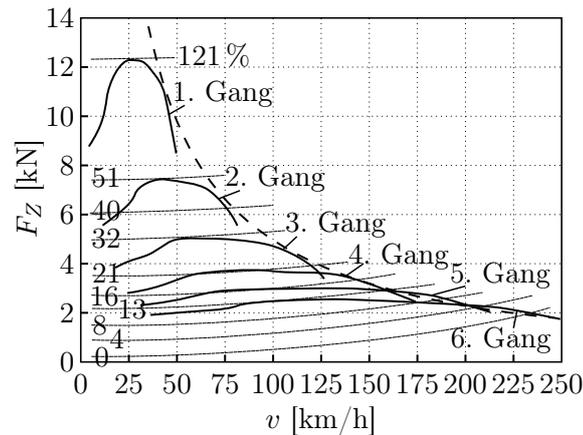
Die Bewegung eines Fahrzeugs wird von einer Reihe straßen- und fahrzeugabhängiger Parameter bestimmt. Abseits der zulässigen Streckengeschwindigkeit werden die Fahrgeschwindigkeit und die Beschleunigung aus der *Antriebsleistung*  $P_A$  abgeleitet.

Für ein mittels Verbrennungsmotor angetriebenes Fahrzeug mit Getriebe gilt: „Aus dem Motorkennfeld  $M(n)$  können [...] die Zugkräfte, die in den verschiedenen Gängen verfügbar sind, als Funktion der Fahrgeschwindigkeit  $F_x(v)$  ermittelt werden [17, S. 41]“. Dies ist in Abb. 4.13 dargestellt.

Der Verlauf der Zugkraft in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit soll möglichst dem *idealen Antriebskennfeld* entsprechen. Die Linie der idealen Antriebskennung ergibt sich aus der maximalen Antriebsleistung und der Fahrgeschwindigkeit:

$$F_Z = \frac{P_{A\max}}{v} \quad (4.14)$$

Die *Beschleunigungsfähigkeit* eines Kraftfahrzeugs hängt von der *Überschusskraft*  $F_U$  ab. Dies ist die Differenz zwischen Zugkraft und Fahrwiderstand, aus der unter Berücksichti-

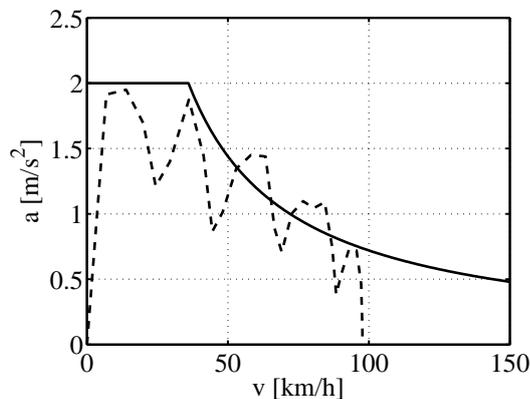


**Abbildung 4.13:** Zugkraftdiagramm eines durchschnittlichen PKWs mit dem Verlauf der idealen Antriebskennung (strichliert dargestellt). Als zusätzlicher Parameter ist die Fahrbahnsteigung in [%] angegeben. Abb. modifiziert nach [17, S. 42].

gung der Fahrzeugmasse die maximalen Werte der Längsbeschleunigung ermittelt werden können:

$$a = \frac{F_U}{m \cdot (1 + \epsilon)} = \frac{F_Z - F_W}{m \cdot (1 + \epsilon)} \quad (4.15)$$

Bei normaler Fahrweise treten im Straßenverkehr Längsbeschleunigungen bis  $3 \text{ m/s}^2$  auf. Zur Modellierung der Längsbeschleunigung wird die ideale Antriebskennung bei einer vorgegebenen maximalen Antriebsleistung verwendet. Ihr hyperbolischer Verlauf ist in Abb. 4.14 zusammen mit realen Werten eines durchschnittlichen PKWs dargestellt.

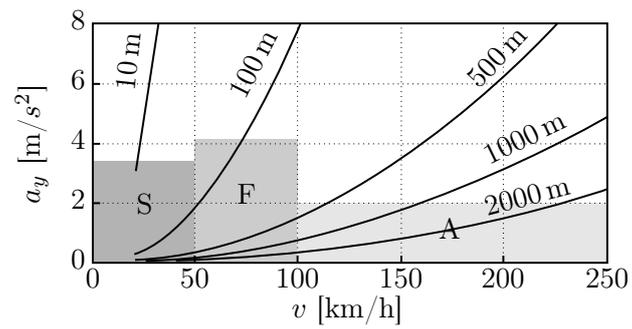


**Abbildung 4.14:** Modellierter Längsbeschleunigung eines PKWs in Abhängigkeit der Geschwindigkeit bei normaler Fahrweise. Reale Werte sind strichliert dargestellt. Die Begrenzung von Antriebskraft bzw. Beschleunigung resultiert aus dem begrenzten Kraftschluss zwischen den Antriebsrädern und der Fahrbahn (vgl. [5, S. 169]).

Bei Kurvenfahrten wirkt abhängig vom Kurvenradius  $R$  eine Querbewegung  $a_y$  auf das Fahrzeug. Diese wird durch

$$a_y = \frac{v^2}{R} \quad (4.16)$$

errechnet und kann ihrerseits die zulässige Höchstgeschwindigkeit beeinflussen. Typische Werte für die Querbewegung sind in Abb. 4.15 dargestellt.



**Abbildung 4.15:** Querbeschleunigung  $a_y$  eines PKWs in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit  $v$  und vorgegebenen Kurvenradien. Die Bereiche der vorherrschenden Größenordnungen sind für Stadt (S), Landstraße (L) und Autobahn (A) markiert. Abb. modifiziert nach [14, S. 338].

## Kapitel 5

# Energieverbrauch von Kraftfahrzeugen

Der Energiebedarf für den Betrieb von Kraftfahrzeugen hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, die je nach Detailliertheitsgrad sämtliche Systeme eines Fahrzeugs umfassen.

Die mitgeführte Energie in Form von flüssigen, festen oder gasförmigen Stoffen bzw. Batterien wird neben dem Antrieb des Fahrzeugs auch zur Versorgung einer Reihe von Nebenverbrauchern verwendet. Zudem legt der Wirkungsgrad aller im System vorhandenen Komponenten die Größe der stets vorhandenen Energieverluste fest.

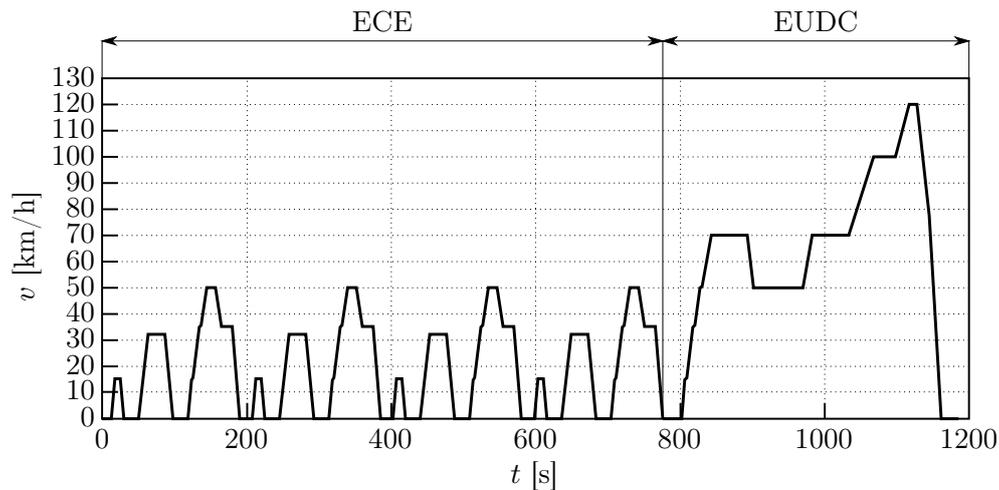
Dieses Kapitel beschreibt die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs, der durch die Bewegung eines Fahrzeugs hervorgerufen wird. Der Betrieb von Nebenaggregaten wie Heizung, Klimaanlage oder Licht wird hier außer Acht gelassen. Von besonderer Bedeutung für die Bewertung eines Graphen, d. h. für die Routingfähigkeit ist die Ermittlung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs bzw. die darauf basierende Berechnung des Streckenverbrauchs, welche als Kostenzahl einer Kante verwendet wird (siehe Kap. 7).

### 5.1 Normverbrauch

Die gängigste Methode, Kraftfahrzeuge nach ihrem Verbrauch zu klassifizieren ist die Angabe des Normverbrauchs  $b_{100}$  in [L/100 km]. Fahrzeuge absolvieren hierzu *Fahrzyklen* auf Rollenprüfständen, für die der Verlauf von Geschwindigkeit und Getriebeübersetzung fest vorgegeben ist. Durch Messung der Emissionen und des Verbrauchs können Angaben über den durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch im Stadt- und Freilandverkehr gemacht werden (vgl. [5, S. 204]).

In der EU werden PKWs auf Basis des *NEFZ* (*Neuer Europäischer Fahrzyklus*) getestet. Der zeitliche Verlauf der Geschwindigkeit dieses Fahrzyklus ist in Abb. 5.1 dargestellt. Der NEFZ besteht aus mehreren *ECE-Zyklen*, die innerstädtischen Verkehr simulieren sollen und einem *EUDC-Zyklus* (*Extra Urban Driving Cycle*) zur Simulation von Freilandverkehr. Der Kraftstoffverbrauch wird z. B. als *Drittmix* (Stadt/Freiland/kombiniert) angegeben.

Durch die Verwendung von Rollenprüfständen soll eine Vergleichsmöglichkeit zwischen unterschiedlichen Fahrzeugen gegeben werden. In der Realität weichen die mittels NEFZ-Zyklus gewonnenen Verbrauchswerte oft vom tatsächlichen Kraftstoffverbrauch ab, der stark von der individuellen Fahrweise abhängt (vgl. [5, S. 206]).



**Abbildung 5.1:** Verlauf der Geschwindigkeit über der Zeit beim Neuen Europäischen Fahrzyklus NEFZ. Abb. modifiziert nach [5, S. 205].

## 5.2 Kenngrößen

Die Effizienz eines Motors wird i. Allg. durch seinen *Wirkungsgrad* beurteilt. Der Wirkungsgrad eines Motors bezeichnet das Verhältnis der abgegebenen Arbeit zu der in Form von Kraftstoff zugeführten Energie:

$$\eta_M = \frac{W_M}{E_K} \quad (5.1)$$

Arbeit und Energie werden in der Einheit [Ws] bzw. in [kWh] angegeben. Durch den Wirkungsgrad kann die Motorleistung auch in der Form

$$P_M = \eta_M \cdot \frac{dE_K}{dt} \quad (5.2)$$

ausgedrückt werden. Die Motorleistung  $P_M$  entspricht somit der Energie, welche mittels Kraftstoff pro Zeiteinheit zugeführt wird, skaliert um den Motorwirkungsgrad  $\eta_M$ .

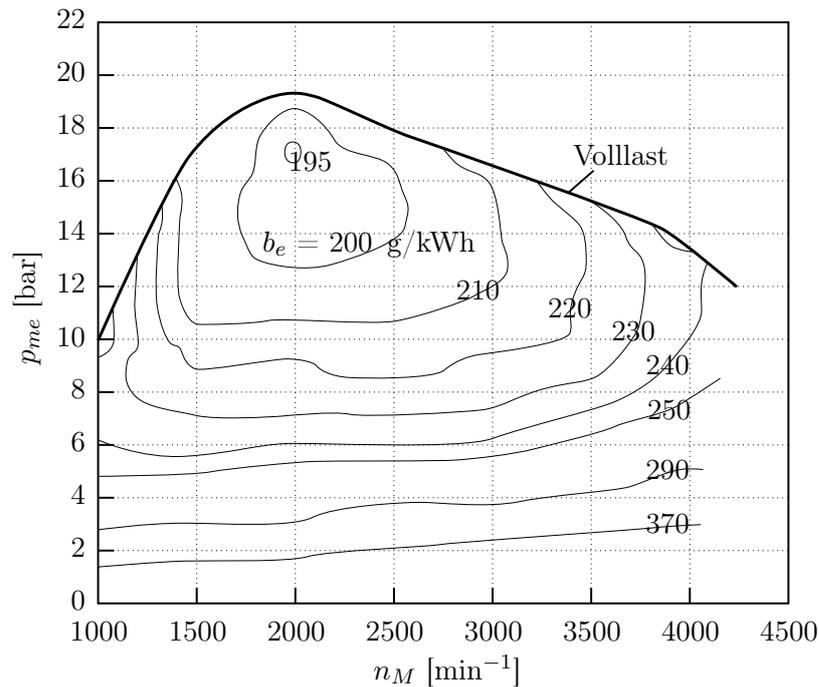
Aus Abb. 4.4 auf S. 26 ist ersichtlich, dass der Wirkungsgrad vom Betriebspunkt des Motors, d. h. von der Motordrehzahl  $n_M$  und dem Motordrehmoment  $M_M$  abhängt. Der beste Wirkungsgrad wird in Bereichen mittlerer Drehzahl und hoher Last erreicht (vgl. [5, S. 171]).

Der Wirkungsgrad steht in direktem Zusammenhang mit dem Kraftstoffverbrauch des Motors: Analog zum Wirkungsgrad kann aus einem Motorkennfeld der *spezifische Verbrauch*  $b_e$  abgeleitet werden. Der spezifische Verbrauch wird in [g/kWh] angegeben und bezieht die verbrauchte Kraftstoffmasse auf die abgegebene Arbeit (vgl. [5, S. 203]):

$$b_e = \frac{m_K}{W_M} \quad (5.3)$$

In Abb. 5.2 ist das Motorkennfeld eines Dieselmotors dargestellt, aus welchem für den jeweiligen Betriebspunkt der spezifische Verbrauch  $b_e$  abgelesen werden kann.

Statt dem Drehmoment oder der Motorleistung wird an der Ordinate von Motorkennfeldern oft der *effektive Mitteldruck* [bar] aufgetragen. Dies ermöglicht den Vergleich der



**Abbildung 5.2:** Verbrauchskennfeld eines direkt einspritzenden Dieselmotors mit  $V_H=1,9$  L. Abb. modifiziert nach [12, S. 152].

Kennfelder verschieden großer Motoren, indem der *Hubraum*  $V_H$  und die *Zykluszahl*  $z$  ( $z = 4$  bei Viertaktmotoren) miteinbezogen werden:

$$p_{me} = \frac{M_M \cdot z \cdot \pi}{V_H} \quad (5.4)$$

Der Zusammenhang zwischen der Kraftstoffmasse  $m_K$  und der äquivalenten Energie  $E_K$  wird über den *unteren Heizwert*  $H_U$  hergestellt:

$$E = H_U \cdot m_K \quad (5.5)$$

Der untere Heizwert gibt den Energiegehalt einer Kraftstoffmenge an. Typische Werte für  $H_U$  sind in Tab. 5.1 angegeben. Folglich lässt sich durch

$$\eta_M = \frac{W_M}{H_U \cdot m_K} = \frac{1}{H_U \cdot b_e} \quad (5.6)$$

der Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad und spezifischem Verbrauch herstellen (vgl. [5, S. 203]).

## 5.3 Kraftstoffverbrauch

### 5.3.1 Bedarfskennfeld und Angebotskennfeld

Aus dem aktuellen Fahrzustand eines Kraftfahrzeugs (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Steigung usw.) resultiert der aktuelle Fahrwiderstand (siehe Kap. 4). Zur Überwindung der

**Tabelle 5.1:** Durchschnittliche Werte für den unteren Heizwert verschiedener Kraftstoffe.  
Quelle: [5, S. 202]

Kraftstoff	Unterer Heizwert $H_U$ [kJ/kg]
Benzin	43900
Diesel	43350
Auto-Gas	47000 - 49000

Fahrwiderstandsleistung  $P_W$  wird die *Antriebsleistung*  $P_A$  benötigt. Ein *Bedarfskennfeld* wird somit einem *Angebotskennfeld* gegenübergestellt (vgl. [5, S. 190]):

$$\underbrace{P_W = F_W \cdot v}_{\text{Bedarfskennfeld}} = \underbrace{P_A = P_M \cdot \eta_A}_{\text{Angebotskennfeld}} \quad (5.7)$$

Im Leistungsfluss des Fahrzeugantriebs tritt eine Reihe von Verlusten auf, die bei exakter Modellierung berücksichtigt werden müssen. Diese resultieren aus Reibungswiderständen im Getriebe, in der Übersetzung und der Kraftübertragung sowie aus dem Betrieb von Nebenaggregaten. Diese *Verluste im Antriebsstrang* werden häufig durch den Wirkungsgrad  $\eta_A$  modelliert. Bei strenger Modellierung müssen zudem Schlupfverluste bei der Kraftübertragung von den Rädern auf die Fahrbahn berücksichtigt werden.

Die tatsächlich erforderliche Motorleistung lässt sich im allgemeinen Fall durch

$$P_M = \frac{P_W}{\eta_A} \quad (5.8)$$

aus dem aktuellen Fahrzustand ableiten.

### 5.3.2 Streckenverbrauch

Der spezifische Verbrauch (Gl. 5.3) kann auch ausgedrückt werden durch

$$b_e = \frac{\dot{m}_K}{P_M} \quad (5.9)$$

mit dem *Kraftstoffmassenstrom*  $\dot{m}_K = dm_K/dt$  [g/h] und der Motorleistung  $P_M$  [kW]. Daraus folgt

$$\frac{dm_K}{dt} = b_e \cdot P_M. \quad (5.10)$$

Zusammen mit Gl. 5.8 und Gl. 4.12 (S. 32) ergibt sich folglich die für eine bestimmte Zeit  $T$  oder eine für eine bestimmte Fahrstrecke  $S$  erforderliche Kraftstoffmasse, die als *Streckenverbrauch*  $B_e$  bezeichnet wird (vgl. [5, S. 207] und [11, S. 83]):

$$B_e = \int dm_K = \int_0^T b_e \cdot P_M \cdot dt \quad (5.11)$$

Bei Verwendung des Motorwirkungsgrads wird die erforderliche Kraftstoffmasse unter Verwendung von Gl. 5.6 durch

$$B_e = \int dm_K = \int_0^T \frac{P_M}{\eta_M \cdot H_U} \cdot dt \quad (5.12)$$

ermittelt. Mithilfe der Dichte  $\rho_K$  kann die durch Gl. 5.11 oder Gl. 5.12 berechnete Kraftstoffmasse durch

$$V_K = \frac{m_K}{\rho_K} \quad (5.13)$$

in das Kraftstoffvolumen  $V_K$  [L] übergeführt werden. Alternativ kann in Gl. 5.12 der untere Heizwert in [kJ/L] eingeführt werden:

$$H_U \text{ [kJ/L]} = H_U \text{ [kJ/kg]} \cdot \rho_K \text{ [kg/L]} \quad (5.14)$$

In Tab. 5.2 ist die Dichte von Benzin und Diesel angeführt.

**Tabelle 5.2:** Durchschnittliche Werte für die Dichte von Benzin und Diesel. Quelle: [5, S. 206]

Kraftstoff	Dichte $\rho_K$ [kg/L]
Benzin	0,75
Diesel	0,84

### 5.3.3 Schubetrieb und Rekuperation

Bei Talfahrten oder zum Verzögern kann zur Schonung der Betriebsbremse die Motorbremswirkung ausgenutzt werden. In diesem Fall arbeitet der Motor im *Schubetrieb*. „Er liefert hierbei ein Bremsmoment, das [...] mit zunehmender Drehzahl näherungsweise linear zunimmt [5, S. 196]“. Durch die *Schubabschaltung* – die nur über einer gewissen Mindestdrehzahl möglich ist – verbraucht der Motor keinen Kraftstoff.

Kann ein Fahrzeug bei negativer Straßenneigung allein durch die Wirkung von Luft- und Radwiderstand verzögert werden oder seine Fahrgeschwindigkeit beibehalten, so kann nicht im Schubetrieb gefahren werden. In diesem Fall wird der Motor durch die Kupplung vom Antriebsstrang getrennt und im Leerlauf betrieben (vgl. [5, S. 212]). Für den momentanen Streckenverlauf gilt dann

$$b_{100} = \frac{100}{v \text{ [km/h]}} \cdot b_{\text{leer}} \quad (5.15)$$

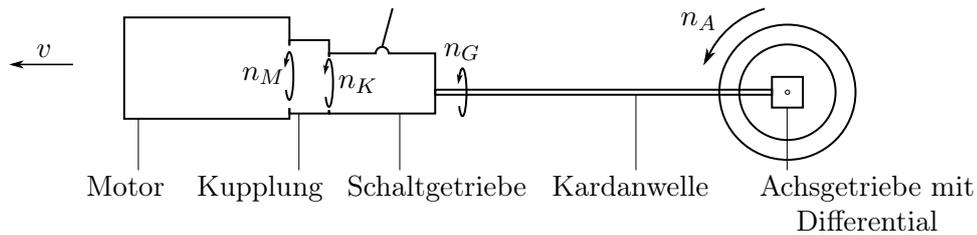
mit dem Leerlaufverbrauch  $b_{\text{leer}}$  in [L/h].

Bei der *Rekuperation* wird Bremsenergie zum Teil zurückgewonnen und gespeichert. Fahrzeuge mit Elektromotor können diesen als Generator nutzen und bei Bremsvorgängen die Batterie speisen. Die Energierückgewinnung stellt einen der Vorteile von Hybridfahrzeugen dar und darf bei detaillierten Modellen zur Verbrauchsberechnung nicht außer Acht gelassen werden.

### 5.3.4 Ermittlung des spezifischen Verbrauchs

Der Kraftstoffverbrauch wird durch den Betriebspunkt des Motors bestimmt (siehe Abschn. 5.2).

Die Motorleistung ist – sofern Schubetrieb und Rekuperation als Sonderfälle außer Acht gelassen werden – direkt von der Fahrwiderstandsleistung abhängig. Die Motordrehzahl als Funktion der Fahrgeschwindigkeit hängt von der mechanischen Ausführung des Antriebsstrangs ab. Dies ist in Abb. 5.3 dargestellt.



**Abbildung 5.3:** Schematischer Aufbau des Antriebsstrangs mit Reibungskupplung und mehrstufigem Getriebe. Abb. modifiziert nach [5, S. 175].

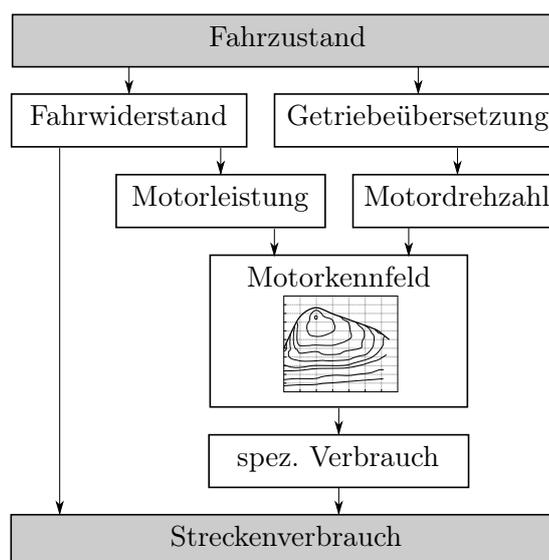
Die Motordrehzahl  $n_M$  entspricht im eingekuppelten Zustand der Kupplungsdrehzahl  $n_K$ , die durch

$$n_K = i_G \cdot i_T \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi \cdot r_A} \cdot \frac{v}{1 - \lambda_A} \quad (5.16)$$

aus der Fahrgeschwindigkeit  $v$  bestimmt werden kann (vgl. [5, S. 176]). Die *Übersetzung des Achsgetriebes*  $i_T$  und die *Übersetzung des aktuellen Ganges*  $i_G$  bestimmen unter Verwendung des *dynamischen Radhalbmessers*  $r_A$  das Verhältnis zwischen Fahrgeschwindigkeit und Motordrehzahl. Der Term  $(1 - \lambda_A)$  kennzeichnet die an den angetriebenen Rädern auftretenden Schlupfverluste.

Im realen Fahrbetrieb wird die Übersetzung so gewählt, dass in jeder Fahrsituation eine ausreichend große Motorleistung zur Verfügung steht, welche der Fahrwiderstandsleistung entspricht. Im Idealfall wird der Betriebspunkt des Motors zusätzlich stets in den Bereich des optimalen Wirkungsgrads, d. h. in den Bereich des geringsten Verbrauchs gebracht.

Während der Bewegung eines Fahrzeugs entlang einer Strecke  $S$  sind somit zu jedem Zeitpunkt die wesentlichen Größen des Motorkennfelds gegeben, woraus der *Streckenverbrauch*  $B_e$  durch Integration nach Gl. 5.11 ermittelt werden kann. Diese Vorgangsweise ist in Abb. 5.4 schematisch dargestellt und wird in professionellen Programmen zur Simulation von Emission und Verbrauch umgesetzt.



**Abbildung 5.4:** Ermittlung des Verbrauchs aus dem aktuellen Fahrzustand.

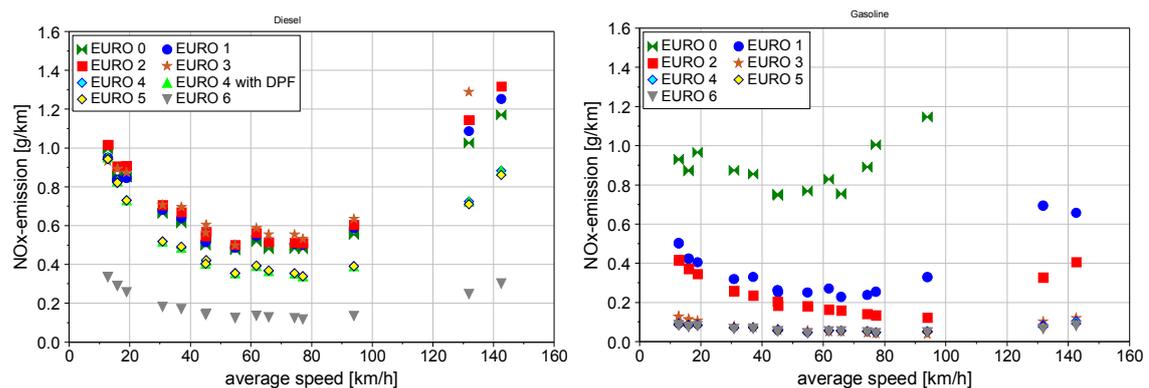
In dieser Arbeit wird für die Ermittlung des spezifischen Verbrauchs  $b_e$  auf ein vereinfachtes Modell zurückgegriffen. Aus der aktuellen Fahrgeschwindigkeit wird über eine Funktion der Wert von  $b_e$  berechnet. Hierbei werden Daten des Programms *PHEM* verwendet, das im Folgenden vorgestellt wird.

## PHEM

Das Programm PHEM wurde am *Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik* der Technischen Universität Graz konzipiert und wird im Zuge von Forschungsprojekten kontinuierlich weiterentwickelt. Das Akronym *PHEM* steht für *Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model*. Auf Basis bekannter Fahrzeugdaten werden hierbei Fahrzyklen simuliert, mit dem Ziel, exakte Daten über das Emissionsverhalten und den Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs zu gewinnen.

Abhängig von der durch einen Fahrzyklus vorgegebenen Fahrgeschwindigkeit, der Fahrbahnsteigung und allen relevanten Fahrwiderständen sowie den Verlusten im Antriebsstrang wird die Motorleistung mit einer hohen zeitlichen Auflösung ermittelt. Die Motordrehzahl wird auf Basis von Reifen- und Getriebedaten aus einem Gangschaltmodell gewonnen (vgl. [7, S. 13]). Als Resultat werden die zeitlichen Verläufe der Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs gewonnen. Diese werden aus Motorkennfeldern abgeleitet, die zuvor durch Tests auf Rollenprüfständen ermittelt werden.

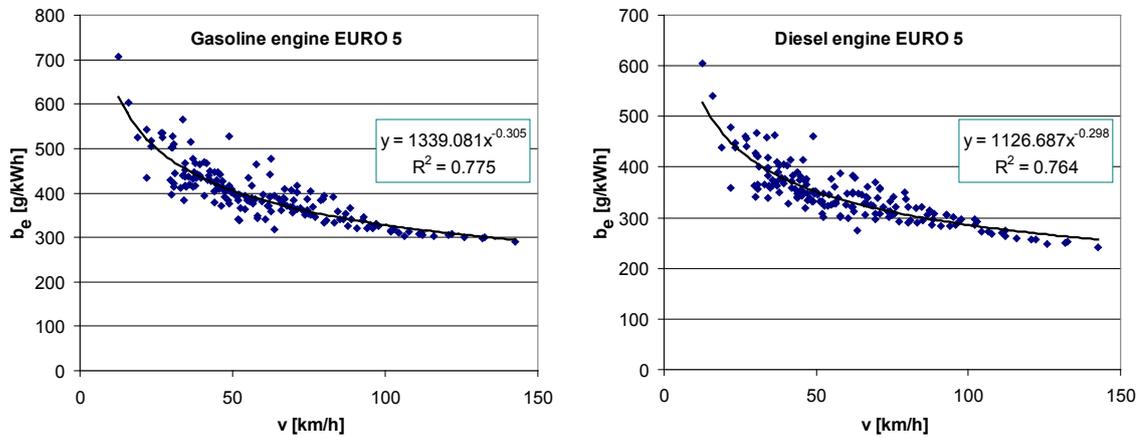
Die Daten über die ausgestoßenen Schadstoffe (*Kohlenmonoxid CO*, *Kohlendioxid CO<sub>2</sub>*, *Kohlenwasserstoffe HC*, *Stickoxid NO<sub>x</sub>*, *Stickstoffmonoxid NO*, *Partikelmasse PM* und *Partikelanzahl PN*) bilden die Grundlage für *HBEFA (Handbook of Emission Factors for Road Transport)* (siehe [30]). Dies ist ein von den Umweltbundesämtern verschiedener europäischer Staaten entwickelter Katalog zur Klassifizierung von Fahrzeugen nach ihren Emissionsfaktoren in [g/km] für alle reglementierten sowie eine Reihe von nichtreglementierten Schadstoffen. Die Emissionsfaktoren stehen für die gängigsten Fahrzeugtypen, differenziert nach Emissionskonzepten (Euro 0 bis Euro 6) sowie nach verschiedenen Verkehrssituationen zur Verfügung (siehe [31]). Ein Beispiel ist in Abb. 5.5 dargestellt.



**Abbildung 5.5:** Stickoxidemissionen für PKW mit Dieselmotor (l.) bzw. Benzinmotor (r.) auf Basis von PHEM. Quelle: [7, S. 37].

Neben den Emissionsdaten lassen sich aus PHEM auch Modelle zur Ermittlung verbrauchsbezogener Kenngrößen von Fahrzeugen ableiten. Bei der Simulation von Fahrzyklen werden Werte für die durchschnittliche Motorleistung und den Kraftstoffverbrauch gewonnen. Aus dem Kraftstoffverbrauch [g/km], der Fahrgeschwindigkeit [km/h] und der durchschnittlichen Motorleistung [kW] lässt sich der spezifische Verbrauch  $b_e$  [g/kWh] ab-

leiten. Wird der spezifische Verbrauch der einzelnen Verkehrssituationen über die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit aufgetragen, so lässt sich daraus durch Polynom-Anpassung ein funktionaler Zusammenhang herstellen (vgl. [11, S. 84]). In Abb. 5.6 ist der spezifische Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit der Geschwindigkeit beispielhaft dargestellt.



**Abbildung 5.6:** Spezifischer Kraftstoffverbrauch  $b_e$  [g/kWh] eines durchschnittlichen Benzinmotors (l.) bzw. Dieselmotors (r.) der Abgasnorm EURO 5 nach HBEFA 3.1 in Abhängigkeit der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit  $v$ . Abb. modifiziert nach [11, S. 84].

Der Wert für  $b_e$  wird in diesem Fall somit nicht über Motorkennfelder ermittelt, sondern direkt aus der Fahrgeschwindigkeit abgeleitet. Dies hat den Vorteil, dass kein Gangschaltmodell verwendet werden muss. Bei der Ermittlung des Streckenverbrauchs und der entsprechenden Kantenbewertung wird im Folgenden dieser Ansatz verfolgt (siehe Kap. 7).

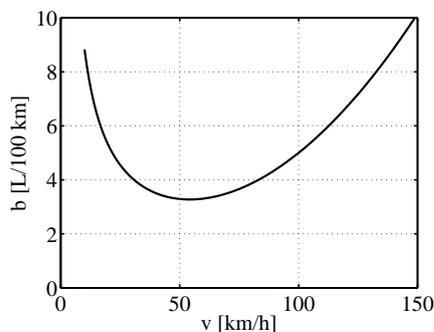
Durch Verwendung von Modellen für den spezifischen Kraftstoffverbrauch lässt sich der Verbrauch eines Fahrzeugs in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit ermitteln. Der Kraftstoffmassenstrom

$$\dot{m}_K \text{ [g/h]} = b_e \text{ [g/kWh]} \cdot P_M \text{ [kW]} \quad (5.17)$$

kann durch Berücksichtigung der Geschwindigkeit in [m/s] mittels

$$\dot{m}_K \text{ [g/km]} = \frac{b_e \cdot P_M}{3.6 \cdot v} \quad (5.18)$$

und durch Berücksichtigung der Kraftstoffdichte in den Verbrauch mit der gebräuchlicheren Einheit [L/100 km] übergeführt werden (vgl. [11, S. 83]). Dies ist in Abb. 5.7 dargestellt.



**Abbildung 5.7:** Kraftstoffverbrauch eines PKWs in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit.

# Kapitel 6

## Geodaten

### 6.1 Anforderungen

In Kap. 4 und 5 werden die Faktoren beschrieben, die den Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs bestimmen. Diese lassen sich mehr oder weniger eindeutig als fahrzeug-, fahrbahn- oder bewegungsabhängig klassifizieren. Dies ist in Tab. 6.1 dargestellt.

Zur Abschätzung des Verbrauchs in einer Software zur Routenplanung müssen für alle angeführten Größen möglichst realistische Werte bekannt sein. Die fahrzeugabhängigen Parameter werden als konstant betrachtet und sind für verschiedene Fahrzeuge gegeben. Entsprechende Referenzwerte sind in Anh. A angeführt. Die Größen in der rechten Spalte von Tab. 6.1 basieren im Wesentlichen auf einem Bewegungsmodell, das wie die fahrbahnabhängigen Faktoren in der mittleren Spalte in großem Maße von den verwendeten Geodaten abhängt.

Es besteht somit der Bedarf nach einem Straßenmodell, welches die folgenden Anforderungen erfüllt:

- Die Daten sollen im topologischen Sinn routingfähig sein. Spezialfälle wie Einbahnen und Abbiegeverbote sollen behandelt werden können.
- Auf Basis der Straßendaten sollen Bewegungsmodelle erstellt werden können. Hierzu müssen Informationen hinsichtlich Streckenverlauf und Streckengeschwindigkeiten vorliegen. Diese umfassen Angaben zu Kurven, Ortsgebieten, Kreuzungen, Ampeln u. a.
- Zur Ermittlung der Fahrwiderstände müssen Höhenprofile der Fahrstrecken bzw. die Geländetopographie bekannt sein.
- Die Genauigkeit in Lage und Höhe soll zudem ausreichend sein, um repräsentative

**Tabelle 6.1:** Die wichtigsten Größen bei der Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs.

Fahrzeug	Fahrbahn	Bewegung/Fahrzustand
Fahrzeugmasse $m$	Steigungswinkel $\alpha$	Geschwindigkeit $v$
Fahrzeugstirnfläche $A$	Rollwiderstandsbeiwert $f_R$	Längsbeschleunigung $a$
Luftwiderstandsbeiwert $c_W$	Luftdichte $\rho$	Querbeschleunigung $a_y$
Koeffizienten $f_{R0}, f_{R1}, f_{R4}$	Kurvenradius $R$	Spezifischer Verbrauch $b_e$
Drehmassenzuschlagsfaktor $\epsilon$		
Normverbrauch $b_{100}$		
Motorkennfeld $n_M/M_M$		Schwerebeschleunigung $g$

Werte für den Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs ableiten zu können. Dies wird in Kap. 8 genauer diskutiert.

Der Markt umfasst heute eine Vielzahl an privaten und öffentlichen Anbietern von Geodaten, deren Anschaffung durchwegs sehr kostenintensiv sein kann. Im Folgenden wird das Projekt OpenStreetMap als Quelle freier Straßendaten vorgestellt. Abseits des Kosten-Aspekts wird OpenStreetMap für diese Arbeit verwendet, da nahezu alle obigen Anforderungen erfüllt werden können. Zudem birgt ein solches Projekt im Kontext von „Web 2.0“ als Alternative zu Anbietern proprietärer Geodaten eine Reihe interessanter Möglichkeiten. Diesbezügliche Ansätze sowie die Vor- und Nachteile, die sich durch die Verwendung von OpenStreetMap-Daten ergeben, werden in Kap. 9 diskutiert.

## 6.2 OpenStreetMap

### 6.2.1 Allgemeines

Das Projekt *OpenStreetMap* wurde im Jahr 2004 mit dem Ziel initiiert, eine freie Weltkarte zu erstellen (vgl. [35]). Ähnlich wie bei der Internet-Enzyklopädie *Wikipedia* soll durch die Mitarbeit einer großen Anzahl an Freiwilligen eine Sammlung von Geodaten für die unterschiedlichsten Anwendungen erstellt werden. Dies wird als *Collaborative Effort* bezeichnet (vgl. [36]). Aus der anfänglichen Intention eine Straßenkarte zu erstellen, entwickelten sich rasch Ansätze zur Kartografierung eines breiteren Spektrums der realen Welt. So lassen sich heute aus den OpenStreetMap-Daten neben Straßenkarten eine Vielzahl an Spezialkarten für die unterschiedlichsten Bedürfnisse erstellen. OpenStreetMap wird heute als die größte freie Geodatenbank der Welt bezeichnet (vgl. [38]).

Die Konzeption und Betreuung von OpenStreetMap erfolgt durch die *OpenStreetMap Foundation*, eine in England und Wales eingetragene Non-Profit-Organisation (vgl. [37]). Die technische Infrastruktur ist von öffentlichen und privaten Geldgebern abhängig. So wird etwa der Großteil der Server-Infrastruktur vom *University College London* bereitgestellt (vgl. [6, S. 13]).

### 6.2.2 Lizenz

In den vergangenen Jahren etablierte sich im Internet eine Reihe von Anbietern, die qualitativ hochwertiges Kartenmaterial kostenlos zur Verfügung stellen. Als bekannteste Vertreter seien hier die Dienste *GoogleMaps* und *GoogleEarth*, *Yahoo Maps* oder *Microsoft Live Maps* genannt. Viele Anbieter waren und sind richtungsweisend bei der Umsetzung neuer Philosophien und Techniken hinsichtlich Darstellung und Benutzerfreundlichkeit (intuitiv zu bedienende zoombare Karten, Luftbildaufnahmen, Wahl der Betrachtungsrichtung usw.).

BenutzerInnen ist es gestattet, das Kartenmaterial zu betrachten bzw. darauf basierende Anwendungen (Adresssuche, Routing u. a.) zu nutzen. Es ist jedoch untersagt, Karten für externe Applikationen zu verwenden bzw. nicht möglich, über Schnittstellen auf die zugrundeliegenden Geodaten zuzugreifen. „Die Daten sind somit zwar *kostenlos*, nicht aber *frei* [13, S. 4]“. Dies resultiert aus der finanziell und technisch aufwendigen Akquisition geografischer Daten bzw. dem Zukauf und der Nutzung externer Geodaten von öffentlichen Institutionen oder privaten Anbietern wie *Tele Atlas* oder *NavTeq*.

OpenStreetMap beschreitet hierbei Neuland, indem die erfassten Daten unter der „*Creative Commons Attribution-ShareAlike*“-Lizenz in der Version 2.0 (kurz: CC-BY-SA 2.0) stehen (siehe [24]). Diese Lizenz besagt, dass die Daten beliebig vervielfältigt, verbreitet, weiterverarbeitet und öffentlich zugänglich gemacht werden dürfen. Dabei müssen die

RechteinhaberInnen genannt werden und ein aus den OpenStreetMap-Daten hergestelltes Werk darf wiederum nur unter der CC-BY-SA-Lizenz weitergegeben werden. Die Daten können somit frei genutzt und dürfen nachträglich keinen Nutzungseinschränkungen unterworfen werden (vgl. [13, S. 217]). Die Nennung der RechteinhaberInnen wird allgemein so ausgelegt, dass es ausreicht, eine Kartenveröffentlichung mit dem Vermerk „Copyright © <Jahreszahl> OpenStreetMap Contributors“ („OpenStreetMap-Mitwirkende“) zu kennzeichnen. Zusätzlich muss ein Hinweis auf die Lizenz untergebracht werden. AutorInnen und RechteinhaberInnen der Geodaten sind somit die einzelnen BenutzerInnen – nicht das OpenStreetMap-Projekt, welches die Daten lediglich sammelt. Trotzdem besagt die CC-BY-SA-Lizenz nicht, dass Bearbeitungen der OpenStreetMap-Daten kostenlos vertrieben werden müssen.

Aus der Sicht von Geodaten stellt die CC-BY-SA-Lizenz eine rechtliche Grauzone dar, da sie für kreative Werke gedacht ist und nicht für Sammlungen von Fakten. Selbst die Creative-Commons-Organisation rät mittlerweile ausdrücklich davon ab, die CC-Lizenzen für Datenbanken zu benutzen und empfiehlt stattdessen, Datenbanken unter eine dem „Public Domain“ vergleichbare Lizenz zu stellen (vgl. [35]). Da somit fast keine Bedingungen an die Nutzung der Daten gestellt werden, kommt dies für viele OSM-MapperInnen nicht in Frage. Die OpenStreetMap-Foundation strebt mittelfristig den Umstieg auf die *Open Database License (ODbL)* an, die an die EU-Datenbankrichtlinie angelehnt ist (vgl. [13, S. 221]). Dieser Schritt erfordert jedoch die Zustimmung aller OpenStreetMap-AutorInnen.

### 6.2.3 Datenakquisition und -bereitstellung

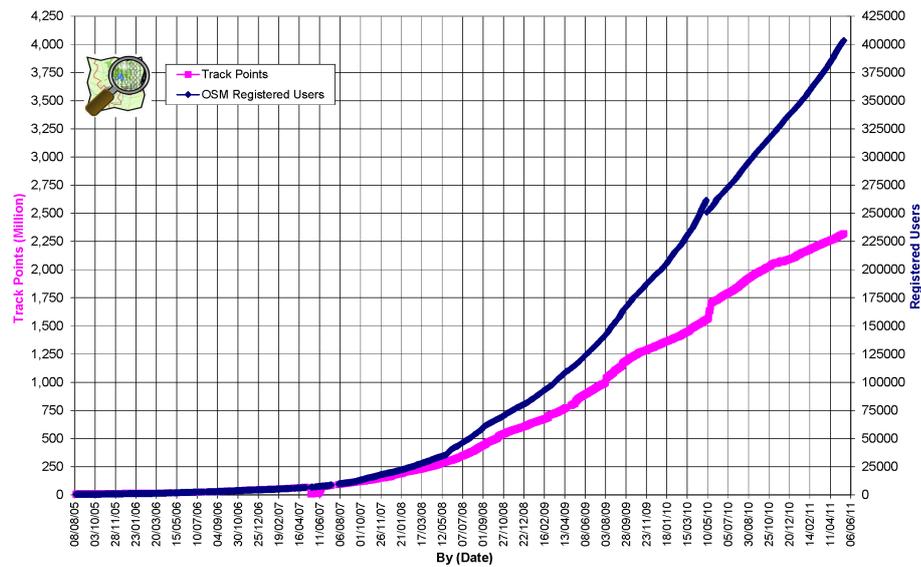
Die Erhebung aller in OpenStreetMap vorhandenen Geodaten erfolgt durch die *Community* des Projekts, d. h. durch registrierte BenutzerInnen. Das Gesamtprojekt OpenStreetMap wächst somit durch die konsequente Arbeit der einzelnen Mitwirkenden, was im Englischen treffend als *Community Mapping* bezeichnet wird (vgl. [35]). Seit dem Projektstart erhält OpenStreetMap großen Zuspruch, was sich in der Zunahme sowohl der Mitglieder als auch der Gesamtdatenmenge äußert. Die Anzahl der TeilnehmerInnen beträgt derzeit mehr als 400 000 (siehe Abb. 6.1).

Objekte der realen Welt in Form von Geodaten können auf verschiedene Arten in das System eingebracht werden (vgl. [38]):

- **In-situ-Vermessung:** Die häufigste Art der Datenaquisition besteht aus dem Erstellen von Tracks mittels handelsüblicher Handheld-GPS-Geräte. BenutzerInnen der OpenStreetMap-Community erfassen auf diese Weise Objekte mit den für GPS bzw. DGPS gegebenen Genauigkeiten.
- **Lokales Wissen:** Die Attributisierung in OpenStreetMap basiert oft auf der Kenntnis der örtlichen Gegebenheiten. Diese umfassen Straßennamen, die Lage von POIs, Verkehrseinschränkungen usw. Oft werden hierzu keine technischen Hilfsmittel benötigt.
- **Verwendung freigegebener Luftbilder und Geodaten:** Zur besseren Georeferenzierung können Orthofotos aus freigegebenen Quellen herangezogen werden. So sind etwa Aufnahmen von *Bing*, *Yahoo Aerial Imagery* und *Landsat* für die Verwendung zur Digitalisierung zugelassen. Die zugehörige Attributisierung muss jedoch durch die Ortskenntnis von Mitgliedern der Community erfolgen.

Eine Reihe von Staaten hat zudem Geodatenätze zur Verwendung in OpenStreetMap freigegeben.

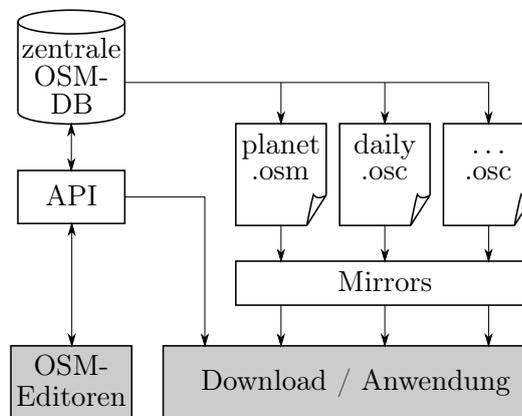
Zur Einbringung neuer sowie zur Korrektur bestehender Geodaten existieren mehrere



**Abbildung 6.1:** OpenStreetMap Datenbank-Statistik: Anzahl der hochgeladenen Trackpunkte und Anzahl der registrierten BenutzerInnen. Quelle: [36]

Online- und Offline-Editoren. Sowohl browsergestützte Applikationen wie *Potlach* oder *Potlach 2* als auch eigenständige Programme wie *JOSM* (*Java-OpenStreetMap-Editor*), *Merkaartor* oder *Osmosis* bieten hierzu eine Reihe von Funktionen. Die erfassten GPS-Tracks können editiert und an vorhandene Datenbestände angefügt werden. Die freigegebenen Orthofotos lassen sich zur händischen Digitalisierung einbinden. Zudem verfügen alle Applikationen über Möglichkeiten zum Editieren der Objektattribute.

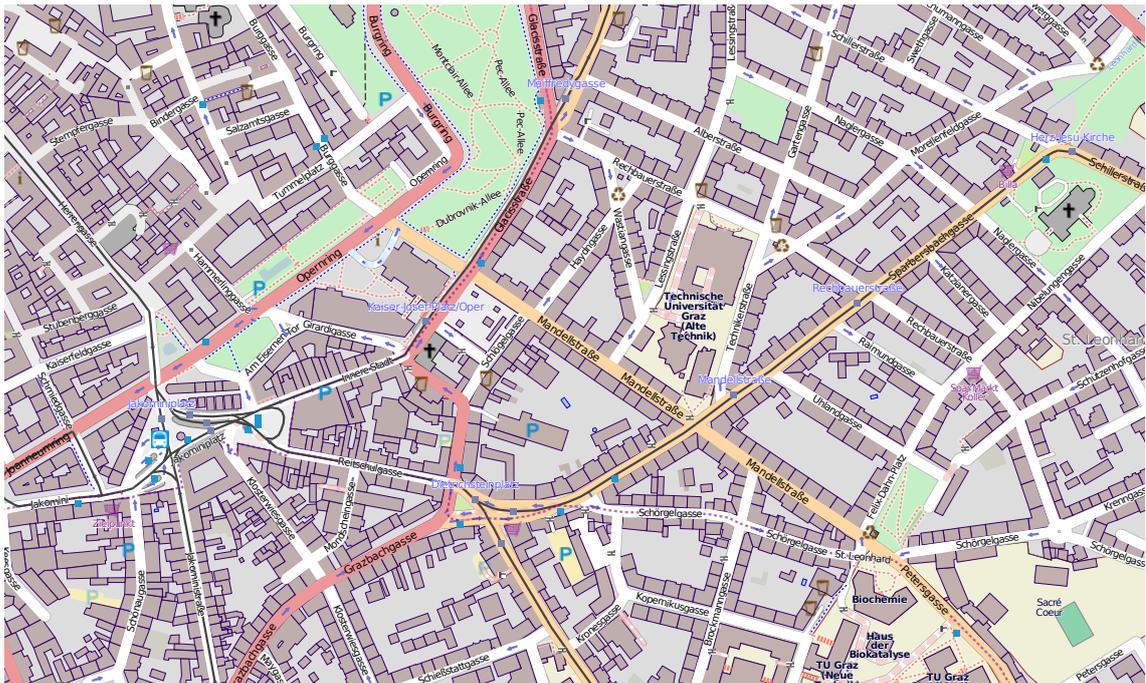
Für den Zugriff auf die OpenStreetMap-Daten existieren verschiedene Ansätze, die anwendungsabhängig sind. Eine zentrale Geodatenbank bildet das Hauptelement von OpenStreetMap und stellt die Daten in unterschiedlichen Formaten zur Verfügung. Der Zugriff auf die Geodatenbank erfolgt über die *OSM-API* (*Application Programming Interface*). Dieser Weg wird etwa von den verschiedenen Editoren gewählt. Zusätzlich werden regelmäßig Abzüge der Datenbank erstellt und in verschiedenen Formaten (z.B. XML oder Shape) über *Mirrors* (Spiegelserver) zum Download angeboten (vgl. [13, S.167]). Dieses Schema ist in Abb. 6.2 dargestellt.



**Abbildung 6.2:** Zentrale OpenStreetMap-Dienste. Abb. modifiziert nach [13, S.165]

Während die API nur einen eingeschränkten Datentransfer erlaubt, können etwa in Form von OSM-XML-Dateien (\*.osm) große Mengen an Rohdaten geladen und für eigene Zwecke verwendet werden. Wöchentlich aktualisierte *Planet-Dateien* beinhalten den Datenbestand der gesamten Erde. Viele Mirrors stellen neben den Planet-Dateien auch die täglich aktualisierten Datenbestände der meisten Länder der Erde als .osm-Dateien zum Download zur Verfügung. Änderungen zu Planet-Files werden in Form von .osc-Dateien (*OpenStreetMap Change*) publiziert (vgl. [13, S. 167]).

Die gebräuchlichste Anwendung von OpenStreetMap-Daten ist die Darstellung in Form einer zoom- und panningfähigen Karte. Diese wird in OpenStreetMap als „Slippy Map“ (*flinke Karte*) bezeichnet (vgl. [38]). Sowohl die Thematik als auch die grafische Ausprägung hängen von der Art der Anwendung und der verwendeten Render-Programme ab. Abb. 6.3 zeigt eine mittels *Mapnik* generierte Karte, wie sie auch auf der Hauptseite von OpenStreetMap dargestellt wird (siehe [36]). Mapnik als populäre Rendering-Engine kann als eine externe Applikation angesehen werden, welche aus den Datenbankabzügen Kacheln (engl. *Tiles*) im Rasterformat (z. B. PNG) erzeugt. Diese werden für verschiedene Zoomstufen vorberechnet und am Mapnik-Tile-Server für die Slippy Map bereit gehalten. Als weitere populäre Anwendung bietet auch *Osmarender* umfangreiche Funktionen zur Erstellung von Karten.



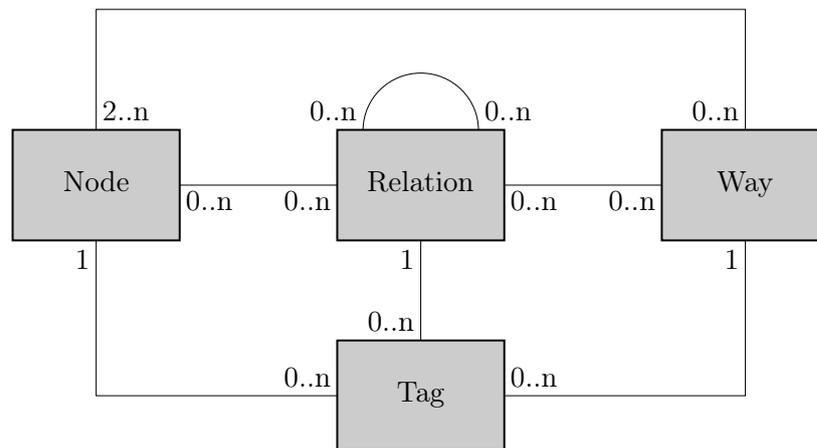
**Abbildung 6.3:** Ein mit Mapnik gerendertem Kartenausschnitt aus OpenStreetMap.  
© 2011 OpenStreetMap-Mitwirkende, CC-BY-SA.

### 6.2.4 OSM-Datenstruktur

Entsprechend der Grundlagen in Kap. 2 folgt OpenStreetMap dem objektorientierten Ansatz. Das OSM-Datenmodell beschreibt die Repräsentation von Objekten der realen Welt in der zentralen OSM-Datenbank und bildet zudem die Basis für das XML-Format, in dem OpenStreetMap-Daten ausgetauscht werden (vgl. [13, S. 226]).

Das Modell besteht im Wesentlichen aus punktförmigen und linienförmigen Objekten. Die entsprechenden Objekttypen werden als *Nodes* und *Ways* bezeichnet. Nodes umfassen sowohl Knoten und Polygonpunkte im graphentheoretischen Sinn (siehe Kap. 2), als auch sonstige POIs, die nicht Teil eines Graphen sind. Ways dienen neben der Modellierung von Straßen auch zur Repräsentation sämtlicher anderer linienförmiger Objekte. Zur Modellierung topologischer Beziehungen dienen *Relations*. Sie stellen Zusammenhänge zwischen Nodes und Ways bzw. auch zwischen Relations untereinander her.

Alle Elemente erhalten bei ihrer Erstellung eine eindeutige numerische Kennung (*ID*), wodurch die Referenzierung zwischen Objekten untereinander hergestellt wird. Die Attributisierung von Objekten erfolgt durch *Tags*. Ein Tag besteht aus *Key* (*Schlüssel*) und *Value* (*Wert*). In Abb. 6.4 sind die Elemente des OSM-Datenmodells mit ihren Relationen und der zugehörigen Kardinalität dargestellt. Dem zufolge ist jeder Node Teil von 0 bis n Ways und jeder Way benutzt 2 bis n Nodes. Jeder Node, jeder Way und jede Relation kann 0 bis n Tags besitzen. Relations können Nodes, Ways und Relations selbst zu Gruppen zusammenfassen. Dementsprechend kann jeder Node, jeder Way und jede Relation Teil von 0 bis n Relations sein.



**Abbildung 6.4:** Vereinfachte Darstellung des aktuellen OpenStreetMap-Datenmodells. Abb. modifiziert nach. [13, S. 50]

Der Austausch von OpenStreetMap-Daten erfolgt zumeist im OSM-XML-Format. Ähnlich wie GML, KML usw. ist dies ein auf XML basierender Standard, der auf die Bedürfnisse der OpenStreetMap-Struktur abgestimmt ist. Die Planet-Files bzw. die Geodaten großer Bereiche stehen in diesem Textformat zur Verfügung. Eine .osm-Datei enthält neben Angaben über die räumliche Ausdehnung im Wesentlichen alle Nodes, Ways und Relations in gegebener Reihenfolge. Dies ist im folgenden Beispiel dargestellt:

```

21 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
22 <osm version="0.6" generator="CGImap 0.0.2">
23   <bounds minlat="47.0630600" minlon="15.4499800" maxlat="47.0655300" maxlon
   = "15.4552600"/>
24   <node id="20911108" ...>
25     ...
26   </node>
27   ...
28   <way id="83054319" ...>
29     ...
30   </way>

```

```

31  ...
32  <relation id="963723" ...>
33  ...
34  </relation>
35  ...

```

## Nodes

Nodes stellen als Träger der geometrischen Information das Grundgerüst für sämtliche Objekte in OpenStreetMap dar. „Ein Node verfügt über die folgenden Informationen:

- geographische Länge und Breite,
- Zeitpunkt der letzten Änderung, Benutzernummer und -kennung des letzten Bearbeiters, Verweis auf das Changeset, innerhalb dessen die letzte Änderung erfolgte,
- optional eine beliebige Menge von Tags. [13, S. 50]“

Die Speicherung von Länge und Breite erfolgt mit sieben Nachkommastellen, wodurch theoretisch eine Lagegenauigkeit von  $\pm 1$  cm erreicht werden kann (vgl. [13, S. 50]). Aufgrund der Affinität zu GPS fungiert als geodätisches Datum das Referenzsystem *WGS-84* (*World Geodetic System 1984*). Im Folgenden ist ein Beispiel für einen Node dargestellt:

```

1 <node id="993870979" lat="47.0640173" lon="15.4497051" user="a_uller" uid="9605"
   visible="true" version="1" changeset="6401817" timestamp="2010-11-18T19:28:06Z">
2   <tag k="crossing" v="uncontrolled"/>
3   <tag k="crossing_ref" v="zebra"/>
4   <tag k="highway" v="crossing"/>
5 </node>

```

Häufig dienen Nodes als Stütz- bzw. Polygonpunkte für Ways, weshalb sie oft keine Tags beinhalten. Der im Beispiel dargestellte Node besitzt drei Tags, aus denen die Kennzeichnung als Fußgängerübergang hervorgeht.

## Ways

Ein Way verfügt ähnlich wie ein Knoten über die folgenden Informationen:

- „geordnete Liste von mindestens zwei Nodes,
- Zeitpunkt der letzten Änderung, Benutzernummer und -kennung des letzten Bearbeiters, Verweis auf das Changeset, innerhalb dessen die letzte Änderung erfolgte,
- optional eine beliebige Menge von Tags. [13, S. 51]“

Ways dienen zur Abbildung linienförmiger Objekte (Straßen, Eisenbahnlinien, Flüsse usw.) und haben durch die Reihenfolge der Nodes stets eine Richtung, die allerdings nicht immer von Bedeutung ist. Stimmen Anfangs- und Endnode überein, so werden Ways als Flächen interpretiert. Auf diese Weise können stehende Gewässer, Vegetationsgrenzen, Plätze, Bauwerke usw. modelliert werden.

```

1 <way id="31988051" user="species" uid="321042" visible="true" version="4" changeset
   ="7999678" timestamp="2011-04-28T23:58:13Z">
2   <nd ref="85875877"/>
3   <nd ref="975907009"/>
4   <nd ref="358489624"/>
5   <nd ref="975906966"/>
6   <nd ref="358489489"/>
7   <tag k="highway" v="footway"/>
8   <tag k="surface" v="paved"/>
9 </way>

```

Bei diesem Beispiel handelt es sich um einen Fußweg (ersichtlich am „highway“-Tag), der durch fünf Stützpunkte gebildet wird. Die Punkte werden durch ihre ID eindeutig bestimmt (Zeilen 2 - 6).

## Relations

„Eine Relation verfügt über die folgenden Informationen:

- Eine sortierte Liste beliebig vieler Teilnehmer (Members) der Relation zusammen mit einer Rollen-Angabe,
- Zeitpunkt der letzten Änderung, Benutzernummer und -kennung des letzten Bearbeiters, Verweis auf das Changeset, innerhalb dessen die letzte Änderung erfolgte,
- optional eine beliebige Menge von Tags. [13, S. 52]“

Teilnehmer einer Relation können Nodes, Ways und auch Relations sein. Relations dienen zur Modellierung von Beziehungen zwischen Objekten untereinander. Als Beispiel ist im Folgenden die Definition eines Linksabbiegeverbots angeführt:

```

1 <relation id="29426" user="species" uid="321042" visible="true" version="5" changeset
  = "7927982" timestamp="2011-04-21T18:37:43Z">
2   <member type="node" ref="20929481" role="via"/>
3   <member type="way" ref="3997699" role="from"/>
4   <member type="way" ref="26543826" role="to"/>
5   <tag k="restriction" v="no_left_turn"/>
6   <tag k="type" v="restriction"/>
7 </relation>

```

Weitere typische Funktionen von Relations sind die Kennzeichnung von Straßenzügen, die aus mehreren einzelnen Ways bestehen (z. B. eine Autobahn), oder die Modellierung von Linien des öffentlichen Verkehrs.

### 6.2.5 OSM Map Features

Wie aus den gezeigten Beispielen ersichtlich ist, wird der Typ von Objekten durch seine Tags festgelegt. Objekte, die auf einer Karte abhängig von ihrem Typ dargestellt werden, werden als *Map Features* bezeichnet.

Voraussetzung zur korrekten Darstellung der Map Features in Render-Programmen ist die richtige Attributisierung erfasster Objekte. Die Entwicklung geeigneter Tags erfolgte im Projekt OpenStreetMap seit seiner Gründung allein durch die Community in Form stetiger Diskussions- und Überarbeitungsprozesse. Es gibt nach wie vor keine Liste „erlaubter Tags“, d. h. alle am Projekt Mitwirkenden dürfen alles so auszeichnen, wie sie es für richtig halten. Diese Vorgangsweise stellt einen wichtigen Pfeiler des Projekterfolgs dar, da es den Mappern auf diese Weise möglich war, unkompliziert und ohne eine zentrale Autorität die Tags einzuführen, die gebraucht wurden (vgl. [13, S. 59]).

Über die Dauer des Projekts entwickelte sich – auch durch Vorgaben der Rendering-Engines – konsensual eine Systematik zur Attributisierung von Objekten. Vorschläge zur Erweiterung oder Änderung von Tags (*Proposed Features*) werden laufend eingebracht und von der Community diskutiert. Auf der OSM-Wiki-Seite findet sich eine detaillierte Aufschlüsselung aller aktuellen Map Features mit ihren Tags (siehe [38]). In Tab. 6.2 sind die wichtigsten Keys zur Klassifizierung von Objekten angeführt. Diese können sich auf Nodes, Ways und Relations beziehen. Abseits dieser Keys zur groben Klassifizierung wird für die meisten Objekte eine Vielzahl weiterer Tags angegeben.

Die auf Straßen bezogenen Map Features bilden in OpenStreetMap die umfangreichste Gruppe. In dieser Arbeit werden nahezu ausschließlich Objekte der Kategorie „highway“

**Tabelle 6.2:** Auswahl der wichtigsten Map Features von OpenStreetMap. Quelle: [38]

Key	Beschreibung
highway	Kennzeichnung von Straßen und Wegen
railway	Kennzeichnung von Eisenbahnlinien
aeroway	Kennzeichnung von Flugplätzen
man_made	Kennzeichnung von sonstigen künstlich erzeugten Objekten
amenity	Kennzeichnung von POIs und Freizeitanlagen
shop	Kennzeichnung von Geschäften
landuse	Kennzeichnung der Verwendung von Flächen
natural	Kennzeichnung natürlicher Gegebenheiten

verwendet. Die genaue Vorgangsweise beim Import von OpenStreetMap-Daten sowie deren Aufbereitung wird in in Kap. 7 erklärt.

### 6.3 Höhendaten

Viele Anwendungen der Navigation setzen das Vorhandensein dreidimensionaler Geodaten voraus. In Kap. 4 wird gezeigt, dass etwa zur Ermittlung des Steigungswiderstands die Neigung der Fahrbahn bzw. ein Höhenprofil bekannt sein muss. Dies setzt voraus, dass Knoten und Polygonpunkte eines Straßengraphen neben ihrer Lageinformation auch mit einer Höhe versehen sind.

In OpenStreetMap beschränken sich die Daten derzeit weitestgehend auf den zweidimensionalen Raum (vgl. [36]). Der Höheninformation der Nodes wurde anfangs weniger Beachtung als ihrer lagerichtigen Erfassung geschenkt. Mittlerweile existieren auch Tags zur Verspeicherung von Geländehöhen, die bisher jedoch nur in geringem Umfang genutzt wurden. Neben der Erfassung bekannter Daten von Festpunkten inkl. ihres Höhenbezugs-systems werden die durch GPS-Geräte ermittelten ellipsoidischen Höhen (welche oft durch barometrische Sensoren gestützt werden) in die OSM-Datenbank eingebracht. Die auf diese Weise erreichbaren Genauigkeiten sind in dieser Arbeit nicht Gegenstand der Diskussion. Zusammengefasst kann OpenStreetMap zum aktuellen Zeitpunkt keine flächendeckenden Daten mit Geländehöhen bereitstellen. Informationen wie sie etwa zur Ableitung der Steigung von Straßen erforderlich sind, können nur durch Verwendung weiterer Geodatenquellen gewonnen werden. Entsprechende Ansätze werden im Folgenden vorgestellt.

#### 6.3.1 BEV-Datensatz

Das österreichische *Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV)* bietet eine breite Palette an Geodaten zum Verkauf an. Neben Katasterdaten, Festpunkten und Orthophotos können vom BEV auch Höhendaten erworben werden. Hierzu stehen digitale Geländemodelle mit Rasterweiten von 10 m, 25 m und 50 m (kostenpflichtig) bzw. 100 m, 250 m und 500 m (kostenlos) zur Verfügung (siehe [23]). Das Höhenmodell basiert auf photogrammetrischen Auswertungen, die abhängig von der Topographie in einem Raster von  $30 \times 30$  m bis  $160 \times 160$  m durchgeführt wurden (vgl. [4, S. 123]). Daraus wurden die Höhen auf die geforderte Gitterweite interpoliert.

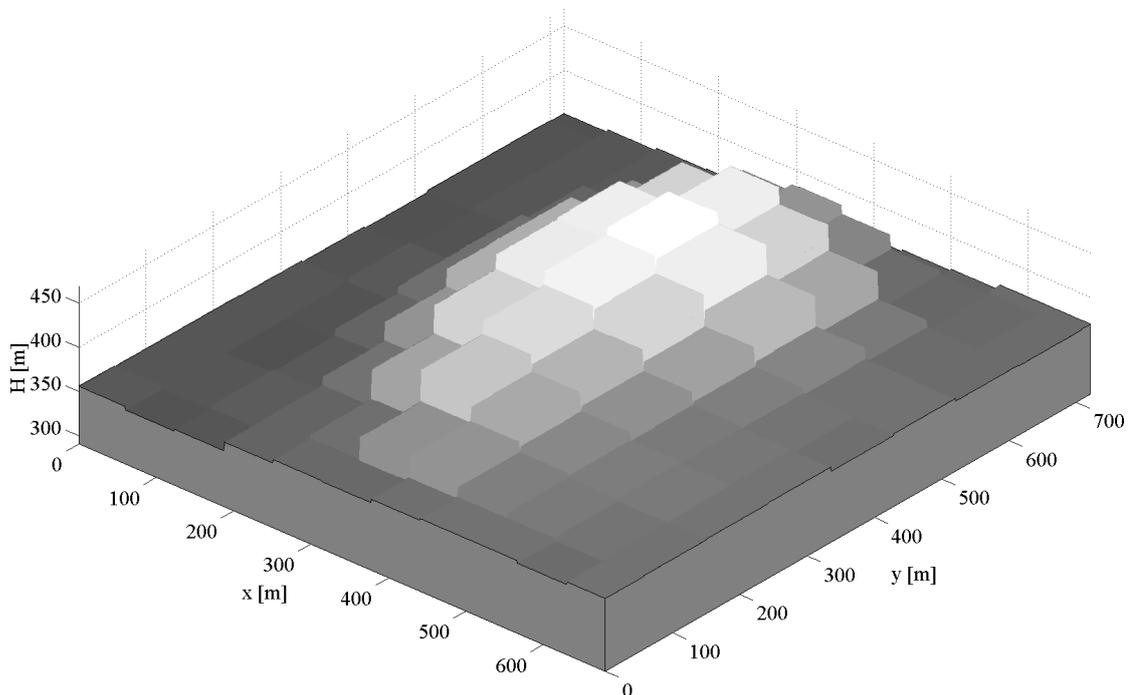
Für diese Arbeit werden die BEV-Höhendaten eines Gebiets von ca.  $40 \times 40$  km um Graz verwendet. Die entsprechenden Daten mit einer Rasterweite von 50 m wurden vom Insitut für Navigation der Technischen Universität Graz für Anwendungen in der Lehre

erworben. Bei den vom BEV bezogenen Höhen handelt es sich um orthometrische Höhen (Gebrauchshöhen), die sich auf den Pegel von Triest beziehen. Die Höhengenaugigkeit des Geländemodells wird bei normaler Topographie mit 2 bis 5 m angegeben (vgl. [4, S. 125]).

### 6.3.2 SRTM

Die *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* wurde im Februar 2000 gemeinsam von *NASA (National Aeronautics and Space Administration)*, *DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)*, *ASI (Agenzia Spaziale Italiana)* und *NGA (National Geospatial-Intelligence Agency)* durchgeführt. Ziel des Projekts war es, im Zuge der Space-Shuttle-Mission STS-99 mittels Radarinterferometrie ein einheitliches DGM von großen Teilen der Erdoberfläche zu erstellen. Zu diesem Zweck wurden SAR-Systeme (*Synthetic Aperture Radar*) im C- und X-Band verwendet (siehe [32]). Während der zehntägigen Missionsdauer des Shuttles *Endeavour* konnten so 80 % der Landmassen der Erde erfasst werden.

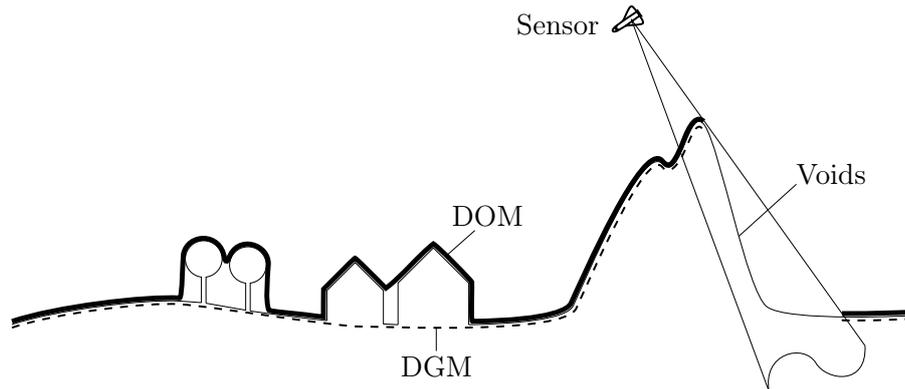
Nach ihrer Aufbereitung wurden die Daten der SRTM-Mission vom *United States Geological Survey (USGS)* teilweise als Public Domain veröffentlicht. Das Geländemodell steht in Form von Rasterdaten mit unterschiedlichen Auflösungen zur Verfügung. Für Gebiete außerhalb der USA ist der SRTM-3-Datensatz in der aktuellen Version 2.1 verfügbar. Die horizontale Auflösung beträgt hierbei 3 Bogensekunden, was in mitteleuropäischen Breiten einer Zellengröße von ca.  $60 \times 90$  m entspricht. Ein mittels SRTM-3-Daten erstelltes Höhenmodell ist in Abb. 6.5 dargestellt.



**Abbildung 6.5:** Beispiel für ein digitales Geländemodell auf Basis von SRTM-Daten.

Als horizontales Bezugssystem dient WGS-84. Der absolute Fehler in der Lage wird für Europa mit 8,8 m (90 %-Konfidenzniveau) angegeben (vgl. [15, S. 9]). Die SRTM-Höhen beziehen sich auf das vertikale Datum *EGM96 (Earth Gravitational Model 1996)*. Die Höhengenaugigkeit beträgt global 1 m. Der mittlere Fehler der absoluten Höhe beträgt in Europa 6,2 m (90 %-Konfidenzniveau) (vgl. [15, S. 9]).

SRTM-Daten gelten nicht als DGM im herkömmlichen Sinn, da durch die Verwendung von Radar auch Bauwerke und Vegetation im Modell enthalten sind. Es handelt sich somit um ein *Digitales Oberflächenmodell (DOM)*. Dies muss bei der Verwendung von SRTM berücksichtigt werden. Repräsentative Straßenhöhen etwa lassen sich in Bereichen dichter Bebauung oder Vegetation nur schwer ableiten. Die Abdeckung der Erdoberfläche ist zudem nicht vollständig. Durch die geometrische Konstellation Sensor-Erdoberfläche wurden z. B. steile Bergrücken nicht erfasst. Dies äußert sich in Datenlücken („Voids“), die bei Bedarf korrigiert werden müssen (siehe Abb. 6.6).



**Abbildung 6.6:** Schematische Darstellung von digitalem Geländemodell (DGM) und digitalem Oberflächenmodell (DOM). Die bei SRTM systemimmanente Entstehung von Datenlücken („Voids“) ist rechts schematisch dargestellt.

# Kapitel 7

## Softwareentwicklung

Im Zuge dieser Masterarbeit wurde ein Programm erstellt, mittels dessen sämtliche Aufgaben zur Datenaufbereitung, Graphenbewertung und Routenplanung durchgeführt werden können.

In diesem Kapitel werden die Programmfunktionen theoretisch erklärt. Genaue Erläuterungen zur programmiertechnischen Umsetzung der einzelnen Routinen sowie Details zur Programmstruktur sind in Anh. B angeführt. Die Software ist in Form einer CD-ROM beigelegt (siehe Anh. D).

### 7.1 Einlesen von OpenStreetMap-Daten

Entsprechend Kap. 6 werden die umfangreichen OpenStreetMap-Daten als regelmäßig aktualisierte .osm-Dateien zum Download bereitgestellt. Dateien in diesem XML-Format können von einer Reihe von Mirrors für eine Vielzahl unterschiedlicher räumlicher Bereiche bezogen werden.

In dieser Arbeit stellt der Datensatz von Österreich die Grundlage dar. Als entsprechender Abzug der OpenStreetMap-Datenbank wird die Datei *austria.osm* des OSM-Geodatenanbieters *Geofabrik* verwendet (siehe [27]). Zum Zeitpunkt des Downloads betrug der Umfang der Datei *austria.osm* 12 557 678 Nodes und 1 154 410 Ways bei einer Dateigröße von 2,45 GB.

OpenStreetMap beinhaltet nicht nur Straßendaten und verkehrsrelevante Informationen, sondern sämtliche natürlichen und künstlichen Objekte. Daher müssen aus dem Gesamtdatensatz die Daten extrahiert werden, die für die gegebene Routing-Anwendung relevant sind.

#### 7.1.1 Straßendaten

Zur Generierung eines routingfähigen Straßennetzes werden Map Features aus allen drei Hauptgruppen der OSM-Datenstruktur (Nodes, Ways und Relations) benötigt.

##### Nodes

Nodes stellen das Grundgerüst der Datenstruktur dar, da sie u. a. Träger der geometrischen Information sind. Aus dem Gesamtdatensatz werden einerseits diejenigen Nodes ausgewählt, welche Stützpunkte von Straßen repräsentieren. Im graphentheoretischen Sinn sind dies Knoten und Polygonpunkte (siehe Kap. 2). Die verwendeten Attribute sind die ID des Nodes („id“), die geographische Breite („lat“) und die geographische Länge („lon“),

wie sie in der ersten Zeile jedes Nodes enthalten sind:

```
1 <node id="26514720" lat="47.0697210" lon="15.4499985" user="thengineer" uid="310 ...
```

Andererseits werden Nodes selektiert, welche topologisch nicht Teil des Straßennetzes sind, aber zusätzliche verkehrsrelevante Informationen besitzen („Isolierte Knoten“). Neben der ID und der Position werden hierbei die in Tab. 7.1 angeführten Tags berücksichtigt. Die so gekennzeichneten Nodes stellen zum Großteil Verkehrszeichen dar, welche die Bewegung eines Fahrzeugs beeinflussen. Geschwindigkeitsbeschränkungen sind in den meisten Fällen durch Tags von Way-Objekten modelliert (siehe unten).

**Tabelle 7.1:** Verwendete Tags von Nodes mit verkehrsrelevanter Bedeutung.

Key	Value	Beschreibung
highway	mini_roundabout	Kreisverkehr mit kleinen Abmessungen
highway	stop	Stoppschild
highway	give_way	Vorrang geben
highway	traffic_signals	Ampel
highway	crossing	Fußgängerübergang
highway	motorway_junction	Autobahnauf-/abfahrt
traffic_sign	city_limit	Ortsschild

## Ways

Mittels Ways werden in OpenStreetMap sämtliche linienförmigen Objekte modelliert. Als primäre Daten werden die ID des Ways („id“) sowie die IDs der Stützpunkte („nd ref“) extrahiert. Diese Informationen sind am Anfang eines Way-Blocks enthalten:

```
1 <way id="4014535" user="data_at" uid="491845" visible="true" version="13" change ...
2 <nd ref="274089501"/>
3 <nd ref="1253038364"/>
4 <nd ref="20929584"/>
5 ...
```

Die für diese Routinganwendung benötigten Straßen sind in der Datenstruktur als Ways mit entsprechenden Tags enthalten. Straßen aller Art besitzen Tags mit dem Key „highway“ sowie einem zugehörigen Value, der auf den Straßentyp schließen lässt. Im Programm werden so alle *Highways*, d. h. die Straßen aus der Menge der Ways extrahiert. In der Folge lässt sich die Menge der tatsächlich benötigten Nodes ableiten. Tab. 7.2 zeigt die verwendeten Tags zur Auswahl von Straßen aus dem OSM-Gesamtdatensatz.

Die umfangreiche Abstufung der Values in Tab. 7.2 resultiert aus dem Streben nach einem Datenmodell, das sich für möglichst alle Länder der Erde eignet. Zusätzliche länderspezifische Informationen werden in OpenStreetMap oft durch weitere individuelle Tags gekennzeichnet. Eine österreichische Bundesstraße (bzw. hochrangige Landesstraße) etwa entspricht in den meisten Fällen einem „highway“ mit dem Value „primary“. Durch den Wiki-Charakter von OpenStreetMap ist hier jedoch nicht immer Einheitlichkeit gegeben (siehe Kap. 6).

Zum Aufbau einer routingfähigen Struktur sind weitere Informationen über Straßen notwendig: Die Markierung einer Straße als Einbahnstraße erfolgt durch den Key „one-way“. Eine Einbahn wird auch durch den häufig vorkommenden Fall eines Kreisverkehrs impliziert. Ein geschlossener Way dient zur Modellierung eines Platzes und wird mit dem

**Tabelle 7.2:** Verwendete Tags von Ways.

Key	Value	Beschreibung
highway	motorway	Autobahn
highway	motorway_link	Autobahnzubringer
highway	trunk	Schnellstraße
highway	trunk_link	Schnellstraßen-Zubringer
highway	primary	Hauptstraße 1. Ordnung
highway	primary_link	Zubringer zu Hauptstraße 1. Ordnung
highway	secondary	Hauptstraße 2. Ordnung
highway	secondary_link	Zubringer zu Hauptstraße 2. Ordnung
highway	tertiary	Hauptstraße 3. Ordnung
highway	residential	Straße im Stadt- oder Ortsgebiet
highway	unclassified	Nicht klassifizierte Straße
highway	road	Allgemeine Straße
highway	living_street	Wohnstraße
highway	service	Zubringerweg
highway	track	Feldweg
highway	pedestrian	Fußgängerweg /-zone

Key „area“ gekennzeichnet. Von Interesse sind weiters die Kennzeichnung von Brücken und Tunnels. Die hierzu verwendeten Tags sind in Tab. 7.3 angeführt.

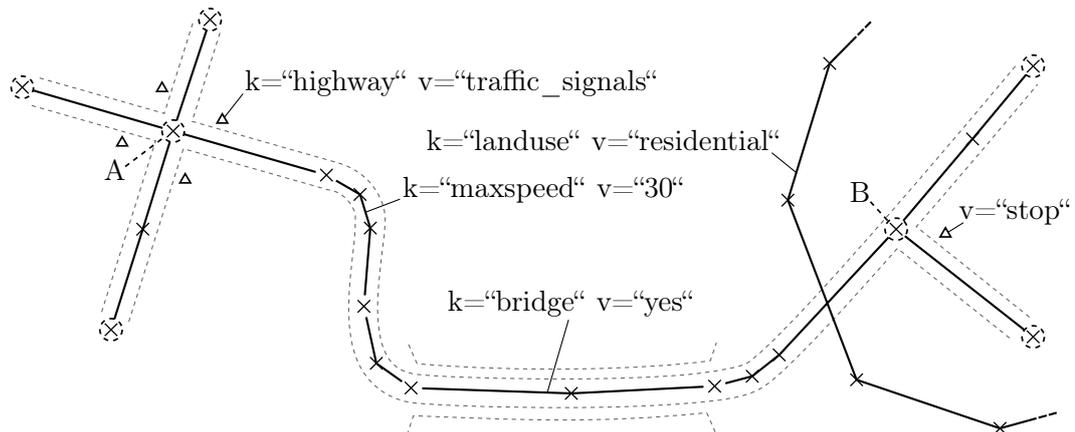
**Tabelle 7.3:** Tags mit weiteren Informationen über Highways.

Key	Value	Beschreibung
oneway	yes	Einbahnstraße
junction	roundabout	Kreisverkehr
bridge	yes	Brücke
tunnel	yes	Tunnel
area	yes	Platz/Fläche
maxspeed	[Wert]	Höchstgeschwindigkeit
at:maxspeed	Ortsgebiet	Höchstgeschwindigkeit innerorts

Von großem Interesse für die Fahrzeugbewegung, aus der sich die Fahrzeit und in weiterer Folge der Verbrauch ableiten lässt (siehe Abschn. 7.3), sind die entsprechenden Angaben zur Höchstgeschwindigkeit. Diese werden für einen Way mittels entsprechender Tags angegeben, so wie dies in Tab. 7.3 dargestellt ist. Trotz ständiger Verbesserungs- und Überarbeitungsprozesse von OpenStreetMap kann die Angabe von Streckenhöchstgeschwindigkeiten in Form von Tags derzeit nicht als einheitlich und vollständig angesehen werden. Bei fehlender Attributisierung hinsichtlich der Höchstgeschwindigkeit müssen als zusätzliche Objekte Ortsgebiete zur Ableitung der Streckenhöchstgeschwindigkeit herangezogen werden (siehe Abschn. 7.1.2).

Nach dem Einlesen der Rohdaten werden einige Charakteristika des OpenStreetMap-Projekts deutlich: Die Daten wurden (zumindest anfänglich) vordergründig zu Zwecken der Visualisierung erfasst. Bei der Betrachtung der Straßen zeigt sich, dass ein durch thematische Selektion aus den Ways gewonnener Highway nicht zwangsläufig der Kante ei-

nes Straßennetzes im graphentheoretischen Sinn entspricht. Die Verbindung zwischen zwei Kreuzungen kann in OpenStreetMap mitunter aus einer Vielzahl von aneinandergereihten Highways bestehen. Dies wird etwa durch die Modellierung von Geschwindigkeitsbeschränkungen oder Brücken hervorgerufen (siehe Abb. 7.1). Zusätzlich wird vorerst nicht zwischen Knoten und Polygonpunkten im graphentheoretischen Sinn unterschieden. In vielen Fällen entsprechen Anfangs- und Endnode eines Ways zwar den Knoten des Graphen, zur Herstellung der Routingfähigkeit sind allerdings weitere Schritte notwendig (siehe Abschn. 7.2).



**Abbildung 7.1:** Beispielhafte Darstellung von OpenStreetMap-Rohdaten mit charakteristischen Tags. Die Kreuze symbolisieren Nodes als Stützpunkte von Ways, die Dreiecke stehen für isolierte, verkehrsbezogene Knoten. Die strichlierten Ringe markieren Knoten im graphentheoretischen Sinn. Es ist ersichtlich, dass die Verbindung zwischen zwei Knoten aus mehreren Highways bestehen kann, wie dies zwischen den Knoten A und B der Fall ist.

## Relations

Wie in Kap. 6 erwähnt, dienen Relations zur Modellierung von Beziehungen zwischen Objekten untereinander. Eine Relation kann etwa die einzelnen Teilstücke einer Straße zusammenfassen.

In Routinganwendungen spielt die Modellierung von Fahrvorschriften eine große Rolle. Diese werden in OpenStreetMap als *Restrictions* bezeichnet und bestehen aus einer Relation mit dem Tag „type=restriction“ zusammen mit einer Angabe über die betreffende Kreuzung und die involvierten Kanten. Das Modell der Restrictions kann direkt in das Konzept der Traversen übergeführt werden (siehe Kap. 3). Die Art der Restriction wird durch ein weiteres Tag festgelegt. Die bei der Umsetzung dieses Programms erfassten Restrictions sind mit ihren Tags in Tab. 7.4 angeführt.

### 7.1.2 Ortsgebiete

Wegen der oft unvollständigen Attributisierung von Highways müssen zur Ableitung der Höchstgeschwindigkeit weitere Informationen aus dem OpenStreetMap-Datensatz verwendet werden. Speziell innerhalb von Ortsgebieten tragen Straßen oft keine Tags zur Markierung der höchstzulässigen Fahrgeschwindigkeit. Ortsgebiete – und die mit ihnen einhergehende Reduzierung der Geschwindigkeit – werden in OpenStreetMap durch Nodes (siehe oben) oder Flächen (geschlossene Ways) gekennzeichnet. Die entsprechenden Ways werden mit dem Tag „landuse=residential“ gekennzeichnet. Dies ist in Abb. 7.1 dargestellt.

**Tabelle 7.4:** Tags zur Klassifizierung von Restrictions.

Key	Value	Beschreibung
restriction	no_left_turn	Linksabbiegeverbot
restriction	no_right_turn	Rechtsabbiegeverbot
restriction	no_straight_on	Geradeausfahrverbot
restriction	no_u_turn	Umkehrverbot
restriction	only_right_turn	Rechtsabbiegevorschrift
restriction	only_left_turn	Linksabbiegevorschrift
restriction	only_straight_on	Geradeausfahrvorschrift

Durch die stetige Aktualisierung und Überarbeitung des Datenbestands durch die OSM-MitarbeiterInnen besteht durchaus Aussicht auf Verbesserung der Attributisierung der Straßen.

## 7.2 Datenaufbereitung

Um eine Anwendung zur Ermittlung der energieeffizientesten Route erstellen zu können, müssen die aus einer .osm-Datei eingelesenen Rohdaten weiter aufbereitet werden. Neben dem Import von Höhendaten stellt die topologische Bereinigung den wichtigsten Schritt zur Erstellung eines routingfähigen Datensatzes dar.

### 7.2.1 Räumliche und thematische Selektion

In den nachfolgenden Analysen zur Verbrauchsberechnung (siehe Kap. 8) oder zur Visualisierung werden oft nur Teile des Gesamtdatensatzes benötigt. Zu diesem Zweck kann mittels eines umschreibenden Rechtecks (engl. *Minimum Bounding Rectangle*, MBR) ein kleinräumiger Bereich aus den Daten ausgeschnitten werden.

Zusätzlich lässt sich der Datenumfang bei Bedarf thematisch eingrenzen. Straßen niedriger Klassen etwa können so aus Anwendungen ausgespart werden. Die räumliche und thematische Auswahl bringt Verbesserungen in der Performance des Programms mit sich.

Die geometrische Information der OpenStreetMap-Daten ist in Form von ellipsoidischen WGS-84-Koordinaten gegeben. Zur Ermöglichung einer Reihe geometrischer Analysen und zur gängigeren Darstellung werden die geographischen Koordinaten im Zuge der Datenaufbereitung mittels der *Universalen Transversalen Mercatorprojektion* (UTM-Projektion) verebnet. Die Position der Nodes wird somit in Form von Rechtswert und Hochwert mit der Einheit [m] gespeichert. Auch die meisten OpenStreetMap-Render-Engines stellen die Daten in projizierter Form (i.d.R. UTM) dar. Die Formeln der UTM-Projektion sind in Anh. C angeführt.

### 7.2.2 Verknüpfung mit Höhendaten

Die großteils zweidimensionalen OpenStreetMap-Daten werden durch Hinzunahme externer Höheninformationen in dreidimensionale Daten übergeführt. Hierzu können in diesem Programm entweder Daten des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen (BEV) oder SRTM-Daten verwendet werden.

Die vom BEV erworbenen Höhen liegen in Form eines DGM mit einer Gitterweite von 50 m vor. Die Höhen der einzelnen Knoten und Polygonpunkte wurden mittels Spline-

Interpolation aus dem Raster abgeleitet. Hierzu diente das Softwarepaket *TC* des Instituts für Navigation.

Die frei zugänglichen SRTM-Daten können von Servern des *United States Geological Survey (USGS)* bezogen werden (siehe [39]). Die Daten sind in Dateien unterteilt, welche jeweils einen räumlichen Bereich von  $1^\circ \times 1^\circ$  der Erdoberfläche umfassen. In Gebieten außerhalb der USA beträgt die Auflösung 3 Bogensekunden, was einer Dateigröße von  $1201 \times 1201$  Pixel entspricht. Die entsprechenden binären *.hgt*-Dateien beinhalten somit Matrizen der Größe  $1201 \times 1201$  mit Höhenwerten. Die Nodes des OpenStreetMap-Datensatzes werden im Programm mittels *Nearest-Neighbour-Interpolation* mit den SRTM-Höhen versehen.

Der Unterschied zwischen der Verwendung des BEV-Datensatzes und der SRTM-Höhen bzw. die Auswirkungen auf den Verbrauch eines Kraftfahrzeugs werden in Kap. 8 analysiert.

Da die Höhendaten in dieser Arbeit aus digitalen Geländemodellen (DGM) abgeleitet werden, entsprechen die den Nodes zugewiesenen Werte den Höhen an der Erdoberfläche. Ways, die durch entsprechende Tags als Brücken oder Tunnels gekennzeichnet sind, erfordern eine Korrektur ihrer Höheninformation, um korrekte Höhenprofile der entsprechenden Kanten zu erhalten. Im Programm geschieht diese Anpassung durch lineare Interpolation der Höhenwerte in Abhängigkeit der Höhen von Anfangs- und Endnode eines Ways. Dies ist in Abb. 7.2 dargestellt.

Bei Verwendung zusätzlicher externer Höheninformationen wie z. B. der genauen Höhenprofile von Straßen könnten diese Korrekturschritte vernachlässigt werden.

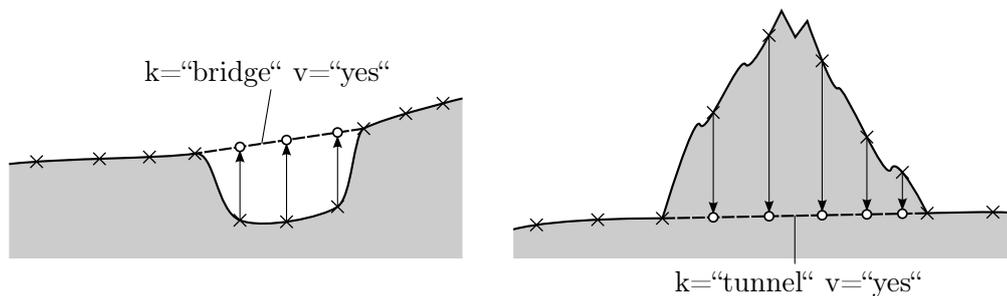
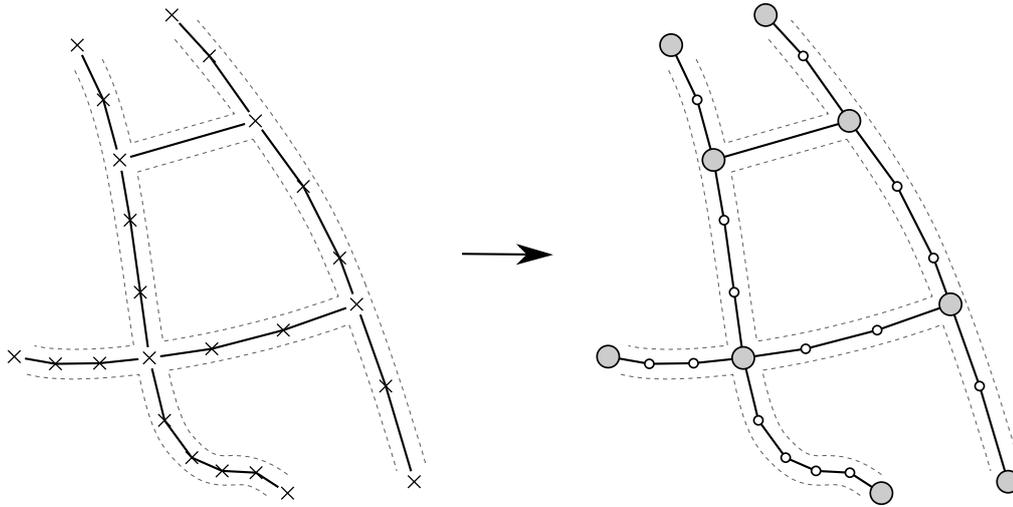


Abbildung 7.2: Korrektur der Höhendaten bei Brücken und Tunnels.

### 7.2.3 Korrektur der Topologie

Verkehrsnetze müssen eine einheitliche und topologisch korrekte Struktur aufweisen, um die Basis für Routinganwendungen bilden zu können. Entsprechend der Ausführungen in Kap. 2 wird ein Verkehrsnetz in Form eines Graphen modelliert, der im Wesentlichen aus Knoten und Kanten besteht. Ein Knoten repräsentiert bei der Modellierung eines Straßennetzes eine Kreuzung, d. h. einen Punkt, an dem mindestens eine Straße beginnt oder endet. Eine Kante verbindet immer zwei Knoten, d. h. sie repräsentiert das Straßenstück zwischen zwei Kreuzungen.

Jeder Highway der OpenStreetMap-Rohdaten besteht aus einer Folge von Nodes (siehe Kap. 6). In den meisten Fällen entsprechen der erste und letzte Node den Anfangs- und Endknoten einer Kante, die übrigen Nodes repräsentieren Polygonpunkte. Der Großteil der OpenStreetMap-Daten ist somit topologisch korrekt und kann leicht in eine Knoten-Kanten-Struktur übergeführt werden (siehe Abb. 7.3).



**Abbildung 7.3:** Überführung von Punkt- und linienförmigen Objekten der OpenStreetMap-Rohdaten in eine Knoten-Kanten-Struktur.

Ähnlich wie bei der unvollständigen oder falschen Attributisierung von Elementen existieren im OSM-Datensatz topologische Fehler, die zum Großteil historisch bedingt sind:

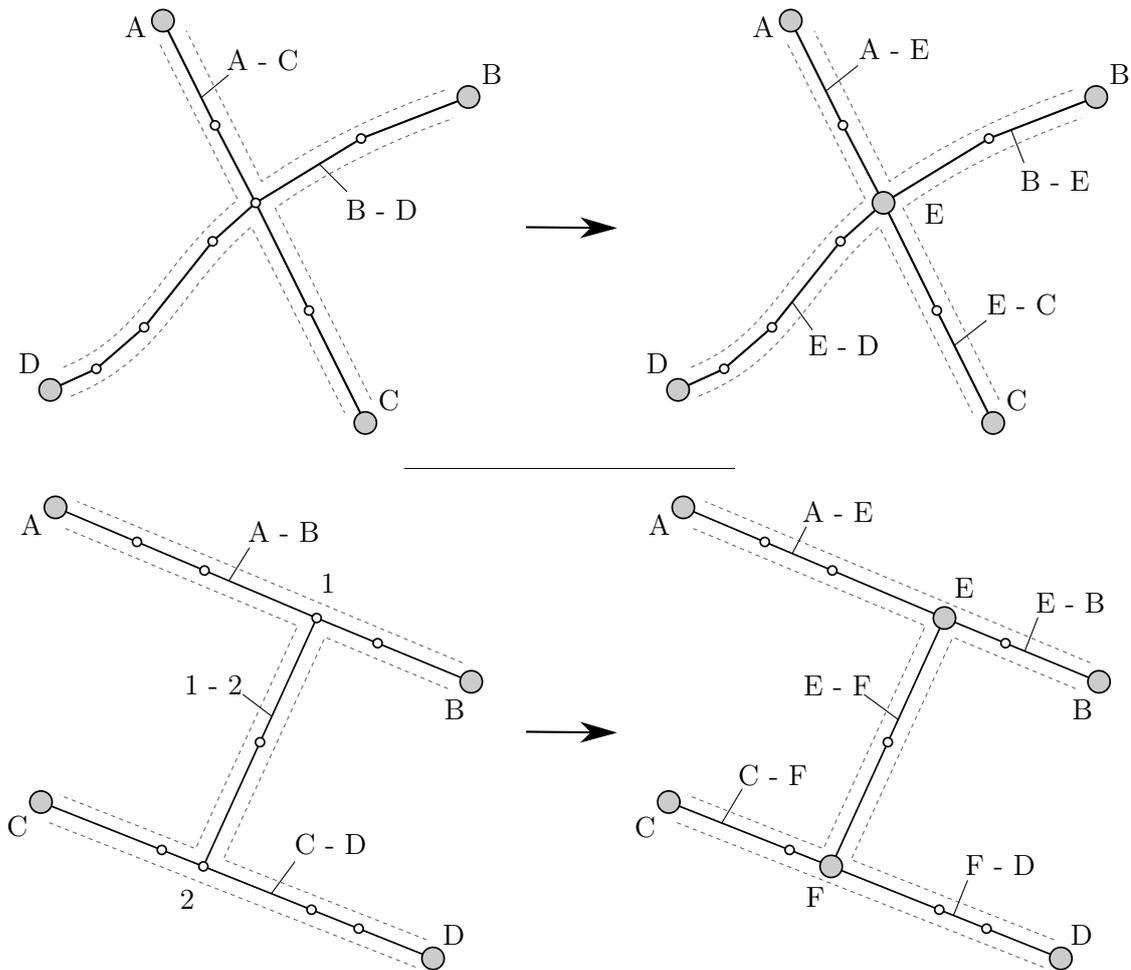
- Kanten kreuzen einander, ohne dass der Schnittpunkt durch einen Knoten markiert ist.
- Eine Kante beginnt oder endet an einem Punkt, der graphentheoretisch keinem Knoten, sondern einem Polygonpunkt entspricht.

Diese Fälle sind in Abb. 7.4 dargestellt. Durch die vermehrte Nutzung von OpenStreetMap für Routinganwendungen nehmen die Fehler in der Netztopologie durch die konsequente Verbesserungsarbeit der OSM-Community jedoch stetig ab.

Erfüllen Geodaten im Rahmen der Datenerfassung die Forderung nach topologischer Konsistenz nicht oder nur eingeschränkt, so werden die Daten als *Spaghetti* bezeichnet (vgl. [2, S. 77]). Die geforderte topologische Konsistenz wird erst durch Anwendung entsprechender Algorithmen erreicht. In diesem Programm werden die Probleme der Kreuzungen und falsch endenden linienförmigen Objekte in einer entsprechenden Funktion behandelt, in der die beteiligten Objekte aufgespalten werden.

Die Erstellung einer Knoten-Kanten-Struktur als vollständig ausgeprägter Digraph erfordert zusätzlich die Beachtung der Attribute der Highways. Ein OSM-Highway ohne besondere Kennzeichnung entspricht einem Straßenabschnitt, der in beide Richtungen befahren werden kann. In einem Digraphen existieren für den entsprechenden Abschnitt somit zwei entgegengesetzt gerichtete Kanten. Ways hingegen, die mit den Tags „oneway“ oder „roundabout“ gekennzeichnet sind, werden in einem Digraphen durch eine einzelne gerichtete Kante modelliert.

Ein Graph, der zur Gänze aus gerichteten Kanten besteht, erlaubt die Generierung von Traversen für alle Knoten des Graphen. Entsprechend der Fahr- und Abbiegevorschriften in Form von OSM-Restrictions (siehe Abschn. 7.1.1) werden die Traversen mit „0“ oder „∞“ bewertet.



**Abbildung 7.4:** Topologische Bereinigung von OpenStreetMap-Daten. Oben ist die Situation der Kreuzung zweier Kanten ohne Knoten dargestellt. Im unteren Bereich wird gezeigt, dass Kanten an falschen Punkten beginnen oder enden können. In beiden Fällen müssen die involvierten Kanten unter Berücksichtigung ihrer Attribute aufgespalten und zusätzliche Knoten eingefügt werden.

### 7.2.4 Verspeicherung

Nach dem Import der Rohdaten und der Ausführung aller Korrekturschritte befinden sich die Straßendaten in einer routingfähigen Knoten-Kanten-Struktur. Diese besteht aus Knoten, (gerichteten) Kanten und Traversen und wird entsprechend der Systematik in Kap. 2 in Form verketteter Adjazenzlisten verspeichert. Die Straßendaten sind mittels der folgenden Listen organisiert, deren genauer Aufbau in Anh. B dargestellt ist:

**Knotenliste:** Jeder Datensatz beinhaltet zwei Einträge, nämlich einen Pointer (Index) auf die Kantenliste und einen Pointer auf die Traversenliste. Der entsprechende Block in der Kantenliste umfasst alle von diesem Knoten abgehenden Kanten. Der Block in der Traversenliste umfasst alle Traversen des Knotens. In Routing-Algorithmen (z. B. im Dijkstra-Algorithmus) können auf diese Weise über die inzidenten Kanten die Nachbarknoten eines betrachteten Knotens ermittelt werden.

Der Index eines Datensatzes der Knotenliste entspricht der ID des Knotens. Diese

wird unabhängig von der ID aus OpenStreetMap im Zuge des Einlesevorgangs neu vergeben.

**Kantenliste:** In der Kantenliste sind die abgehenden Kanten eines Knotens in Gruppen gespeichert. Jeder Datensatz besitzt neben der ID des Zielknotens auch die für die spätere Kantenbewertung erforderlichen Attribute. Weiters wird ein Pointer auf eine Liste mit den Polygonpunkten gespeichert (siehe unten).

**Traversenliste:** Hier erfolgt die Verspeicherung aller möglichen Traversen des Graphen. Die Indizierung der Blöcke erfolgt analog zur Kantenliste. Jeder Datensatz stellt eine Traverse dar, welche als Attribute die ID des Vorgängerknotens, die ID des Nachbar-knotens sowie die Traversenbewertung auf Basis der OSM-Restrictions aufweist.

**Liste mit Knotenkoordinaten:** Diese Liste besitzt die selbe Länge wie die Knotenliste. Die ID eines Datensatzes entspricht der ID des zugehörigen Knotens. Aufgabe dieser Liste ist das Verspeichern der geometrischen Information, d. h. der Koordinaten sowie der Höhe aller Knoten.

**Liste mit Polygonpunkten:** Alle Polygonpunkte des Graphen werden in dieser eigenständigen Liste gespeichert.

Für reine Routinganwendungen sind die beiden letzteren Listen nicht von Bedeutung, da sie nicht Träger topologischer Information sind. Die Kantengeometrie bildet jedoch die Basis für die Graphenbewertung, welche Voraussetzung für die Routingfähigkeit ist (siehe Abschn. 7.3).

Neben den Straßendaten werden die zusätzlichen verkehrsrelevanten Punkte (z. B. Verkehrszeichen) sowie die Ortsgebiete in entsprechenden Listen gespeichert. Alle relevanten Elemente der Datenstruktur sind in Anh. B dargestellt.

### 7.3 Graphenbewertung

Wie in Kap. 3 gezeigt wird, muss ein Graph bewertet sein, um ihn zur Ermittlung der kürzesten Wege hinsichtlich verschiedener Kriterien heranziehen zu können. Die Bewertung erfolgt durch Kostenzahlen  $c_{ij}$  bzw.  $b_{pij}$ , die den Aufwand zum Durchschreiten von Kanten bzw. Traversen festlegen. Der kürzeste Weg zwischen zwei Knoten wird durch die kleinste Summe aller Kostenzahlen definiert. Folglich ist eine korrekte Graphenbewertung entscheidend für das Ergebnis jedes Routing-Algorithmus.

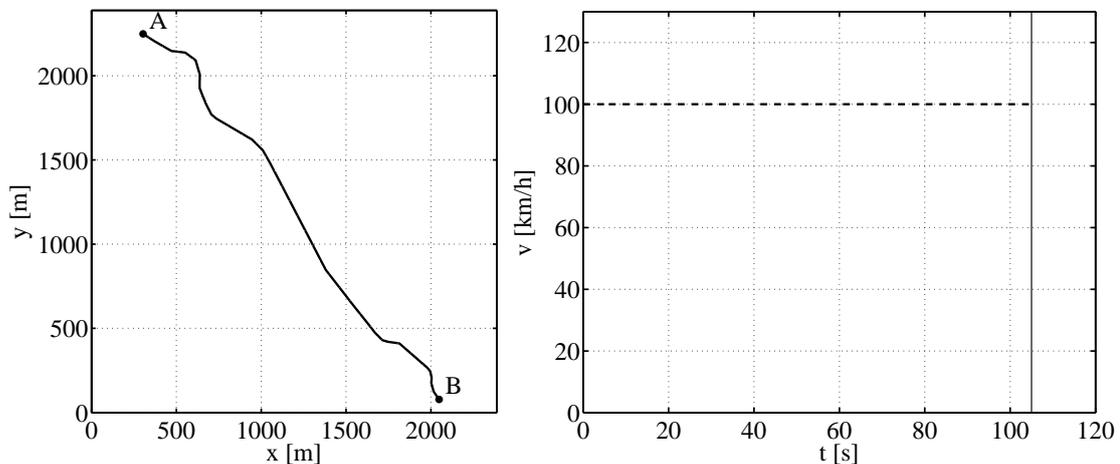
Ziel dieser Arbeit ist es, in einem Graphen den kürzesten Weg hinsichtlich des Energieverbrauchs zu bestimmen. Die Bewertung von Kanten und Traversen entsprechend ihres Kraftstoffverbrauchs in Abhängigkeit von einer Reihe straßen- und fahrzeugseitiger Parameter stellt die zentrale Funktion des hier entwickelten Programms dar. Die Grundlagen hierzu sind in Kap. 5 beschrieben. Zu Test- und Vergleichszwecken werden die Elemente des Graphen neben dem Energieverbrauch hinsichtlich einer Reihe weiterer Kriterien bewertet. So lassen sich etwa die Länge oder der Höhenunterschied einer Kante leicht aus den geometrischen Gegebenheiten ableiten.

Der Kraftstoffverbrauch eines spezifischen Fahrzeugs hängt sowohl von Konstanten, als auch bewegungsabhängigen Größen ab (siehe Kap. 4). Dies ist auch in Tab. 6.1 auf S. 44 dargestellt. Die variablen Größen wie z. B. die Fahrgeschwindigkeit oder die Beschleunigung werden im Programm für jede Kante auf Basis eines Bewegungsmodells ermittelt, wobei die Eigenschaften der Kante ihrerseits die Rahmenbedingungen für die Bewegung darstellen. Durch Berechnung der Fahrwiderstände entlang einer Kante lässt sich der Kraftstoffverbrauch ermitteln. Im Folgenden wird die Umsetzung dieser Schritte erklärt.

### 7.3.1 Kantenbewertung

Jede Kante des Straßengraphen ist geometrisch durch zwei Knoten und eine Reihe von Polygonpunkten definiert. Die Kantenlänge wird durch Summation der Länge der einzelnen Kantensegmente ermittelt. Die Segmentlänge entspricht der euklidischen Distanz zwischen jeweils zwei Punkten, die durch ihre Lage und Höhe in einem dreidimensionalen Koordinatensystem gegeben sind. Analog dazu lässt sich als Kostenzahl der Höhenunterschied einer Kante ableiten.

Entsprechend Abschn. 7.1.1 besitzt jede Kante abseits ihrer Geometrie eine Reihe von Attributen. Von Bedeutung für die Erstellung eines Bewegungsmodells ist die Kennzeichnung der Höchstgeschwindigkeit. Abb. 7.5 zeigt eine Kante mit ihrem zugehörigen Geschwindigkeitsprofil. Da die Attributisierung von Objekten in OpenStreetMap jedoch teilweise unvollständig ist, d. h. die entsprechenden Attribute fehlen, wird die Höchstgeschwindigkeit einer Kante bei fehlendem „maxspeed“-Attribut auf Basis des Straßentyps angenommen.

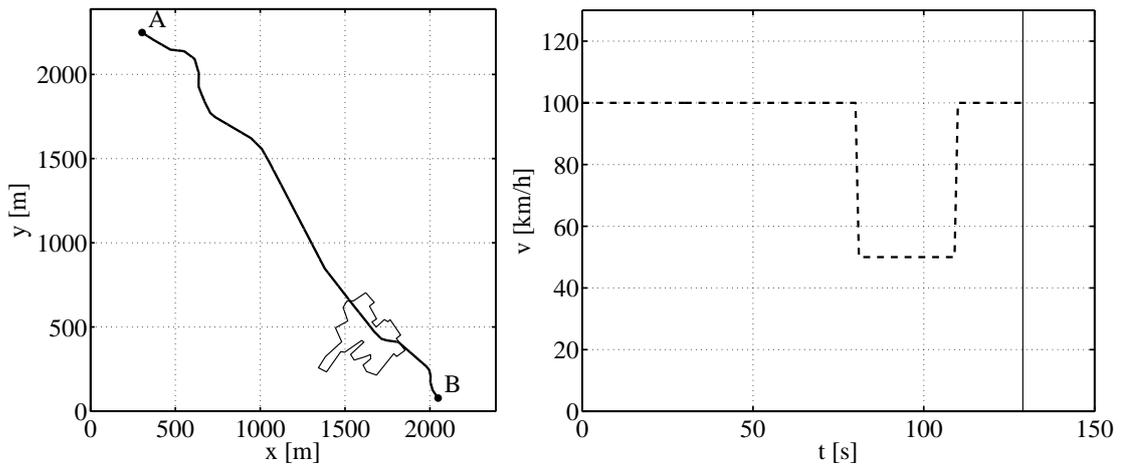


**Abbildung 7.5:** Darstellung der Kante eines Straßengraphen (l.) und des Profils ihrer Höchstgeschwindigkeit bei der Bewegung von A nach B auf Basis der OpenStreetMap-Attributisierung (r.).

Durch Ortsgebiete, welche in Form von Polygonen oder entsprechenden Verkehrszeichen gekennzeichnet sind, erfolgt bei Bedarf eine Beeinflussung der Höchstgeschwindigkeit (siehe Abb. 7.6). Dies wird im Programm wiederum bei fehlender Attributisierung berücksichtigt. Bei korrekter Modellierung wird eine Straße, die durch ein Ortsgebiet führt, durch eine eigenständige Kante repräsentiert.

Auf dem Weg zur Erstellung eines möglichst realistischen Bewegungsmodells für ein Fahrzeug müssen zusätzlich die Kurvenradien einer Kante berücksichtigt werden. Durch Vorgabe einer maximalen Querschleunigung lässt sich anhand der Ausführungen in Abschn. 4.3 die Höchstgeschwindigkeit für jeden Punkt der Kante ermitteln.

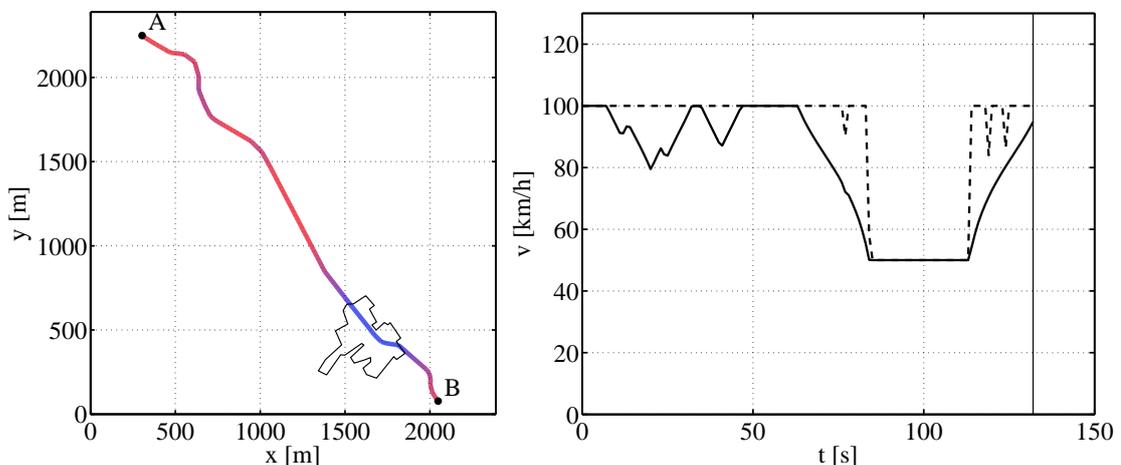
Die so definierten Rahmenbedingungen (Attributisierung, Straßentyp, Ortsgebiete und Kurvenradien) erlauben nun durch Vorgabe von Längsbeschleunigungswerten die Modellierung des Bewegungsablaufs entlang einer Kante des Straßengraphen. Hierzu werden durchschnittliche Beschleunigungswerte angenommen, so wie sie im normalen Straßenverkehr auftreten (siehe Abschn. 4.3). Zusätzlich wird angenommen, dass ein Fahrzeug stets bestrebt ist, die aufgrund der Strecke mögliche Höchstgeschwindigkeit zu erreichen. Hinsichtlich einer kraftstoffsparenden Fahrweise kann die Höchstgeschwindigkeit auch herabgesetzt



**Abbildung 7.6:** Beeinflussung der Höchstgeschwindigkeit einer Kante durch ein Ortsgebiet (links als Polygon dargestellt). Die Fahrzeit zwischen den Knoten A und B nimmt folglich zu.

werden. Auch die Werte der Geschwindigkeit am Anfangs- und Endpunkt einer Kante können im Modell beeinflusst werden. Dies wird etwa bei der Traversenbewertung benötigt (siehe Abschn. 7.3.2).

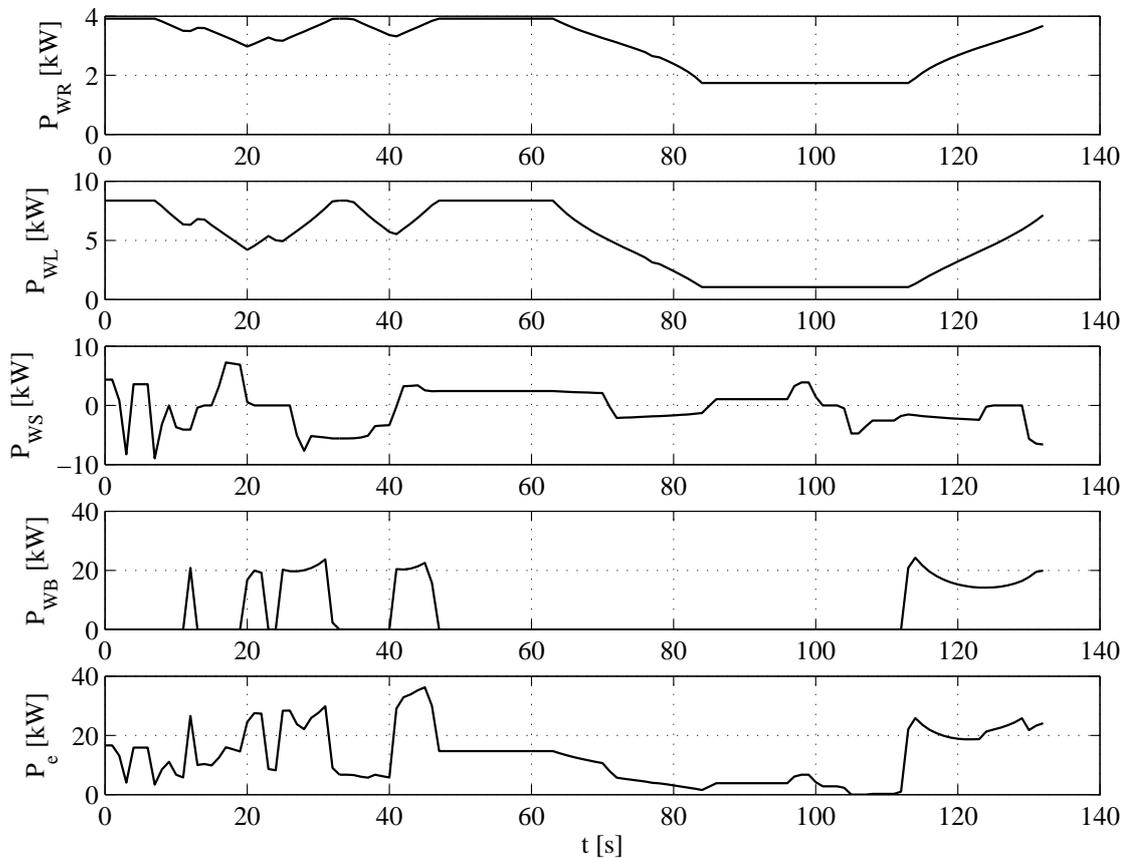
Aus der Kenntnis der Fahrgeschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt kann die Dauer des Durchschreitens einer Kante, d. h. die Fahrzeit ermittelt werden. Ein Beispiel für den modellierten Geschwindigkeitsverlauf ist in Abb. 7.7 dargestellt.



**Abbildung 7.7:** Modellierter Geschwindigkeitsverlauf bei der Bewegung von A nach B durch Berücksichtigung von OpenStreetMap-Daten und Beschleunigungswerten eines Fahrzeugs.

Durch Kenntnis der Fahrgeschwindigkeit  $v$ , der Beschleunigung  $a$  sowie – durch die Kantengeometrie – des Steigungswinkels  $\alpha$  kann zu jedem Zeitpunkt die Größe des Fahrwiderstands ermittelt werden. Die hierfür zusätzlich benötigten Fahrzeugparameter werden als konstant betrachtet. Entsprechende Werte durchschnittlicher Fahrzeugklassen sind in Anh. A angeführt. Durch Multiplikation des Fahrwiderstands mit der aktuellen Fahrgeschwindigkeit ergibt sich die Fahrwiderstandsleistung. Ein beispielhafter Verlauf der ein-

zelen Komponenten der Fahrwiderstandsleistung ist in Abb. 7.8 dargestellt.



**Abbildung 7.8:** Verlauf der einzelnen Komponenten der Fahrwiderstandsleistung und der Gesamtfahrwiderstandsleistung (u.) bei der Bewegung eines Fahrzeugs entlang einer Kante. ( $P_{WR}$ : Rollwiderstandsleistung,  $P_{WL}$ : Luftwiderstandsleistung,  $P_{WS}$ : Steigungswiderstandsleistung,  $P_{WB}$ : Beschleunigungswiderstandsleistung und  $P_e$ : Gesamtfahrwiderstandsleistung).

Analog zu den Fahrwiderständen kann der von der Fahrgeschwindigkeit abhängige spezifische Verbrauch  $b_e$  für jeden Zeitpunkt angegeben werden. Die Kombination mit der Gesamtfahrwiderstandsleistung bzw. der Motorleistung  $P_e$  erlaubt die Ermittlung des Kraftstoffmassenstroms. Durch Integration über die Zeit kann der Kraftstoffbedarf zum Durchfahren einer Kante entsprechend Abschn. 5.3.2 abgeleitet werden. Der so modellierte Verbrauch  $B_e$  kann in die Einheit [L] übergeführt und als Kostenzahl der Kante verwendet werden. Diese Methodik zur Kantenbewertung hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs ist in Abb. 7.9 schematisch dargestellt.

Unabhängig von der Vorgangsweise bei der strengen Modellierung können auch die Angaben zum Normverbrauch von Kraftfahrzeugen (Stadt und Freiland) zur Kantenbewertung herangezogen werden. Durch Kenntnis der Ortsgebiete auf Basis der OpenStreetMap-Daten lässt sich für jedes Kantensegment und folglich für die gesamte Kante ein Wert für den Verbrauch in [L] ableiten. Ein weiterer Ansatz zur vereinfachten Kantenbewertung stellt die Verwendung von Modellen zur Ableitung des Verbrauchs in [L/100km] in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit dar, so wie dies in Abb. 5.7 auf S. 43 dargestellt ist. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Ansätzen werden in Kap. 8 analysiert.

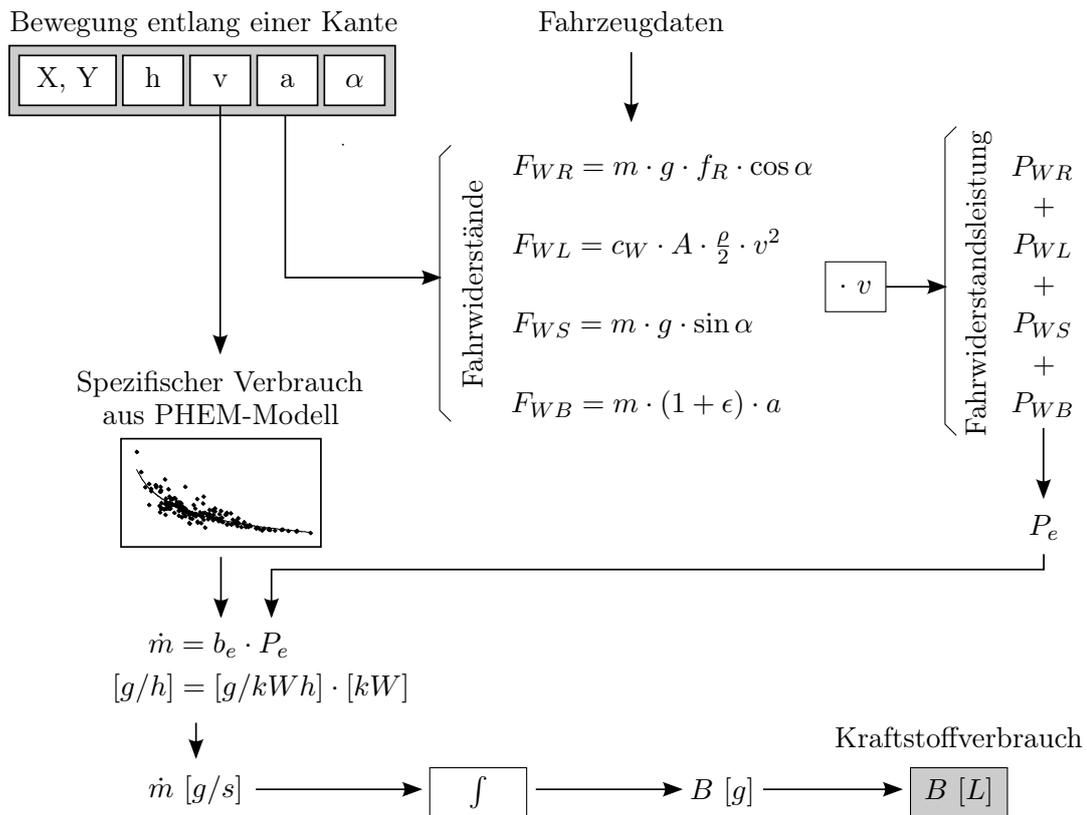


Abbildung 7.9: Schema zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs bei der Kantenbewertung.

### 7.3.2 Traversenbewertung

In diesem Programm werden im Routing-Algorithmus sowohl Kanten als auch Traversen eines Graphen berücksichtigt (siehe Kap. 3). Auf dem Weg von einem Start- zu einem Zielknoten treten somit nicht nur Kostenzahlen für das Durchschreiten von Kanten, sondern auch Kostenzahlen für die Übergänge zwischen den Kanten auf. Im entsprechend modifizierten Dijkstra-Algorithmus wird das Label eines Nachfolgeknotens  $v_j$  des aktuell betrachteten Knotens  $v_i$  durch

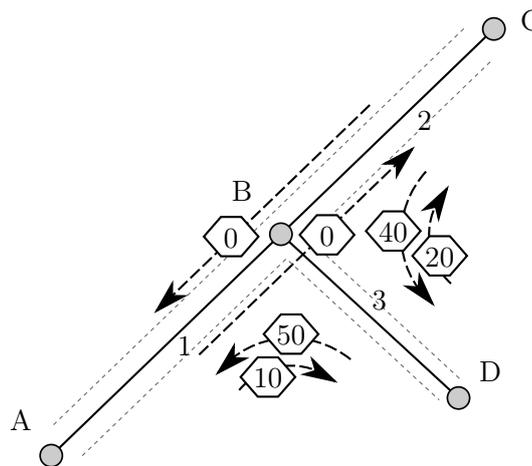
$$l_j = l_i + c_{ij} + b_{pij} \quad (7.1)$$

ermittelt, wobei der Vorgängerknoten von  $v_i$  hier mit  $v_p$  bezeichnet ist (siehe Alg. 3.2 auf S. 22).

Die Bedeutung der Traversenbewertung hängt vom gewählten Optimierungskriterium des Routing-Algorithmus ab. Bei der Ermittlung der kürzesten Route oder der Ermittlung der Route mit dem geringsten Höhenunterschied macht die Bewertung von Traversen nur begrenzt Sinn. Ausgenommen hiervon ist die Bewertung „ $\infty$ “ als spezielle Kostenzahl einer Traverse zur Modellierung von Abbiegeverboten (siehe Kap. 3). Hingegen können etwa beim Berechnen der schnellsten oder der energieeffizientesten Route Traversenbewertungen verwendet werden, um den Zeitaufwand bzw. den Kraftstoffverbrauch für das Passieren eines Knotens zu modellieren.

In Abb. 7.10 ist das Beispiel eines Knotens mit bewerteten Traversen dargestellt. Eine Straße niedrigen Rangs trifft auf eine höherrangige Straße. Abhängig von Herkunft und Ziel entstehen beim Durchschreiten des Knotens B unterschiedlich hohe Kosten. Wird der

Knoten von einem Fahrzeug auf der höherrangigen Straße durchfahren, so entstehen keine Traversenkosten, da keine Brems- und Beschleunigungsvorgänge auftreten. Bei der Bewegung von A über B nach C fallen somit nur die Kostenzahlen der Kanten 1 und 2 an, die entsprechend Abschn. 7.3 ermittelt werden. Bei Abbiegevorgängen von der höherrangigen auf die niederrangige Straße oder umgekehrt muss das Fahrzeug gebremst und erneut beschleunigt werden, was im Unterschied zur linearen Bewegung einen Zuwachs an Fahrzeit und Kraftstoffverbrauch hervorruft. Dieser kann für die Bewegungen A – B – D oder C – B – D unterschiedliche Werte annehmen. Ähnlich verhält es sich bei Bewegungen von D über B nach A oder C.

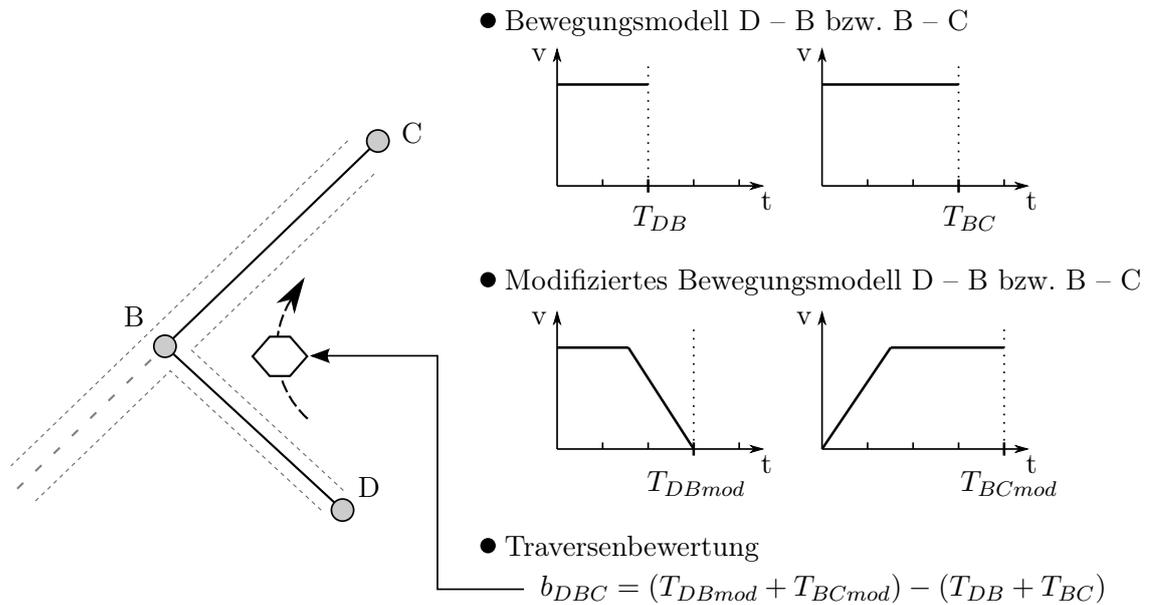


**Abbildung 7.10:** Beispiel einer Straßenkreuzung mit unterschiedlichen Kostenzahlen der Traversen.

Zur Ermittlung der Kosten einer Traverse wird in diesem Programm der Unterschied an Zeit- bzw. Kraftstoffaufwand herangezogen, der durch unterschiedliche Bewegungsmodelle der adjazenten Kanten entsteht. Die Bewegung in zwei über eine Traverse verbundenen Kanten hängt von der Fahrgeschwindigkeit der Traverse ab. Für die Traverse A – B – C in Abb. 7.10 entspricht diese der durch die Kanten 1 und 2 festgelegten Höchstgeschwindigkeit. Werden durch Abbiegevorgänge niedrigere Traversengeschwindigkeiten impliziert, so werden für die beiden adjazenten Kanten auf Basis eines entsprechend geänderten Bewegungsmodells modifizierte Kosten ermittelt. Die Differenz zwischen der Summe der modifizierten Kosten der beiden Kanten und der Summe der ursprünglichen Kosten der beiden Kanten wird als Traversenbewertung herangezogen. Dieses Schema ist in Abb. 7.11 dargestellt.

Die Geschwindigkeit einer Traverse wird im Programm durch eine Vielzahl an Faktoren bestimmt. Beachtung findet etwa der Winkel zwischen den beiden aufeinandertreffenden Kanten, der die Fahrgeschwindigkeit bei einem Abbiegevorgang reduziert sowie die Straßenklasse. Auch können zusätzliche Informationen wie etwa Verkehrszeichen, Ampeln, Baustellen usw. beachtet werden.

Das Konzept der Traversenbewertung eignet sich zur Modellierung typischer Eigenschaften des Verkehrs im städtischen Bereich. Die vorgestellte Methode zur Ermittlung der Kostenzahlen der Traversen berücksichtigt zwar den Zeit- und Energieverbrauch während der Bewegung entlang der Kanten, geht aber von einem kontinuierlichen Verkehrsfluss, d. h. reibungslosen Übergängen zwischen den Kanten aus. In der Realität treten Wartezeiten an geregelten und ungeregelten Kreuzungen sowie Situationen mit Stau und Stop-And-Go-



**Abbildung 7.11:** Ermittlung der Kostenzahl einer Traverse durch modifizierte Bewegungsmodelle der adjazenten Kanten. In diesem Programm werden als Traversenkosten die zusätzliche Fahrzeit (hier dargestellt) bzw. der Mehrverbrauch verwendet.

Verkehr auf. Die hierdurch hervorgerufenen Wartezeiten können zu den Kostenzahlen der Traversen (bei einer Bewertung durch die Fahrzeit) addiert werden. Hinsichtlich der Ermittlung der energieeffizientesten Route lässt sich auf diese Weise auch der Leerlaufverbrauch berücksichtigen. Neben der Häufung an Beschleunigungs- und Bremsvorgängen kann so der Mehrverbrauch im Stadtgebiet modelliert werden.

Da die Wartezeiten an Kreuzungen von der jeweiligen Ampelschaltung und vom Verkehrsaufkommen abhängig sind, stellt der Bereich der Traversenbewertung – speziell zur Simulation von innerstädtischem Verkehr – ein geeignetes Feld für die dynamische, verkehrsabhängige Kantenbewertung dar.

## 7.4 Anwendungen

Auf Basis der bewerteten Knoten-Kanten-Struktur stehen mittels des umgesetzten Programms die im Folgenden dargestellten Anwendungen zur Verfügung.

### 7.4.1 Routing

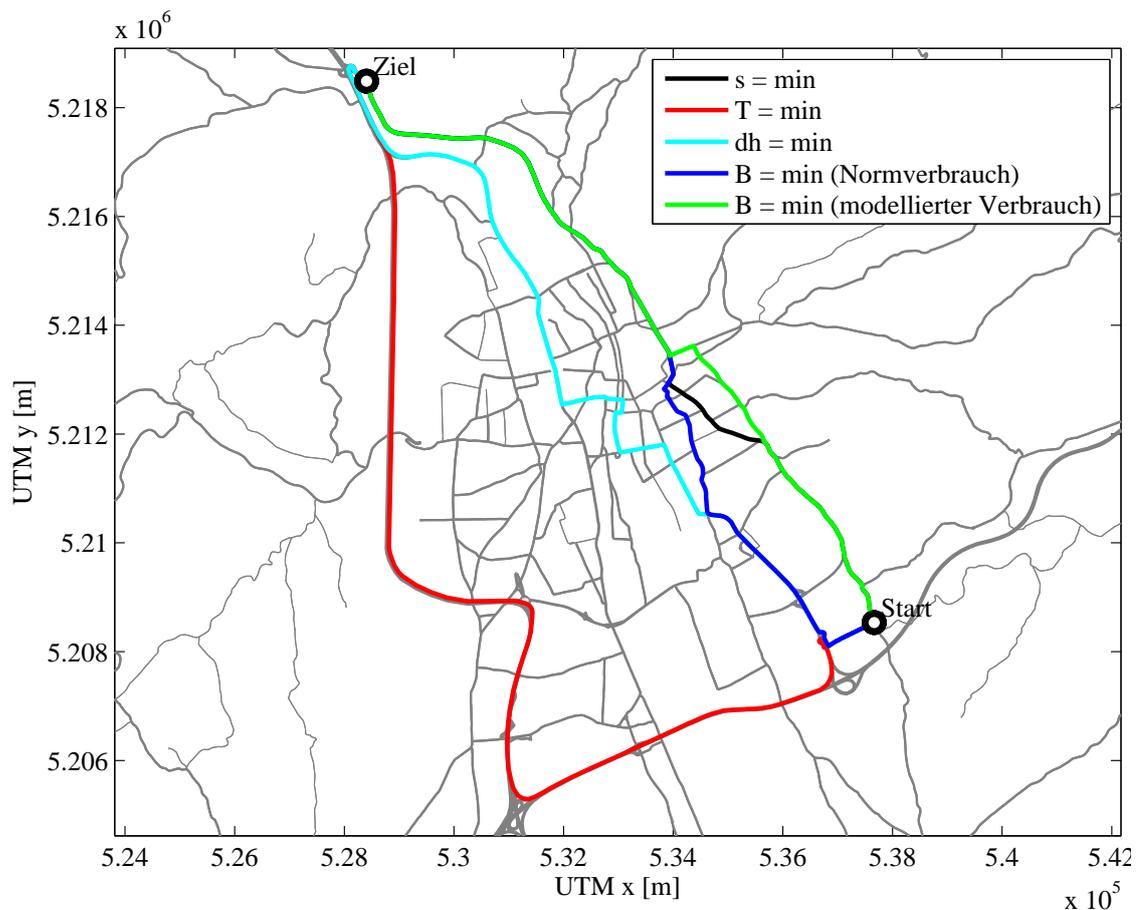
Die Routingfunktion bildet die zentrale Anwendung des Programms. Zwischen einem Start- und einem Zielknoten wird auf Basis des Dijkstra-Algorithmus die kürzeste Strecke ermittelt. Entsprechend den theoretischen Ausführungen in Kap. 3 werden die Bewertungen von Kanten und Traversen berücksichtigt, wodurch Sonderfälle wie Abbiegeverbote und Cycles gelöst werden. Die Optimierung erfolgt entweder hinsichtlich

- der kürzesten Strecke,
- der schnellsten Strecke,
- der Strecke mit dem geringsten Höhenunterschied oder

- der Strecke mit dem geringsten Energieverbrauch.

Innerhalb des letzten Punkts stehen die in Abschn. 7.3.1 vorgestellten Modelle zur Modellierung des Kraftstoffverbrauchs zur Verfügung.

Ergebnis des Routing-Algorithmus ist stets eine Folge durchschrittener Kanten vom Startknoten bis zum Zielknoten. Unabhängig vom jeweiligen Optimierungskriterium werden entlang einer ermittelten Route alle verfügbaren Kanten- bzw. Traversenbewertungen aufsummiert. Somit lassen sich etwa der Kraftstoffverbrauch der schnellsten Route und umgekehrt die Fahrzeit der energieeffizientesten Route angeben. Die ermittelten Routen werden entsprechend visualisiert, wie dies in Abb. 7.12 dargestellt ist.



**Abbildung 7.12:** Darstellung der Routen zwischen einem Start- und einem Zielknoten, die aufgrund verschiedener Kriterien ermittelt wurden.

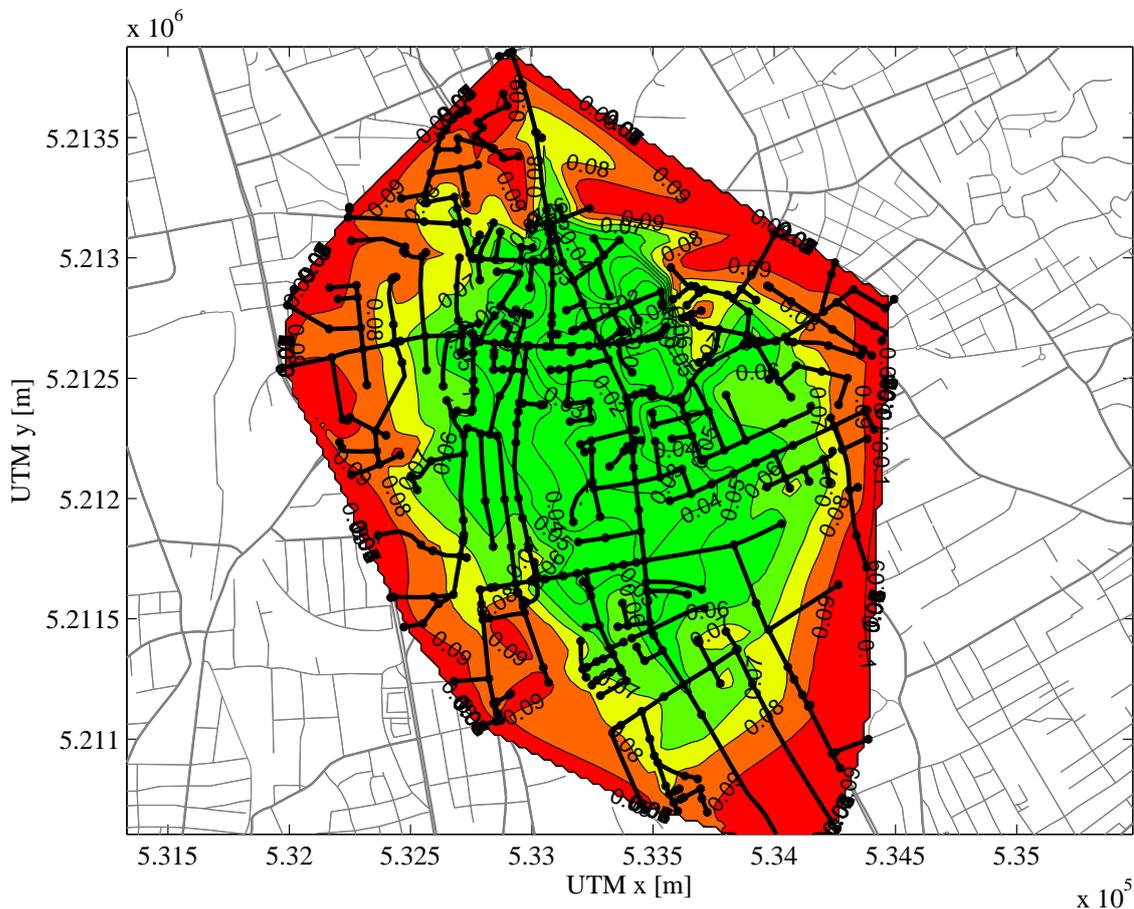
#### 7.4.2 Sequentielles Routing

Zu Test- und Analysezwecken lassen sich bei der Berechnung einer Route von einem Start- zu einem Endknoten beliebige Zwischenknoten definieren, über welche die Route geführt wird.

### 7.4.3 Reichweitenberechnung

Durch Summation aller Kanten- und Traversenkosten ausgehend von einem Startknoten wird ein Suchbaum erstellt. Das Ausdehnungsverhalten des Baums hängt vom gewählten Kriterium ab, d. h. welche Kostenzahlen (Distanz, Verbrauch usw.) verwendet werden. Werden als Kostenzahlen die Kantenlängen verwendet, so erfolgt eine näherungsweise radiale Ausdehnung des Suchbaums, die abgebrochen wird, wenn die maximalen Kosten erreicht werden. Wird als Kriterium der Kraftstoff- oder Energieverbrauch eines Fahrzeugs verwendet, so wird sich der Suchbaum in Abhängigkeit des Straßentyps, der Fahrgeschwindigkeit, der Topographie und weiterer Faktoren der Kanten und Traversen ausdehnen. Für ein Kraftfahrzeug lässt sich somit die aufgrund des vorhandenen Kraftstoffvolumens mögliche Reichweite ermitteln. Dies ist in Abb. 7.13 dargestellt.

Beim Betrieb von E-Fahrzeugen ist die Abschätzung der Reichweite von großem Interesse. In diesem Zusammenhang wird oft der Begriff *Range Anxiety* genannt.



**Abbildung 7.13:** Reichweitenermittlung für ein Kraftfahrzeug auf Basis der Suchbaumausdehnung. Der farbige Bereich kennzeichnet die Orte, die mit einer beispielhaften Kraftstoffmenge von 0,1 L erreichbar sind.

# Kapitel 8

## Testszenarien

Im Folgenden werden die Funktionen des Programms anhand einiger beispielhafter Routen demonstriert. Bei der vorangegangenen Graphenbewertung wurden die Parameter eines durchschnittlichen PKWs mit Dieselmotor der Klasse EURO 5 herangezogen. Die entsprechenden Werte können Anh. A entnommen werden.

Der Kraftstoffbedarf einer Route wird hier mit  $B_{\text{norm}}$  bzw.  $B_{\text{mod}}$  bezeichnet.  $B_{\text{norm}}$  entspricht dem auf Basis des Normverbrauchs ermittelten Streckenverbrauch,  $B_{\text{mod}}$  kennzeichnet den entsprechend Kap. 5 und 7 modellierten Streckenverbrauch  $B_e$ .

### 8.1 Ausgewählte Routen

Die folgenden Routen wurden unter Beachtung von Kanten- und Traversenkosten ermittelt, wobei von einem kontinuierlichen Verlauf ausgegangen wird. Wartezeiten an Ampeln im Stadtgebiet und der damit einhergehende Mehrverbrauch wurden bei der Berechnung vorerst nicht modelliert.

#### 8.1.1 Route im städtischen Bereich

In diesem Szenario sind Start- und Zielknoten 13,6 km voneinander entfernt (Luftlinie) und befinden sich an den Grenzen des Stadtgebiets von Graz (siehe Abb. 8.1).

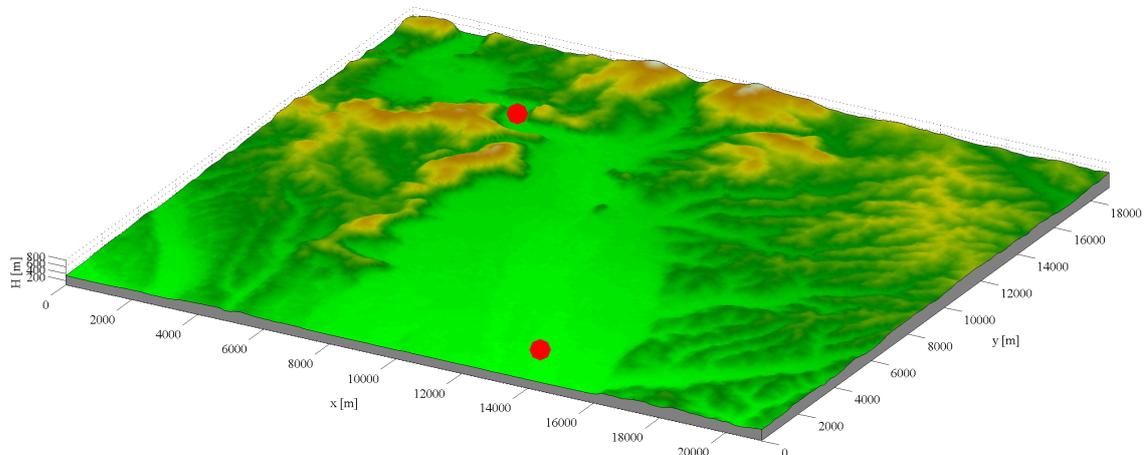
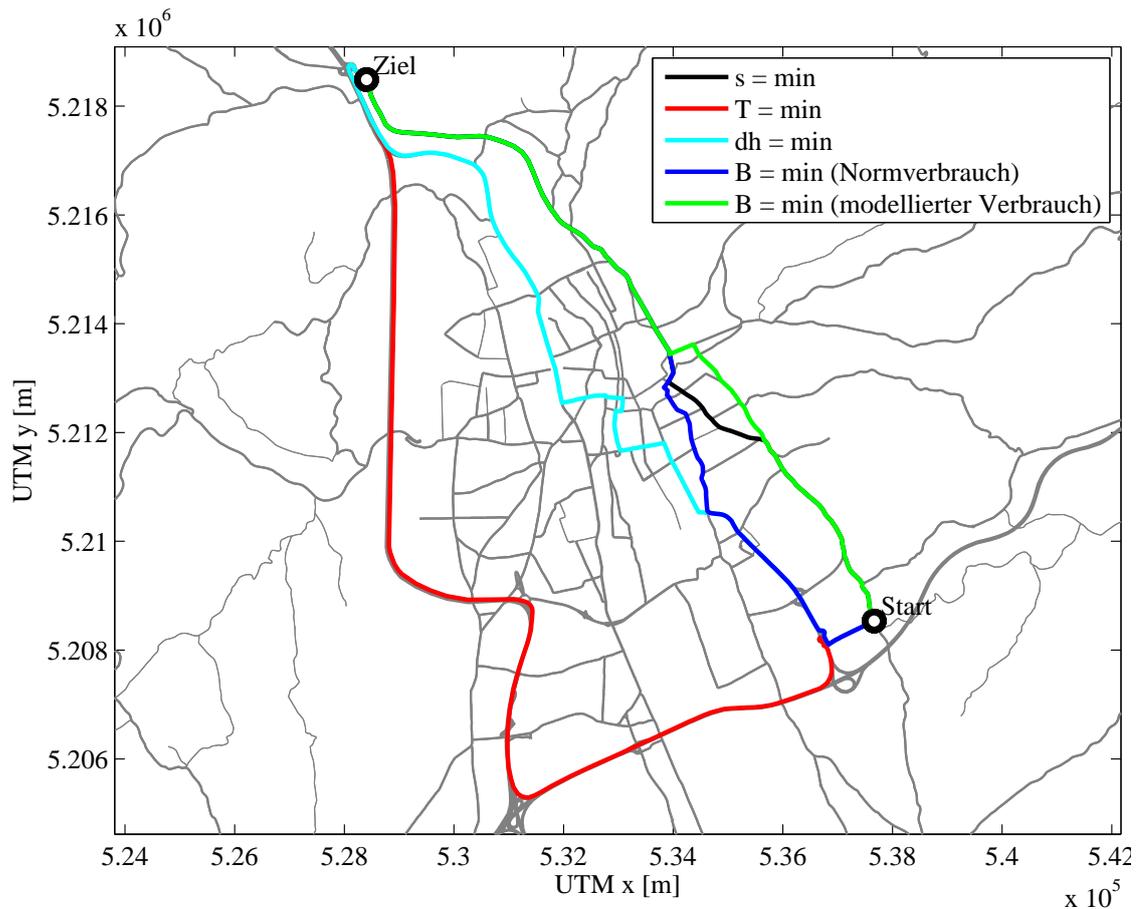


Abbildung 8.1: Übersicht Testgebiet Graz mit Start- (u.) und Zielknoten (o.).

Die Routen besitzen in diesem Fall je nach gewähltem Kriterium einen unterschiedlichen Verlauf. Dies ist aus Abb. 8.2 und Tab. 8.1 ersichtlich. Die schnellste Route (rot) führt über die Autobahn, wodurch diese Route aber auch die längste Route ist. Die kraftstoffsparendsten Routen folgen nahezu der längenmäßig kürzesten Route (schwarz). Die auf Basis des minimalen Normverbrauchs ermittelte Route (blau) wird wegen des höheren Verbrauchs kürzer durch Stadtgebiet geführt. Die auf Basis des modellierten Verbrauchs berechnete Route (grün) besitzt einen sehr geradlinigen Verlauf und ist bestrebt, vorwiegend auf höherrangigen Straßen im Stadtgebiet zu bleiben.



**Abbildung 8.2:** Darstellung der auf Basis verschiedener Kriterien ermittelten Routen im städtischen Bereich.

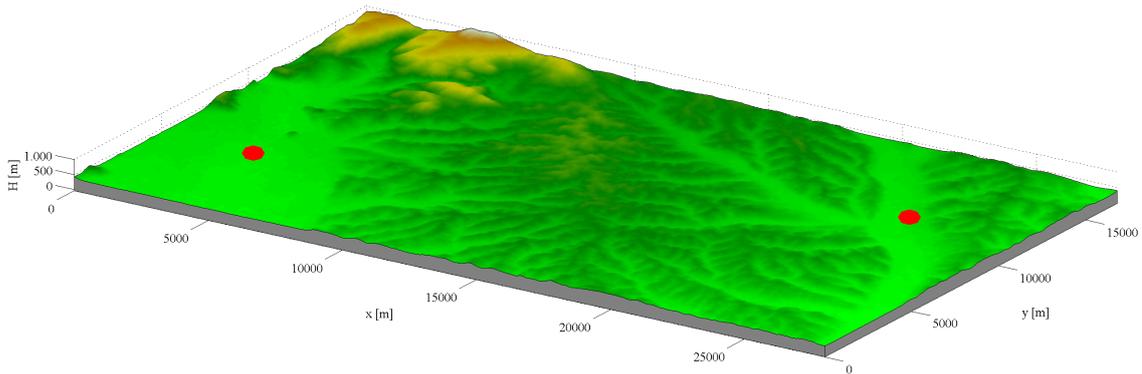
**Tabelle 8.1:** Charakteristika der Routen im städtischen Bereich.

Route	s [km]	T [min]	dh [m]	B <sub>norm</sub> [L]	B <sub>mod</sub> [L]
s = min	<b>14,875</b>	17,9	133	1,262	0,683
T = min	24,342	<b>14,7</b>	128	1,257	1,720
dh = min	17,562	18,3	<b>121</b>	1,325	0,950
B <sub>norm</sub> = min	15,789	17,2	133	<b>1,230</b>	0,8336
B <sub>mod</sub> = min	14,889	17,9	130	1,263	<b>0,673</b>

### 8.1.2 Route außerorts

#### Graz - Gleisdorf

In diesem Fall befindet sich der Startknoten im Stadtgebiet von Graz, der Zielknoten liegt in Gleisdorf. Der Abstand zwischen Start- und Zielknoten beträgt ca. 21 km, wobei die beiden Knoten durch eine Vielzahl an nieder- und höherrangigen Straßen verbunden sind. Die Städte sind topographisch durch einen Bergrücken mit Seitentälern getrennt (siehe Abb. 8.3).



**Abbildung 8.3:** Übersicht Testgebiet Graz – Gleisdorf mit Start- (l.) und Zielknoten (r.).

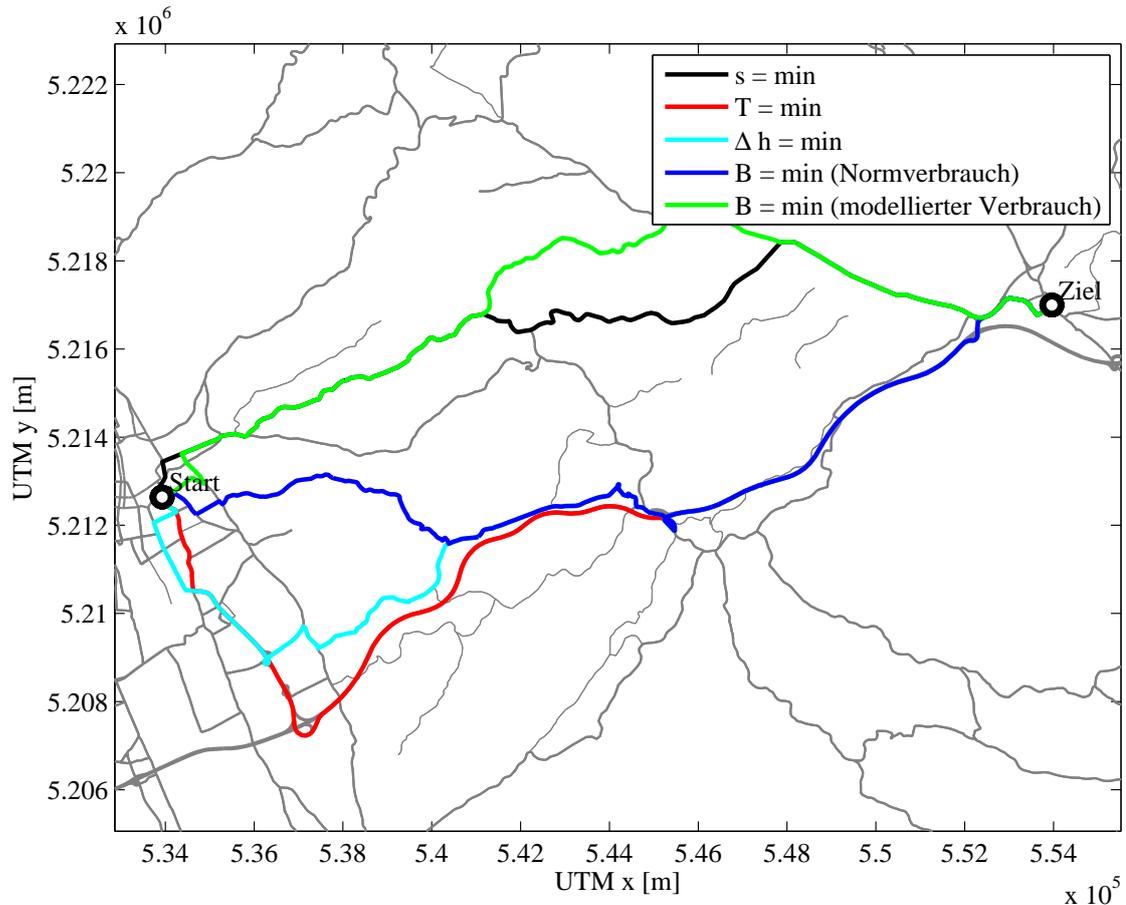
Die Ergebnisse des Routing-Algorithmus sind in Tab. 8.2 und Abb. 8.4 dargestellt. Die schnellste Route führt wiederum über die Autobahn. Die auf Basis des Normverbrauchs ermittelte Route führt teilweise über die Autobahn, teilweise über Freilandstraßen. Die nach dem modellierten Kraftstoffverbrauch kürzeste Route folgt wiederum nahezu der streckenmäßig kürzesten Route, die über eine höherrangige Straße (Bundesstraße) führt. Teilweise folgt die energieeffizienteste Route nicht der Bundesstraße, da Kurven in diesen Bereichen Beschleunigungen und somit einen höheren Kraftstoffverbrauch hervorrufen.

In diesem Szenario besitzen die Routen mit dem größten Höhenunterschied einen niedrigeren Verbrauch als die Routen, die durch flachere Topographie geführt werden. Dies resultiert aus den zur Verfügung stehenden Straßen. Einerseits ist die Streckenlänge der flacheren Routen länger, andererseits steigt der Kraftstoffverbrauch auf der Autobahn bei Höchstgeschwindigkeit stark an.

Auffällig ist, dass die Route mit dem geringsten modellierten Kraftstoffverbrauch den höchsten Normverbrauch aufweist. Dies wird durch die Streckenführung durch Orts- bzw. Stadtgebiete hervorgerufen.

**Tabelle 8.2:** Charakteristika der Routen zwischen Graz und Gleisdorf.

Route	s [km]	T [min]	dh [m]	B <sub>norm</sub> [L]	B <sub>mod</sub> [L]
s = min	<b>24,490</b>	23,7	430	1,642	2,108
T = min	28,099	<b>17,4</b>	332	1,581	2,307
dh = min	29,083	24,42	<b>327</b>	1,792	2,638
B <sub>norm</sub> = min	25,313	21,1	407	<b>1,569</b>	2,410
B <sub>mod</sub> = min	25,323	27,7	416	1,888	<b>2,095</b>



**Abbildung 8.4:** Darstellung der auf Basis verschiedener Kriterien ermittelten Routen zwischen Graz und Gleisdorf.

### Graz - Voitsberg

In diesem Szenario befindet sich der Startknoten wiederum in Graz, der Zielknoten liegt in Voitsberg. Der Abstand zwischen den beiden Städten beträgt ca. 23 km, wobei wiederum zahlreiche Verbindungen verschiedener Straßenkategorien und topographischer Gegebenheiten existieren (siehe Abb. 8.5).

Die Ergebnisse des Routings sind in Abb. 8.6 und Tab. 8.3 dargestellt. Die streckenmäßig kürzeste Route sowie die Route mit dem geringsten Normverbrauch besitzen die größten Höhenunterschiede. Dies resultiert aus einer sehr direkten Routenführung über Bergrücken. Die schnellste Route und die Route mit dem geringsten Höhenunterschied haben einen sehr ähnlichen Verlauf und führen über die Autobahn bzw. höherrangige Straßen.

Die Route mit dem niedrigsten modellierten Kraftstoffverbrauch folgt den höherrangigen Straßen. Die Autobahn und die Topographie wird wegen des erhöhten Kraftstoffverbrauchs gemieden. Zudem ist ersichtlich, dass die effizienteste Route einen sehr gleichförmigen Verlauf anstrebt, d. h. Abbiegevorgänge und Kurven werden wegen der einhergehenden Brems- und Beschleunigungsvorgänge vermieden.

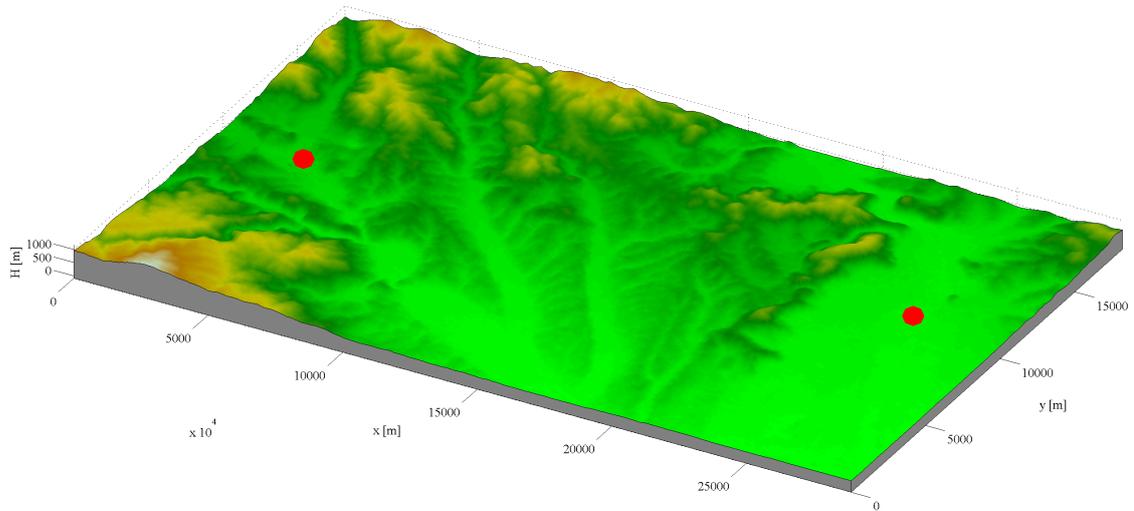


Abbildung 8.5: Übersicht Testgebiet Graz – Voitsberg mit Start- (r.) und Zielknoten (l.).

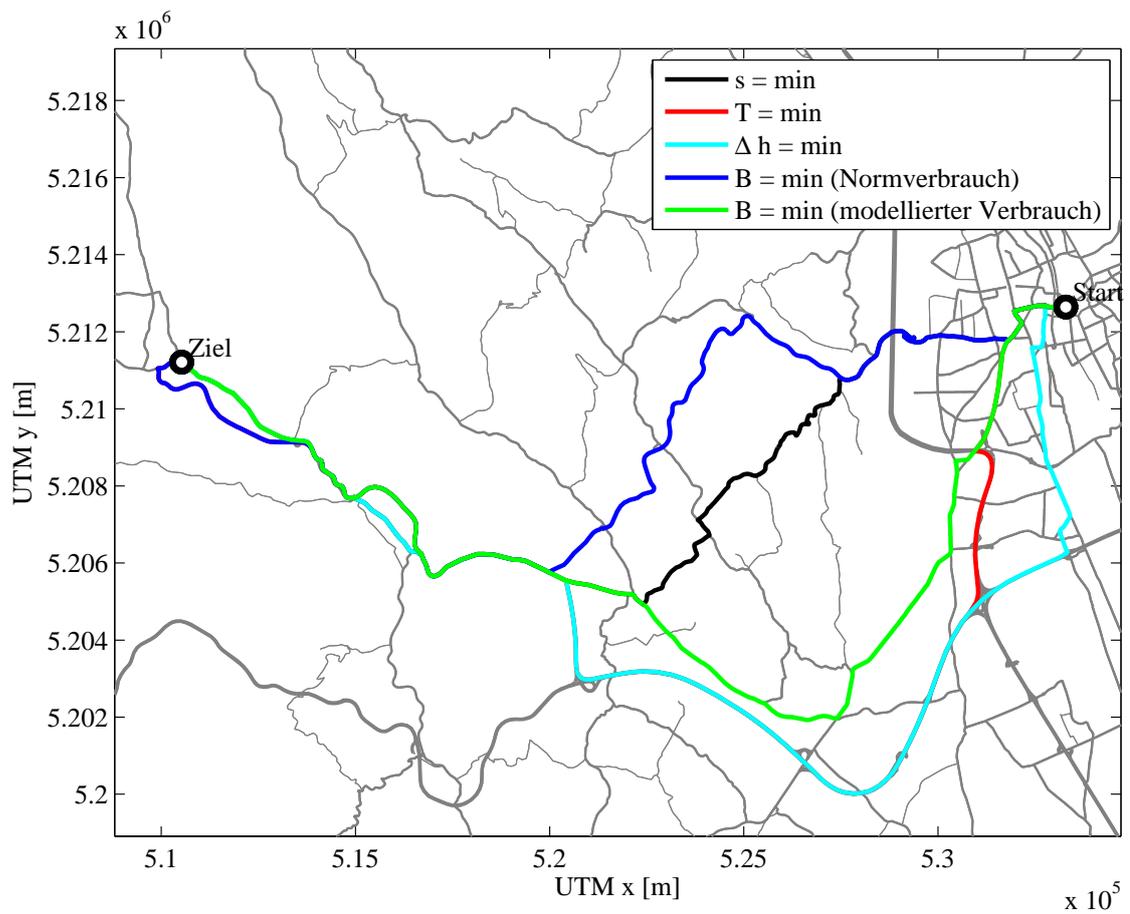


Abbildung 8.6: Darstellung der auf Basis verschiedener Kriterien ermittelten Routen zwischen Graz und Voitsberg.

**Tabelle 8.3:** Charakteristika der Routen zwischen Graz und Voitsberg.

Route	s [km]	T [min]	dh [m]	B <sub>norm</sub> [L]	B <sub>mod</sub> [L]
s = min	<b>32,415</b>	36,0	610	2,383	2,999
T = min	41,417	<b>27,9</b>	347	2,304	3,572
dh = min	39,819	31,8	<b>315</b>	2,409	3,414
B <sub>norm</sub> = min	35,185	28,7	576	<b>2,083</b>	3,368
B <sub>mod</sub> = min	35,442	33,1	417	2,330	<b>2,798</b>

## 8.2 Einfluss der Fahrgeschwindigkeit

Aus den Testszenarien in Abschn. 8.1.2 ist ersichtlich, dass die Fahrgeschwindigkeit einen großen Einfluss auf die Routenplanung besitzt.

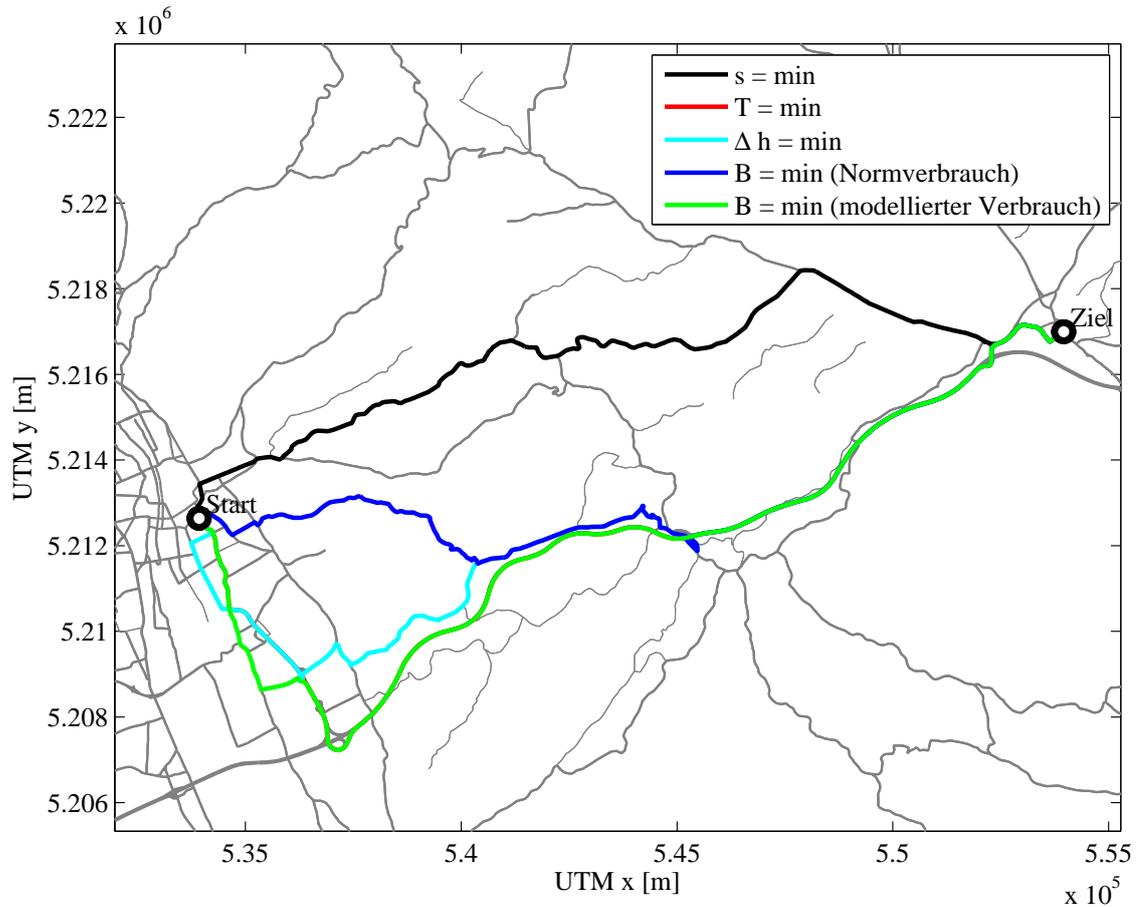
Im Zuge der Graphenbewertung werden die Fahrwiderstände bei der Bewegung entlang einer Kante ermittelt (siehe Kap. 7). Bei hohen Fahrgeschwindigkeiten dominiert hierbei der Luftwiderstand. Im umgesetzten Algorithmus zur Ermittlung der energieeffizientesten Route werden Autobahnen daher gemieden, da das gegebene Bewegungsmodell immer die höchstzulässige Streckengeschwindigkeit anstrebt.

Wird das Bewegungsmodell geändert, sodass Autobahnen und Schnellstraßen mit einer Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h befahren werden, so ändern sich die Resultate des Routings entsprechend. In Abb. 8.7 sind wiederum die Routen zwischen Graz und Gleisdorf dargestellt. Die Route mit dem niedrigsten modellierten Verbrauch (grün) führt nun auch über die Autobahn. Tab. 8.4 zeigt die geänderten Charakteristika der Routen. Hieraus ist ersichtlich, dass die Fahrzeit bei einer Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h um 2,5 min zunimmt. Der Verbrauch bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h nimmt bei Ermittlung nach diesem Modell für die schnellste Route um 0,383 L ab. Dies entspricht einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von knapp 20 %.

Das geänderte Bewegungsmodell beeinflusst nur die Route mit dem niedrigsten modellierten Kraftstoffverbrauch. Bei der Ermittlung der Route mit dem niedrigsten Normverbrauch wird die Höchstgeschwindigkeit einer Kante nicht berücksichtigt. Dieses Modell könnte durch die Angabe des Normverbrauchs für Autobahnfahrt ergänzt werden. Der Normverbrauch wird von den meisten PKW-Herstellern jedoch nur für die Bereiche „In-nerorts“ und „Außerorts“ angegeben.

**Tabelle 8.4:** Charakteristika der Routen zwischen Graz und Gleisdorf bei Beschränkung der Höchstgeschwindigkeit auf 100 km/h.

Route	s [km]	T [min]	dh [m]	B <sub>norm</sub> [L]	B <sub>mod</sub> [L]
s = min	<b>24,490</b>	23,7	430	1,642	2,108
T = min	28,099	<b>19,9</b>	332	1,581	1,924
dh = min	29,083	25,5	<b>327</b>	1,792	2,459
B <sub>norm</sub> = min	25,313	22,2	407	<b>1,569</b>	2,231
B <sub>mod</sub> = min	28,733	21,6	339	1,684	<b>1,896</b>



**Abbildung 8.7:** Darstellung der aufgrund verschiedener Kriterien ermittelten Routen zwischen Graz und Gleisdorf bei Beschränkung der Höchstgeschwindigkeit auf 100 km/h.

### 8.3 Einfluss der Traversenbewertung

Abbiegevorgänge resultieren in Brems- und Beschleunigungsvorgängen, die eine größere Fahrzeit und einen Mehrverbrauch an Kraftstoff hervorrufen. Ein Routing im Stadtgebiet veranschaulicht die Auswirkungen der Traversenbewertung. Als Start- und Zielknoten werden zwei Punkte im Stadtgebiet definiert. Die Daten der verschiedenen Routen zwischen Start- und Zielknoten sind in Tab. 8.5 angeführt. In Abb. 8.8 sind die Routen grafisch dargestellt.

**Tabelle 8.5:** Charakteristika der Routen im Stadtgebiet.

Route	s [km]	T [min]	dh [m]	$B_{\text{norm}}$ [L]	$B_{\text{mod}}$ [L]
s = min	<b>4,593</b>	7,2	71	0,389	0,422
T = min	4,713	<b>5,8</b>	56	0,400	0,275
dh = min	5,013	7,9	<b>51</b>	0,425	0,384
$B_{\text{norm}} = \text{min}$	4,593	7,2	71	<b>0,389</b>	0,422
$B_{\text{mod}} = \text{min}$	4,713	5,8	56	0,400	<b>0,275</b>

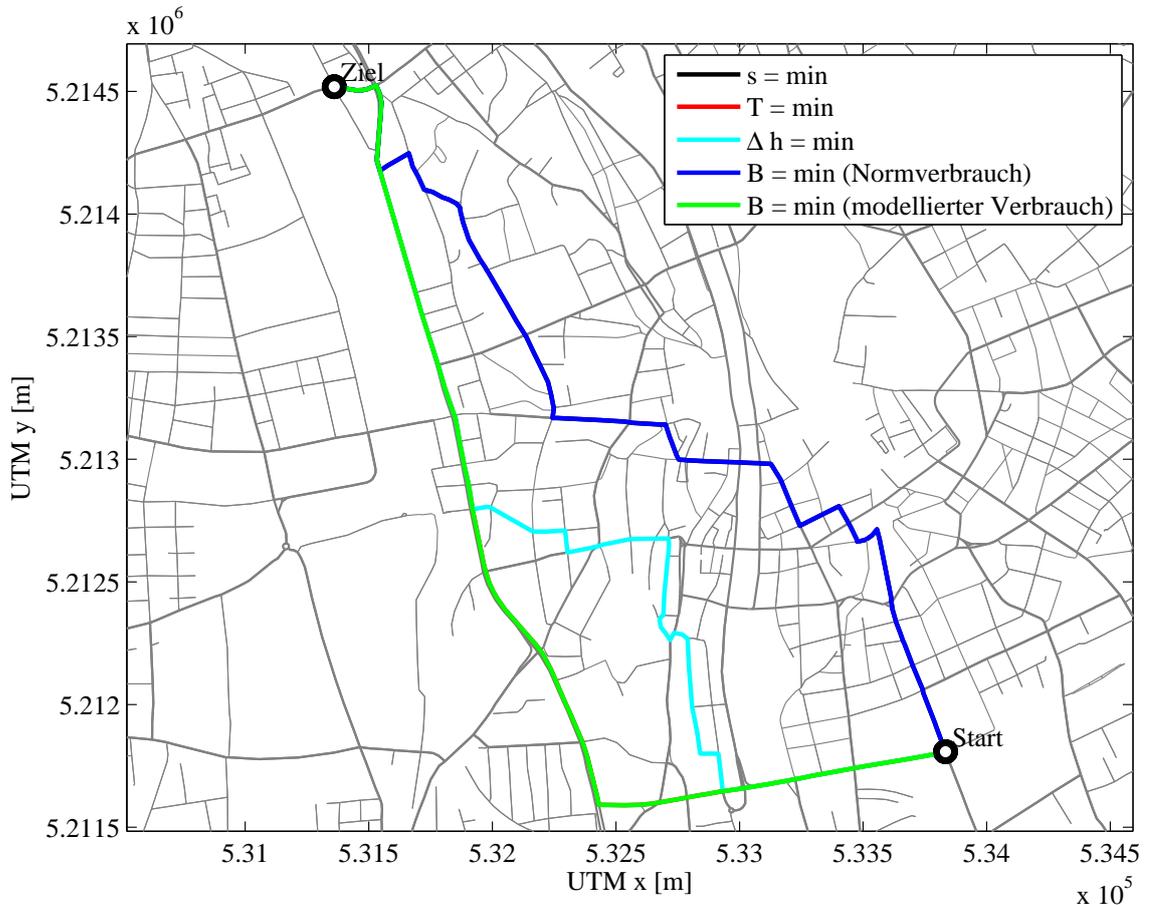


Abbildung 8.8: Darstellung der Routen im Stadtgebiet.

Durch die Traversenbewertung werden Abbiegevorgänge im Routing-Algorithmus reduziert. Somit folgt die effizienteste Route höherrangigen Straßen. Die kraftstoffsparendste Route entspricht somit der schnellsten Route. Die Route mit dem geringsten Normverbrauch entspricht innerorts in den meisten Fällen der Route mit der kürzesten Distanz.

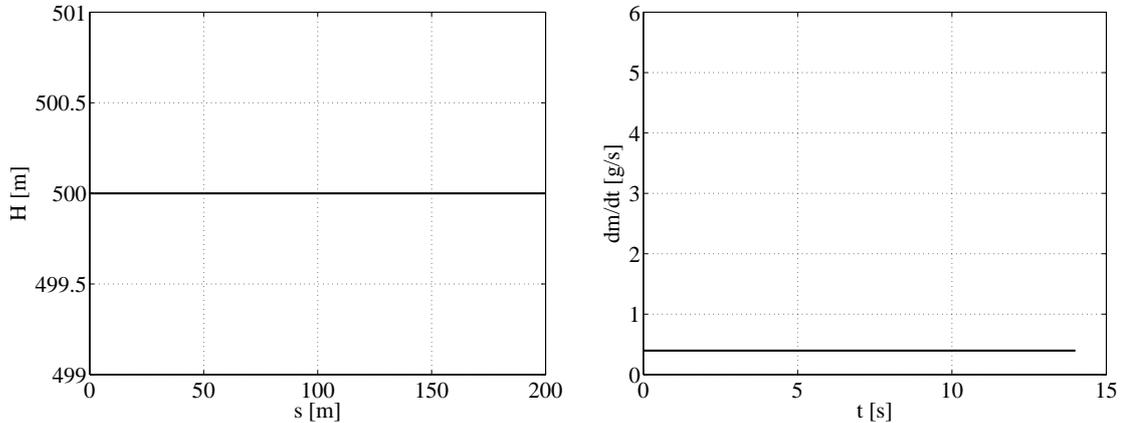
## 8.4 Einfluss unterschiedlicher Höhendaten

Bei den vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen verwendeten Höhendaten handelt es sich um ein digitales Geländemodell (DGM). Die Höhen der Knoten und Polygonpunkte beziehen sich damit auf die Erdoberfläche. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei den SRTM-Höhen um ein digitales Oberflächenmodell (DOM). Bauwerke und Vegetation können in diesen Daten enthalten sein (siehe Kap. 6).

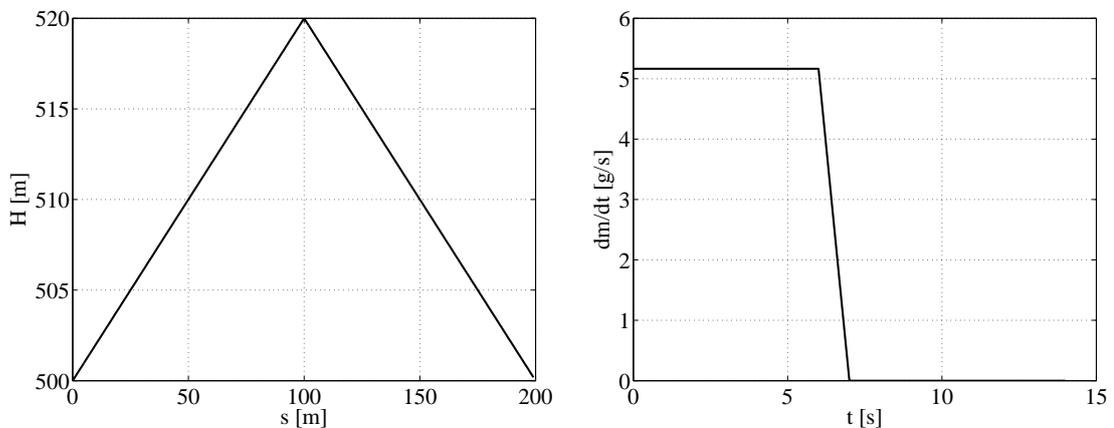
### 8.4.1 Extremfall: Kurze Strecke

Zur Abschätzung des Einflusses des Unterschieds zwischen BEV-Höhen und SRTM-Höhen wird ein Streckenabschnitt von 200 m Länge angenommen. Im Falle einer ebenen Strecke (Steigung 0%) beträgt der modellierte Kraftstoffverbrauch 0,007 L (siehe Abb. 8.9). Wird in der Mitte der Strecke ein Sprung der Höhe von 20 m angenommen, so beträgt der

modellierter Kraftstoffverbrauch hingegen 0,04 L (siehe Abb. 8.10). Der Wert des Sprungs kann bei der Verwendung eines DOMs durch den Wechsel zwischen Geländehöhe und Bauwerkshöhe durchaus auftreten. Obwohl in der zweiten Hälfte der Teststrecke durch das Gefälle kein Kraftstoff benötigt wird, liegt der Gesamtverbrauch durch die Steigung in der ersten Hälfte weit über dem Gesamtverbrauch der als eben angenommenen Strecke.



**Abbildung 8.9:** Simulation einer ebenen Strecke. Durch Integration des konstanten Kraftstoffmassenstroms  $\dot{m}$  (r.) ergibt sich ein Streckenverbrauch von 0,007 L.

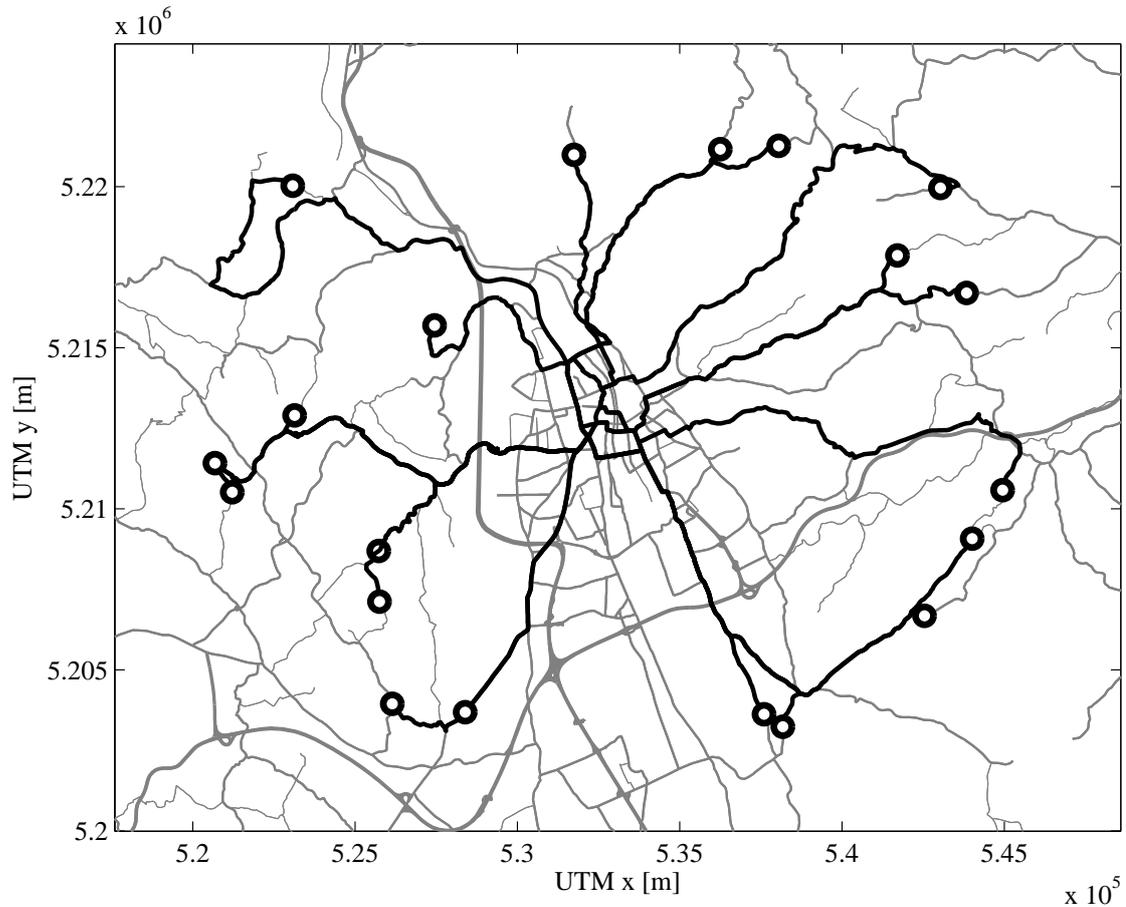


**Abbildung 8.10:** Auswirkung eines Sprungs in der Höhe eines kurzen Streckenabschnitts. Der Kraftstoffverbrauch steigt in diesem Fall auf 0,04 L.

### 8.4.2 Testrouten

Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Höhendaten wurden im Großraum Graz zehn Routen zufällig gewählt (siehe Abb. 8.11). Die durchschnittliche Länge der Routen beträgt 28,4 km, wobei die Routen so gewählt wurden, dass sie durch Zonen unterschiedlicher Vegetation und Bebauung führen.

In Tab. 8.6 sind Länge, Höhenunterschied sowie der modellierte Kraftstoffverbrauch der zehn Routen bei der Verwendung von BEV- bzw. SRTM-Daten angeführt. Werden die Datensätze hinsichtlich des Höhenunterschieds der einzelnen Routen verglichen, zeigt sich, dass zwischen den Daten beträchtliche Unterschiede bestehen. Durch Sprünge in den



**Abbildung 8.11:** Darstellung der zehn zufällig ausgewählten Routen im Projektgebiet.

SRTM-Daten ergibt sich hier eine durchschnittliche Steigerung von 43%. Dies äußert sich auch in einem modellierten Mehrverbrauch von durchschnittlich 19%.

**Tabelle 8.6:** Länge (s), Höhenunterschied (dh) und modellierter Kraftstoffverbrauch (B) der zehn Testrouten bei der Verwendung von BEV-Höhendaten (B) bzw. SRTM-Höhendaten (S).

Route	s [km]	dh <sub>B</sub> [m]	dh <sub>S</sub> [m]	Δdh [%]	B <sub>B</sub> [L]	B <sub>S</sub> [L]	ΔB [%]
1	43,2	488	857	+76	2,3243	3,0573	+32
2	27,8	595	816	+37	2,4323	2,8268	+16
3	29,5	654	859	+31	2,6552	2,9769	+12
4	27,1	450	613	+36	2,0336	2,3474	+15
5	20,4	188	233	+24	1,0574	1,1624	+10
6	21,6	362	570	+57	1,3569	1,7744	+31
7	26,2	389	513	+32	1,7735	2,0222	+14
8	33,5	647	827	+28	2,874	3,2262	+12
9	31,2	600	826	+39	2,4845	2,9679	+19
10	23,6	187	320	+71	1,0226	1,2883	+26
Durchschnitt	<b>28,4</b>			<b>+43</b>			<b>+19</b>

# Kapitel 9

## Resümee

### 9.1 Umgesetzte Software

In Kap. 8 wird gezeigt, dass durch Berücksichtigung einer Reihe von Parametern die energieeffizienteste Route für ein Kraftfahrzeug ermittelt werden kann. Die Ergebnisse des verwendeten Routing-Algorithmus hängen einerseits von fahrzeug- und straßenseitigen Kenngrößen sowie andererseits von der Bewegung ab. Die Fahrzeugmasse stellt die wichtigste konstante fahrzeugseitige Kenngröße dar. Bei der Graphenbewertung auf Basis der Daten eines ausgewählten Fahrzeugs ist die Fahrgeschwindigkeit von zentraler Bedeutung, da sie über Modelle direkt die Fahrwiderstände sowie den spezifischen Kraftstoffverbrauch beeinflusst. Die Ermittlung der aktuellen Fahrgeschwindigkeit ist bei der Verwendung von OpenStreetMap-Daten auf eine korrekte Attributisierung angewiesen. Die Markierung von Geschwindigkeitsbeschränkungen und Ortsgebieten stellt hier derzeit noch einen Schwachpunkt von OSM dar.

Der Vergleich von BEV- und SRTM-Höhen zeigt, dass der modellierte Kraftstoffverbrauch bei Verwendung des SRTM-Oberflächenmodells signifikant höher ist. Für die ermittelten Routen beträgt der Mehrverbrauch im Durchschnitt 20 %.

Quellen besagen, dass bereits durch die Verwendung von Fahrzeugnavigationssystemen eine Kraftstoffersparnis von 12 % möglich ist (vgl. [33]). Ohne Zweifel können Fahrzeugnavigationssysteme dezidiert zur Ermittlung der energieeffizientesten Route herangezogen werden, wie dies bereits angewandt wird. Der Straßenverkehr kann somit effizienter gestaltet werden und die Treibhausgasemissionen können reduziert werden. Umgekehrt können Reichweitenberechnungen angestellt werden, was besonders auf dem Gebiet der E-Mobilität von Interesse ist. Forschungsarbeit wird auch in Spezialgebieten wie dem Routing für RollstuhlfahrerInnen im innerstädtischen Bereich durchgeführt (siehe [25]).

Bei der im Zuge dieser Arbeit implementierten Software wurden stark abstrahierte Modelle zur Ermittlung des Energiebedarfs eines Fahrzeugs verwendet. Dem Grad an Detailliertheit ist nach oben hin keine Grenze gesetzt. Aus fahrzeugtechnischer Sicht trägt nahezu jedes System des Fahrzeugs zum Kraftstoffverbrauch bei. Bei einer genaueren Modellierung müssen etwa alle Verluste im Antriebsstrang modelliert sowie alle elektrischen Komponenten berücksichtigt werden. Auch stellt die Verwendung des Modells zur Ermittlung des spezifischen Verbrauchs eine starke Vereinfachung dar. Bei genaueren Anwendungen müssen Motorkennfelder zur Ermittlung des spezifischen Verbrauchs verwendet werden.

Die hier erhaltenen Ergebnisse könnten durch Testfahrten verifiziert und die verwendeten Modelle so verbessert werden. Für aussagekräftige Ergebnisse müssen im Realbetrieb jedenfalls individuelle Fahrmuster berücksichtigt werden.

## 9.2 OpenStreetMap und Routing

Das Projekt OpenStreetMap kann durchaus als Erfolgsprojekt bezeichnet werden. Durch den Collaborative Effort im Sinn von *Web 2.0* zeichnet sich OSM als Quelle von Geodaten in mehrfacher Hinsicht aus:

- Die Aktualität der Daten ist sehr hoch. Durch die Philosophie und die technische Infrastruktur von OpenStreetMap lassen sich Geodaten nahezu ohne Verzögerung akquirieren, einarbeiten, verspeichern und downloaden. So erfolgt oft z. B. die Registrierung von baustellenbedingten Straßensperren. Eine hohe zeitliche Auflösung der Daten wird jedoch nur in Gebieten mit einer größeren Anzahl an Usern erreicht. Auch ergeben sich durch die große Aktualisierungsrate mitunter Organisationsprobleme bei der Aktualisierung lokaler Datenbestände.
- Besonders in Ballungszentren weist OpenStreetMap eine sehr hohe Datendichte auf, die mit dem Umfang kommerzieller Dienste wie *Google Maps* nicht mehr vergleichbar ist. Durch die Möglichkeit, nahezu alle Objekte der realen Welt erfassen zu können, ist das Hauptaugenmerk vieler User nicht mehr nur auf die Erfassung von Straßen gerichtet.
- Die geometrische Genauigkeit der zweidimensionalen OpenStreetMap-Daten ist für Routing-Anwendungen mehr als ausreichend. Durch die multiple Datenerfassung und die breiten Möglichkeiten zur einfachen Überarbeitung und Korrektur der Daten kann die Lagegenauigkeit als sehr gut bezeichnet werden.
- Auch die Datenzuverlässigkeit kann aus den oben genannten Gründen als sehr hoch eingestuft werden. Ähnlich wie bei der populären Internet-Enzyklopädie *Wikipedia* sind nutzergenerierte Inhalte jedoch immer mit Skepsis zu betrachten. OpenStreetMap ist nicht vor Vandalismus geschützt, weshalb auch kein ungebrochenes Vertrauen in die Daten gesteckt werden darf.

Die Startseite von OpenStreetMap stellt heute ein GIS zur Visualisierung des Datenbestands dar (siehe [36]). Abseits davon werden von einer großen Community verschiedenste GIS-Methoden und -Anwendungen entwickelt. So existieren bereits viele On- und Offline-Routing-Programme. Zum Großteil handelt es sich um OpenSource-Anwendungen, deren Code frei verwendet und modifiziert werden kann. In dieser Arbeit wurde jedoch eine eigenständige Software entwickelt, um auf die besonderen Bedürfnisse des Routings hinsichtlich der Energieeffizienz (Einbindung von Höhendaten, Bewegungsmodell, Traversen usw.) eingehen zu können.

Bei der Implementierung der Routing-Software hat sich gezeigt, dass die OSM-Daten zur Routenplanung eingesetzt werden können. Von großer Bedeutung für die Ergebnisse des Routing-Algorithmus dieser speziellen Anwendung ist eine korrekte und vollständige Attributisierung der Objekte. Speziell bei der Verspeicherung von Geschwindigkeitsbeschränkungen besteht Verbesserungsbedarf.

Durch die vermehrte Verwendung von Navigationsgeräten im Straßenverkehr ergeben sich für OpenStreetMap interessante Möglichkeiten. So könnten die Positionsdaten von Navigationssystemen automatisch in OSM übernommen werden und so zur kontinuierlichen Verbesserung des Datenbestands beitragen. Auch im Sinne der Ermittlung von energieeffizienten Routen könnten Angaben zum Verbrauch für bestimmte Strecken interessant sein.

Unbestritten ist, dass für Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Genauigkeit und die Sicherheit nur Geodaten aus zuverlässigen Quellen verwendet werden dürfen.

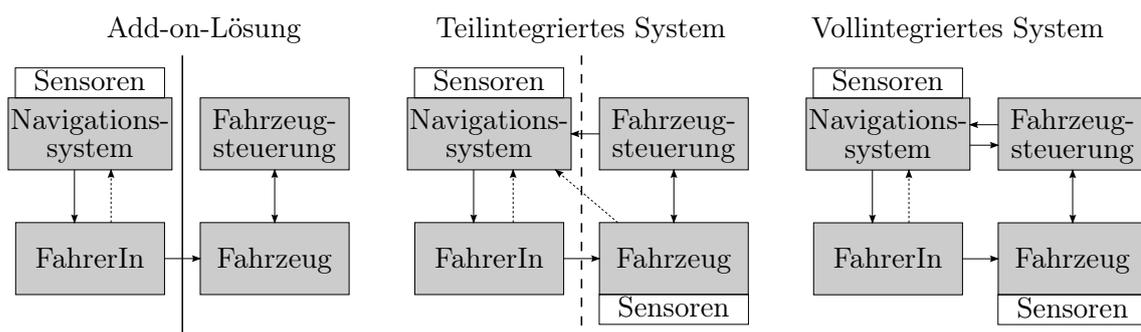
### 9.3 Ausblick

Unter dem Überbegriff der *Navigation* werden i.d.R. die Disziplinen *Positionsbestimmung* (engl. *Positioning*), Routenplanung (engl. *Routing*) und *Zielführung* (engl. *Guidance*) zusammengefasst. „Eine Position ist durch einen Satz von Koordinaten gegeben, die sich auf ein exakt definiertes Koordinatensystem beziehen [8, S. 1].“ Folglich wird an den Teilbereich des Positioning die Aufgabe gestellt, mittels verschiedenster Instrumente und Techniken die Position eines Objekts zu bestimmen („Wo?“). In den meisten Fällen kommen hierbei terrestrische oder satellitengestützte Radionavigationsverfahren zum Einsatz.

Die Disziplin der Routenplanung wird in dieser Arbeit ausführlich behandelt. Eine Routenplanung wird durch Vorgabe verschiedener Kriterien vor oder während der Bewegung eines Fahrzeugs durchgeführt, um den Weg zu einem Ziel zu finden. Im Vordergrund stehen somit die Fragestellungen „Wohin?“ und „Wie?“ (vgl. [8, S. 2]).

Die Zielführung dient zur Generierung von Anweisungen, die von BenutzerInnen zum Erreichen des Ziels ausgeführt werden müssen, während ein Fahrzeug in Bewegung ist. Hier soll die Frage „Welcher Schritt soll als nächstes folgen?“ beantwortet werden (vgl. [8, S. 2]). Ein Fahrzeugnavigationssystem gibt entsprechende Anweisungen optisch und akkustisch aus. In der Praxis ist vor der Zielführung eine Aufbereitung der Positionsdaten erforderlich. Hierbei wird die Position eines Fahrzeugs (die z. B. mittels GPS gewonnen wird) zur Kompensation von Fehlern auf die Kante eines Straßengraphen projiziert. Dies wird als *Map Matching* bezeichnet.

In Zukunft könnte der Einsatz von Navigationstechnologien zur Steigerung der Effizienz von Fahrzeugen an Bedeutung gewinnen. Eine interessante Anwendung hinsichtlich der möglichst effizienten Bewegung eines Fahrzeugs stellt in diesem Zusammenhang die Generierung von Steuerbefehlen an den Motor dar. Hierbei wird vom Navigationsgerät je nach Stufe der Integration über eine Schnittstelle auf die Motorsteuereinheit (engl. *Engine Control Unit, ECU*) zugegriffen. In einem vollintegrierten System umfassen die Kompetenzen der Zielführung somit nicht nur das Erstellen von Anweisungen an den/die LenkerIn, sondern direkt die Steuerung des Motors bzw. des gesamten Fahrzeugs (siehe Abb. 9.1).



**Abbildung 9.1:** Stufen der Integration von Fahrzeugnavigationssystemen. Abb. modifiziert nach [16, S. 2].

Durch die Kenntnis der aktuellen Fahrzeugposition sowie der Eigenschaften der geplanten Strecke (z. B. Kurven, Geschwindigkeitsbeschränkungen, Ortsgebiete, Steigungen usw.) könnten so Systeme zur möglichst vorausschauenden Bewegung eines Fahrzeugs entwickelt werden. Ziel ist hierbei die Reduktion unnötiger Brems- und Beschleunigungsvorgänge und die maximale Ausnutzung des Zusammenspiels von potenzieller und kinetischer Energie des Fahrzeugs.

Zahlreiche Forschungsprojekte befassen sich mit Ansätzen zur positionsabhängigen Steuerung von Fahrzeugen (engl. *Navigation-enabled Control*). So kann etwa die Geschwindigkeit eines PKWs durch die *Intelligent Cruise Control* beeinflusst werden (siehe [34]). Hierbei handelt es sich um einen Tempomaten, der die Fahrgeschwindigkeit vor Kurven automatisch reduziert und danach wieder erhöht. Die Position wird durch einen GPS-Empfänger ermittelt. Weiters gibt es Ansätze zur positionsabhängigen Steuerung von Nebenverbrauchern wie z. B. Heizung und Klimaanlage. Ein Beispiel hierfür ist in [28] angeführt.

Ansätze zur Steigerung der Effizienz des Straßenverkehrs führen oft auf das Gebiet der *Intelligenten Transportsysteme* (engl. *Intelligent Transportation Systems, ITS*). Hierbei wird eine Reihe von Disziplinen (Navigation, Telematik, Geoinformatik u. a.) mit dem Ziel kombiniert, durch den Einsatz von Informationstechnologie und verschiedener Sensoren den Verkehrsfluss zu beeinflussen. ITS umfassen die Bereiche der Fahrzeugnavigationssysteme, Flottenmanagementsysteme und Verkehrsleitsysteme (vgl. [8, S. 338]).

# Anhang A

## Fahrzeugdaten

Die bei der Graphenbewertung herangezogenen Fahrzeugparameter stammen aus dem Programm PHEM (vgl. [7, S. 31]). In Tab. A.1 bzw. Tab. A.2 sind die in den Modellen verwendeten Daten von Diesel- bzw. Benzinfahrzeugen unterschiedlicher Abgasnormen angeführt.

**Tabelle A.1:** Fahrzeugdaten durchschnittlicher Dieselfahrzeuge. Quelle: [7, S. 31]

	<b>EURO 3</b>	<b>EURO 4</b>	<b>EURO 5</b>	<b>EURO 6</b>
m [kg]	1420	1500	1550	1500
$P_e$ [kW]	82	93	93	93
$c_W$ [-]	0,3163	0,3113	0,305	0,299
A [m <sup>2</sup> ]	2,16	2,16	2,16	2,16
$r_A$ [m]	0,6264	0,6264	0,6264	0,6264
$\epsilon$ [-]	0,05	0,05	0,05	0,05
$F_{R0}$ [-]	0,00912	0,00890	0,00881	0,00872
$F_{R1}$ [s/m]	0,000105	0,000103	0,000102	0,000101
$F_{R4}$ [s <sup>4</sup> /m <sup>4</sup> ]	-1,325E-10	-1,380E-10	-1,380E-10	-1,380E-10

**Tabelle A.2:** Fahrzeugdaten durchschnittlicher Benzinfahrzeuge. Quelle: [7, S. 31]

	<b>EURO 3</b>	<b>EURO 4</b>	<b>EURO 5</b>	<b>EURO 6</b>
m [kg]	1250	1235	1250	1280
$P_e$ [kW]	70	72	75	80
$c_W$ [-]	0,3163	0,3113	0,305	0,299
A [m <sup>2</sup> ]	2,118	2,118	2,160	2,16
$\epsilon$ [-]	0,05	0,05	0,05	0,05
$r_A$ [m]	0,5989	0,6064	0,6264	0,6264
$F_{R0}$ [-]	0,00903	0,00890	0,00881	0,00872
$F_{R1}$ [s/m]	0,000117	0,000103	0,00010	0,00010
$F_{R4}$ [s <sup>4</sup> /m <sup>4</sup> ]	2,340E-10	-1,380E-10	-1,394E-10	-1,408E-10

Bei den Testszenarien wird ein Normverbrauch von 5,1 L/100 km (außerorts) bzw. 8,5 L/100 km (innerorts) angenommen.

## Anhang B

# Programmstruktur

Zur Umsetzung der in Kap. 7 beschriebenen Funktionalitäten wurde ein Programm mit der Software *MATLAB 7.7.0 (R2008b)* erstellt. Die Steuerung erfolgt kommandozeilenbasiert.

Im Folgenden ist eine alphabetische Auflistung aller im Programm enthaltenen Funktionen sowie der zusätzlich benötigten Dateien angeführt. Details zu Parametern und Rückgabewerten können dem Header der jeweiligen Funktion entnommen werden (siehe Anh. D bzw. beigelegte CD-ROM).

Auf den Seiten 90 und 91 ist die Struktur des Programms schematisch dargestellt. Abb. B.1 zeigt die Funktionen zum Einlesen und Verspeichern der OpenStreetMap-Daten sowie zur Auswahl und Aufbereitung spezifischer Straßendaten. In Abb. B.2 sind die Funktionen zur Graphenbewertung sowie zur Visualisierung und Ausführung der Anwendungen dargestellt.

Abb. B.3 auf S. 92 zeigt schematisch die Organisation bzw. Verspeicherung der Straßendaten in Form verketteter Adjazenzlisten.

### Funktionen:

**analyzeArc.m** Auf Basis eines Bewegungsmodells werden für eine Kante des Straßengraphen alle relevanten Charakteristika ermittelt. Dies sind Länge, Fahrzeit, Höhenunterschied, Normverbrauch und modellierter Verbrauch. Die Bewegung wird von Streckenhöchstgeschwindigkeiten, Kurvenradien und der Fahrzeugdynamik bestimmt.

**fixTopology.m** Funktion zur Bereinigung der OpenStreetMap-Daten, d. h. Korrektur der fehlerhaften Topologie. Kanten des Straßengraphen werden geteilt, wenn andere Kanten ohne Knoten auf die Kante treffen bzw. wenn sich Kanten ohne Knoten schneiden. Zusätzlich erfolgt die Korrektur der Höhendaten für Kanten, die als Brücken und Tunnels markiert sind (Lineare Interpolation vom Anfangs- zum Endknoten).

**generateAdjacencyLists.m** Funktion zur Verspeicherung von OpenStreetMap-Straßendaten in Form verketteter Adjazenzlisten. Alle Objekte werden für einen einfachen Zugriff in Listen organisiert. Die Organisation der Daten ist in Abb. B.3 schematisch dargestellt.

**getArcData.m** Funktion zum Auslesen der Charakteristika einer einzelnen Kante (Kantenlänge, Fahrzeit, Höhenunterschied, Normverbrauch und modellierter Verbrauch).

**getArcID.m** Funktion zur Ermittlung der ID einer Kante durch Definition von Anfangs- und Endknoten.

**getCircleRadius.m** Funktion zur Bestimmung des Radius eines Kreises, der durch drei Kreispunkte definiert ist. Die Funktion dient zur Ermittlung der Kurvenradien.

**getInverseUTM.m** Funktion zur inversen UTM-Projektion (Umwandlung von UTM-Koordinaten in geographische Koordinaten).

**getMultipleRoute.m** Funktion zur Ausführung des sequentiellen Routings. Zwischen mehreren definierten Knoten werden die kürzesten Routen ermittelt.

**getNodeElevationFile.m** Bei Verwendung von Höhen des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen (oder anderer externer Datenquellen) werden mit dieser Funktion die Punkthöhen aus einer Datei eingelesen.

**getNodeElevationSRTM.m** Sind keine externen Höhendaten vorhanden, wird auf SRTM-Höhen zurückgegriffen. Das Einlesen dieser Daten wird in dieser Funktion veranlasst.

**getPolygonPoints.m** Funktion zur Ermittlung der Polygonpunkte einer Kante.

**getResidentialData.m** Aus den OpenStreetMap-Rohdaten (Nodes und Ways) werden die Ortsgebiete zur Verwendung bei der Graphenbewertung extrahiert und gespeichert (*residential\_data.mat*).

**getRoute.m** Funktion zur Ermittlung der optimalen Route zwischen zwei Knoten auf Basis des Dijkstra-Algorithmus. Als Optimierungskriterium können Distanz, Fahrzeit, Höhenunterschied, Normverbrauch und modellierter Verbrauch herangezogen werden.

**getSearchTree.m** Routine zur Ermittlung des Suchbaums zur Reichweitenabschätzung, ausgehend von einem definierten Startknoten.

**GetSRTMData.m** Funktion zum Einlesen der SRTM-Rohdaten. Diese Datei stammt vom *MATLAB CENTRAL File Exchange* und wurde 2009 von S. Hölz erstellt [29]. Die zugehörigen .hgt-Dateien müssen in einem lokalen Verzeichnis gespeichert sein.

**getTraverseData.m** Funktion zur Akquirierung der Daten einer einzelnen Traverse.

**getUTM.m** Funktion zur Verebnung von geographischen Koordinaten mittels Universaler Transversaler Mercatorprojektion (UTM). Geographische Länge und Breite eines Punkts werden in Rechtswert und Hochwert der jeweiligen UTM-Zone übergeführt.

**main.m** Startfunktion zum Aufruf aller Anwendungen des Programms.

**parseOSMFile.m** Funktion zum Einlesen der OpenStreetMap-Rohdaten. Eine .osm-Datei wird zeilenweise analysiert und alle relevanten straßenbezogenen Daten von Nodes, Ways und Relations werden extrahiert und gespeichert (*osm\_data.mat*). Zur weiteren Verwendung (siehe *getResidentialData.m*) werden Nodes, Ways und Relations zusätzlich in eigenen Dateien gespeichert.

**plotAdjacencyListData.m** Funktion zur Erzeugung eines Plots aus den in den Adjazenzlisten (*lists\_\*.mat*) gespeicherten Straßendaten.

**plotOSMData.m** Funktion zur Darstellung der OpenStreetMap-Rohdaten nach dem Einlese- und Bereinigungsprozess.

**plotRoute.m** Funktion zur grafischen Darstellung einer ermittelten Route.

**plotRouteTerrain.m** Funktion zur 3D-Darstellung eines Geländeausschnitts.

**plotSearchTree.m** Funktion zur grafischen Darstellung eines ermittelten Suchbaums.

**selectData.m** Aus dem Gesamtdatensatz einer .osm-Datei können kleinräumige Bereiche („*project*“) durch Angabe eines MBR selektiert werden. Zusätzlich können die verwendeten Straßenklassen eingeschränkt werden. Neben der räumlichen und thematischen Selektion werden die Straßendaten mit Höheninformationen versehen. Hierzu wird auf SRTM-Daten oder Höhen aus einer externen Datei (bei der Verwendung von BEV-Höhen) zugegriffen. Weiters werden die geographischen Koordinaten aus OpenStreetMap mittels UTM-Projektion verebnet. In dieser Funktion werden die OSM-Daten zudem topologisch bereinigt.

**selectResidentialData.m** Ähnlich wie in *selectData.m* können mittels dieser Funktion aus dem OpenStreetMap-Gesamtdatensatz alle Ortsgebiete innerhalb eines Projekts ausgewählt werden.

**setRoadSpecifications.m** Funktion zur Definition der Charakteristika aller in den OpenStreetMap-Daten enthaltenen Straßentypen.

**setVehicleSpecifications.m** Funktion zur Definition von Charakteristika ausgewählter Fahrzeugklassen.

**valuateGraph.m** Zentrale Funktion zur Graphenbewertung. Die Kostenzahlen aller Kanten werden ermittelt und in den verketteten Adjazenzlisten gespeichert. Auch die Traversen werden mit Kostenzahlen versehen, die den zusätzlichen Verbrauch an Zeit und Kraftstoff ausdrücken.

#### Zusätzliche Dateien:

**colormap\_\*.mat** Dateien mit Farbeinstellungen für Plots.

**osm\_data.mat** Datei mit allen Straßendaten (Nodes, Ways und Relations) einer osm.-Datei.

**residential\_data.mat** Datei mit allen Ortsgebieten einer osm.-Datei.

**residentialdata\_graz\_wide.mat** Datei mit allen Ortsgebieten des Projektgebiets (Großraum Graz).

**roaddata\_graz\_wide.mat** Eingelesene OpenStreetMap-Rohdaten des Projektgebiets (Großraum Graz).

**vlists\_graz\_wide.mat** Straßendaten des Projektgebiets (Großraum Graz) in Form verketteter Adjazenzlisten.

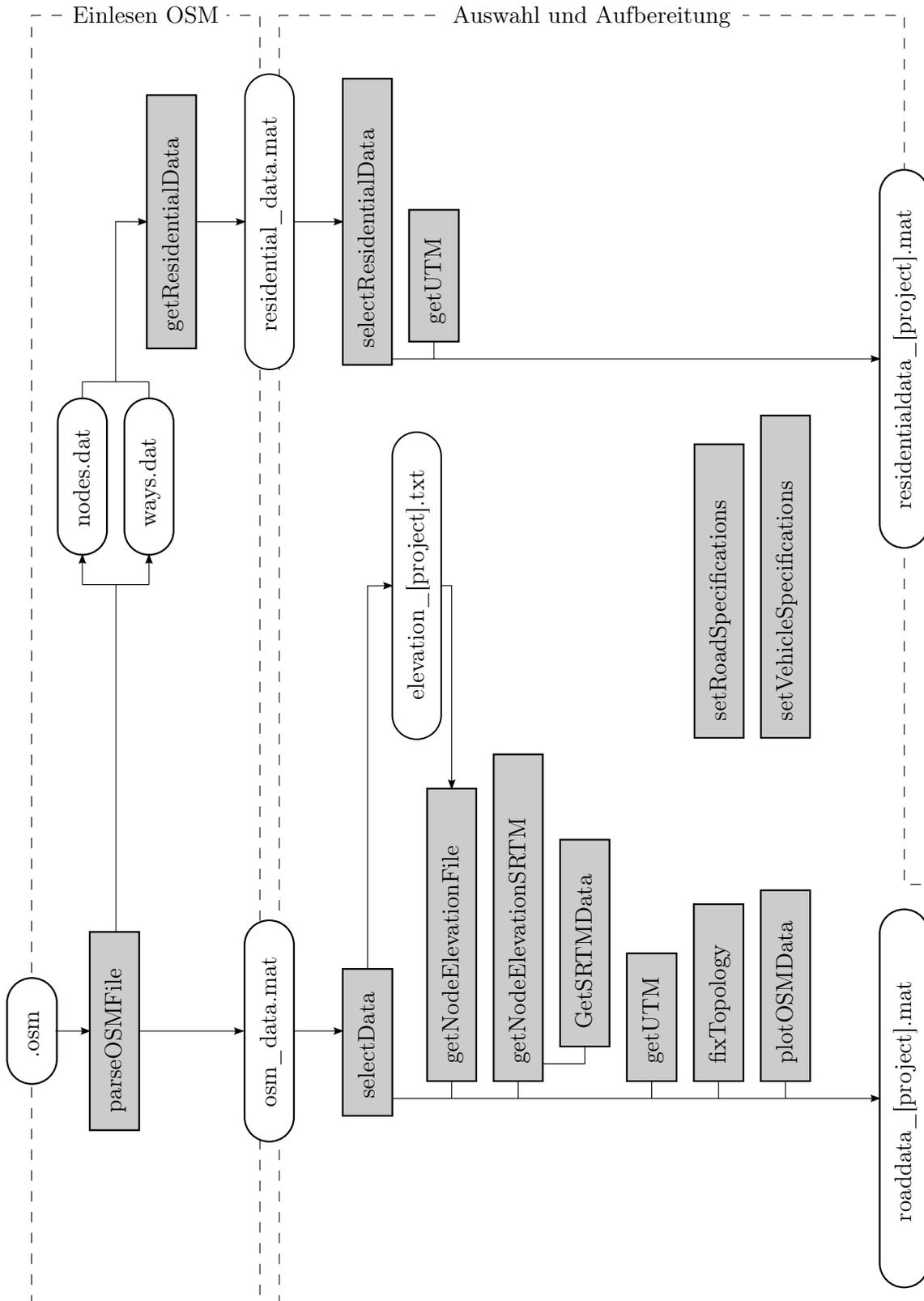


Abbildung B.1: Einlesen, Auswahl und Aufbereitung der OpenStreetMap-Daten.

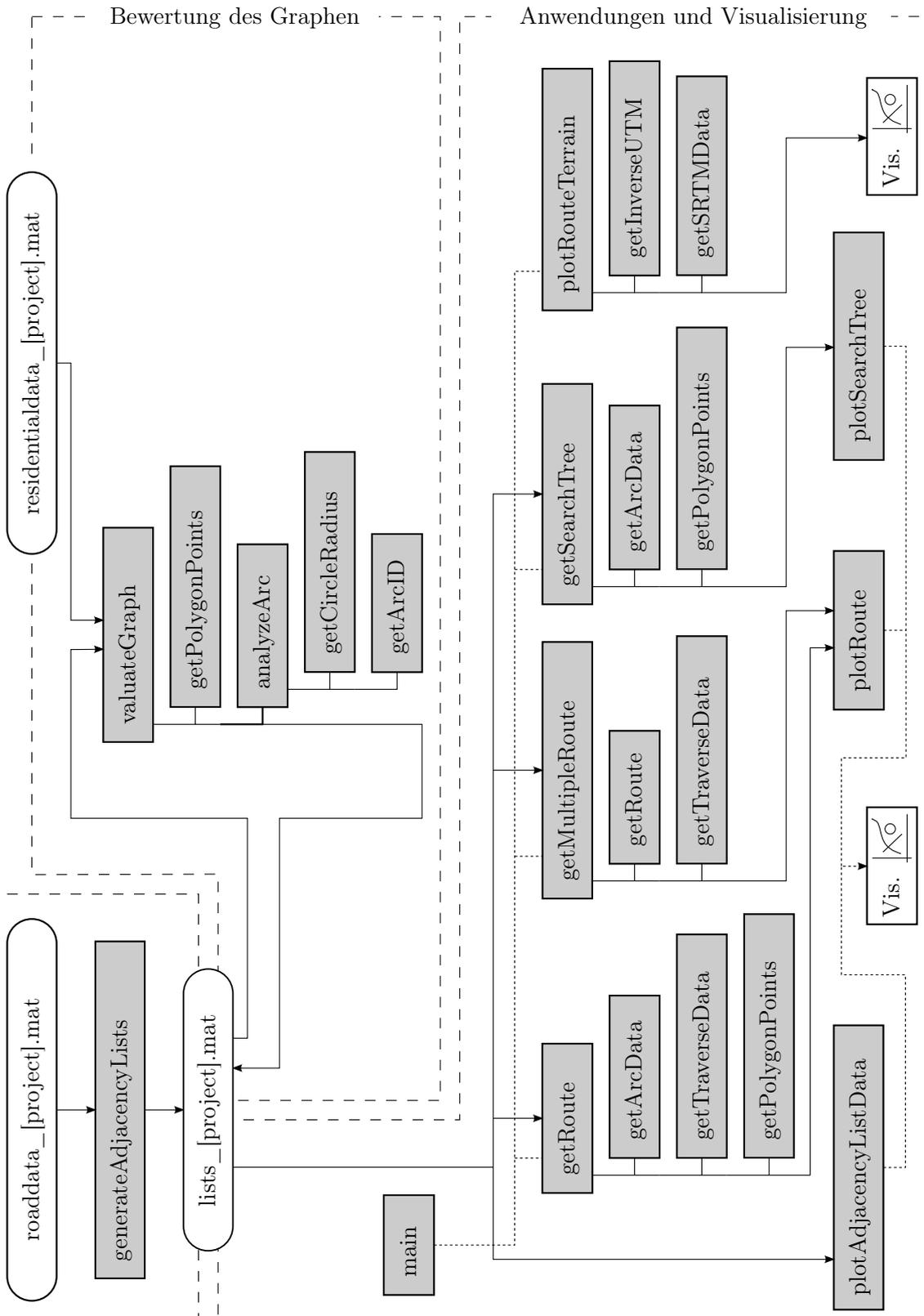
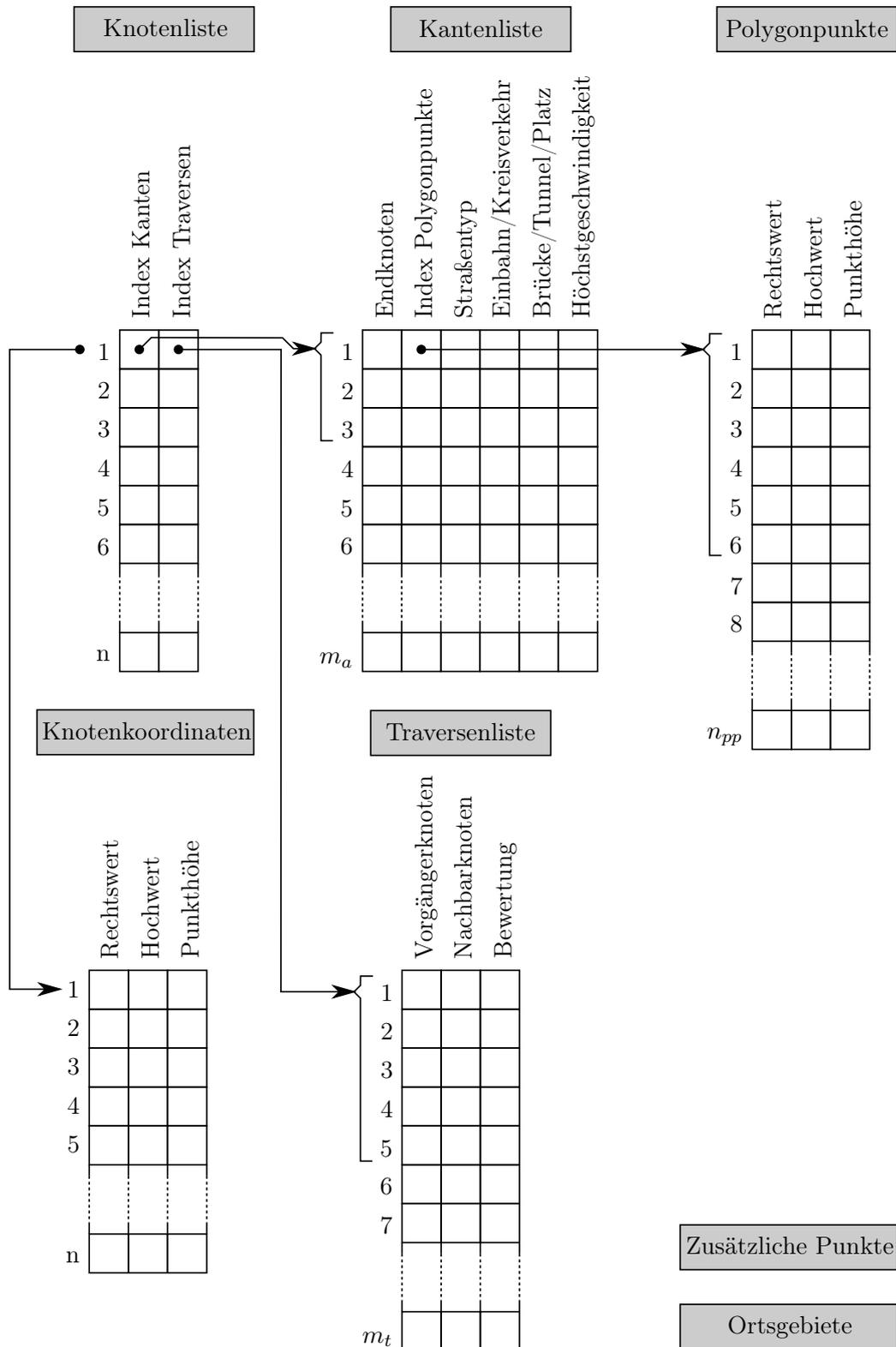


Abbildung B.2: Bewertung des Graphen und Anwendungen des Programms.



**Abbildung B.3:** Schema der Datenorganisation des Programms. Neben den Listen zur topologischen und geometrischen Verspeicherung der Knoten-Kanten-Struktur werden die zur späteren Graphenbewertung und Visualisierung benötigten Daten über Verkehrsinfrastruktur und Ortsgebiete verspeichert.

## Anhang C

# UTM-Projektion

Die Universale Transversale Mercatorprojektion (UTM) ist eine konforme transversale zylindrische Kartenprojektion. Im Folgenden sind die Formeln der UTM-Projektion angeführt, nach denen die ellipsoidischen WGS-84-Koordinaten der OpenStreetMap-Daten verebnet werden. Die Formeln entstammen den Ausführungen in [9, S. 286 – 289].

Ein Punkt mit der ellipsoidischen Breite  $\varphi$  und der ellipsoidischen Länge  $\lambda$  wird mittels der Reihenentwicklungen

$$\begin{aligned} y = 0,9996 \cdot [ & B(\varphi) + \frac{t}{2} N \cos^2 \varphi l^2 + \frac{t}{24} N \cos^4 \varphi (5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4) l^4 \\ & + \frac{t}{720} N \cos^6 \varphi (61 - 58t^2 + t^4 + 270\eta^2 - 330t^2\eta^2) l^6 \\ & + \frac{t}{40320} N \cos^8 \varphi (1385 - 3111t^2 + 543t^4 - t^6) l^8 + \dots ] \end{aligned} \quad (\text{C.1})$$

und

$$\begin{aligned} x = 0,9996 \cdot [ & N \cos \varphi l + \frac{1}{6} N \cos^3 \varphi (1 - t^2 + \eta^2) l^3 \\ & + \frac{1}{120} N \cos^5 \varphi (5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58t^2\eta^2) l^5 \\ & + \frac{1}{5040} N \cos^7 \varphi (61 - 479t^2 + 179t^4 - t^6) l^7 + \dots ] \end{aligned} \quad (\text{C.2})$$

mit

$$\begin{aligned} N &= \frac{a^2}{b\sqrt{1+\eta^2}} \\ \eta^2 &= e'^2 \cos^2 \varphi \\ e'^2 &= (a^2 - b^2)/b^2 \\ t &= \tan \varphi \\ l &= \lambda - \lambda_0 \end{aligned} \quad (\text{C.3})$$

in die ebenen Koordinaten  $y$  und  $x$  übergeführt. Die Koordinate  $y$  wird üblicherweise als Hochwert (engl. *UTM northing*),  $x$  wird als Rechtswert (engl. *UTM easting*) bezeichnet.

Die Meridianbogenlänge  $B(\varphi)$  wird mittels

$$B(\varphi) = \alpha[\varphi + \beta \sin 2\varphi + \gamma \sin 4\varphi + \delta \sin 6\varphi + \epsilon \sin 8\varphi + \dots] \quad (\text{C.4})$$

und

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \frac{a+b}{2} \left( 1 + \frac{1}{4}n^2 + \frac{1}{64}n^4 + \dots \right) \\
 \beta &= -\frac{3}{2}n + \frac{9}{16}n^3 - \frac{3}{32}n^5 + \dots \\
 \gamma &= \frac{15}{16}n^2 - \frac{15}{32}n^4 + \dots \\
 \delta &= -\frac{35}{48}n^3 + \frac{105}{256}n^5 - \dots \\
 \epsilon &= \frac{315}{512}n^4 + \dots
 \end{aligned} \tag{C.5}$$

mit

$$n = \frac{a-b}{a+b} \tag{C.6}$$

errechnet. Die entsprechenden Parameter des WGS-84-Ellipsoids sind in Tab. C.1 angeführt.

**Tabelle C.1:** Die für die UTM-Projektion benötigten Größen von WGS-84. Quelle: [9]

a	6 378 137 m
b	6 356 752,314 25 m
$\alpha$	6 367 449,1458 m
$\beta$	$-2,518\,827\,92 \cdot 10^{-3}$
$\gamma$	$2,643\,54 \cdot 10^{-6}$
$\delta$	$-3,45 \cdot 10^{-9}$
$\epsilon$	$5 \cdot 10^{-12}$

Die Differenz der ellipsoidischen Länge  $l$  (in Gl. C.3) hängt vom Mittelmeridian  $\lambda_0$  der jeweiligen UTM-Zone ab. Die Zonennummer eines Punkts und ihr zugehöriger Mittelmeridian lassen sich mittels

$$z = \text{INT} \left( \frac{180 \pm \lambda}{6} \right) + 1 \tag{C.7}$$

und

$$\lambda_0 = z \cdot 6 - 183 \tag{C.8}$$

berechnen.

## Anhang D

# Inhalt der CD-ROM

Am Ende dieser Arbeit ist eine CD-ROM beigelegt, welche die wichtigsten Dateien des Programms sowie diese Masterarbeit enthält.

### Programmdateien

**Pfad:** MATLAB/

- \*.m . . . . . Programmfunktionen; Über die zentrale Datei *main.m* werden die Anwendungen gestartet.
- \*.mat . . . . . Straßendaten und sonstige Programmdateien.

### Masterarbeit

**Pfad:** Masterarbeit/

- Masterarbeit.pdf . . . . Endversion der Masterarbeit im PDF-Format.

# Quellenverzeichnis

## Literatur

- [1] Antony, P. „Hybridantrieb“. In: *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Hrsg. von Braess, H.-H. und Seiffert, U. 5. Aufl. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007. Kap. 4.3.3.
- [2] Bartelme, N. *Geoinformatik: Modelle, Strukturen, Funktionen*. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2005.
- [3] Cormen, T. H. u. a. *Introduction to Algorithms, Second Edition*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2001.
- [4] Graf, J. „Das digitale Geländemodell für Geoidberechnungen und Schwerereduktionen in Österreich“. In: *Proceedings of the 7th International Meeting on Alpine Gravimetry*. (Wien). Hrsg. von Meurers, B. Bd. 14. Wien: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 1996.
- [5] Haken, K.-L. *Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik*. München: Carl Hanser Verlag, 2008.
- [6] Haklay, M. und Weber, P. „OpenStreetMap: User-Generated Street Maps“. In: *IEEE Pervasive Computing* 7.4 (2008), S. 12–18. URL: <http://discovery.ucl.ac.uk/13849/1/13849.pdf> (besucht am 21.10.2011).
- [7] Hausberger, S. u. a. *Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3*. Techn. Ber. I-20a/2009 Haus-Em 33a/08/679. Graz, Austria: Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Graz University of Technology, Dez. 2009.
- [8] Hofmann-Wellenhof, B., Legat, K. und Wieser, M. *Navigation – Principles of Positioning and Guidance*. Wien, New York: Springer-Verlag, 2003.
- [9] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. und Collins, J. *GPS - Theory and Practice*. 5. Aufl. Wien, New York: Springer-Verlag, 2001.
- [10] Kahn Ribeiro, S. u. a. „Transport and its infrastructure“. In: *Climate Change. Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Hrsg. von Metz, B u. a. Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. URL: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter5.pdf> (besucht am 24.10.2011).
- [11] Mellios, G. u. a. *Parameterisation of fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions of passenger cars and light commercial vehicles for modelling purposes*. Techn. Ber. 10.RE.005.V1. Thessaloniki, Greece: EMISIA, Nov. 2010.

- [12] Pischinger, F. „Grundlagen der Motorentechnik“. In: *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Hrsg. von Braess, H.-H. und Seiffert, U. 5. Aufl. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007. Kap. 5.1.
- [13] Ramm, F. und Topf, J. *OpenStreetMap - Die freie Weltkarte nutzen und mitgestalten*. 2. Aufl. Berlin: Lehmanns Media, 2009.
- [14] Reif, K. und Dietsche, K.-H. *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. Hrsg. von Robert Bosch GmbH. 27. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [15] Rodriguez, E u. a. *An Assessment of the SRTM Topographic Products*. Techn. Ber. JPL D-31639. California: Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 2005. URL: [http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM\\_D31639.pdf](http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_D31639.pdf) (besucht am 18.10.2011).
- [16] Schmidt, S. und Abart, M. *NAVECO - Einsatz von Navigationstechnologien zur Verminderung von fahrzeugbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen und Reichweitenberechnung, Unveröffentlichte Ideenskizze*. 2009.
- [17] Seiffert, U. „Fahrzeugphysik“. In: *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Hrsg. von Braess, H.-H. und Seiffert, U. 5. Aufl. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007. Kap. 3.
- [18] Umweltbundesamt. *Klimaschutzbericht 2011*. Techn. Ber. REP 0334. Wien: Umweltbundesamt GmbH, 2011.
- [19] Verkehrsclub Österreich. „Energiewende – Schlüsselfaktor Verkehr“. In: *VCO factsheet 09 (2010)*. URL: [http://www.vcoe.at/de/publikationen/vcoe-factsheets/details/items/Factsheet2010-09?file=tl\\_files/vcoe/uploads/News/VCOe-Factsheets/Factsheets/2010-09Energiewende.pdf](http://www.vcoe.at/de/publikationen/vcoe-factsheets/details/items/Factsheet2010-09?file=tl_files/vcoe/uploads/News/VCOe-Factsheets/Factsheets/2010-09Energiewende.pdf) (besucht am 23.10.2011).
- [20] Wüchner, E. „Elektroantriebe“. In: *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Hrsg. von Braess, H.-H. und Seiffert, U. 5. Aufl. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007. Kap. 4.3.1.
- [21] Wolf, J. und Huß, C. „Konventionelle und alternative Kraftstoffe“. In: *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Hrsg. von Braess, H.-H. und Seiffert, U. 5. Aufl. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007. Kap. 5.9.
- [22] Zhao, Y. *Vehicle Location and Navigation Systems*. Boston, London: Artech House, 1997.

## Online-Quellen

- [23] Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen. *Digitales Geländehöhenmodell - Höhenraster*. 2011. URL: [http://www.bev.gv.at/portal/page?\\_pageid=713,1572954&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,1572954&_dad=portal&_schema=PORTAL) (besucht am 25.10.2011).
- [24] Creative Commons. *Creative Commons Attribution-ShareAlike 2.0 Generic (CC BY-SA 2.0)*. 2011. URL: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/> (besucht am 22.09.2011).
- [25] Dzafic, D. *Entwicklung und Evaluierung eines Navigationssystems für Elektromotoren*. 2011. URL: <https://embedded.rwth-aachen.de/doku.php?id=forschung:enav> (besucht am 27.05.2011).
- [26] Garmin. *Garmin ecoRoute HD*. 2011. URL: <http://media.garmin.at/minisite/ecoHD/> (besucht am 20.10.2011).
- [27] Geofabrik GmbH. *Geofabrik Downloadbereich*. 2011. URL: <http://download.geofabrik.de/osm/europe/> (besucht am 10.10.2011).

- [28] Güttler, G. *Galileo-Ecodrive - reduces vehicles fuel consumption*. 2008. URL: [http://www.esa.int/esaMI/TTP2/SEMNP70YUFF\\_0.html](http://www.esa.int/esaMI/TTP2/SEMNP70YUFF_0.html) (besucht am 10.06.2011).
- [29] Hölz, S. *GetSRTMData: Extract height information from SRTM-files*. 2004. URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/5544-getsrtmdata> (besucht am 19.03.2011).
- [30] INFRAS. *Handbook of Emission Factors for Road Transport (HBEFA)*. URL: <http://www.hbefa.net> (besucht am 17.09.2011).
- [31] INFRAS. *Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA 3.1)*. 2010. URL: <http://www.infras.ch/d/projekte/displayprojectitem.php?id=624> (besucht am 17.09.2011).
- [32] Jet Propulsion Laboratory. *Shuttle Radar Topography Mission - The Mission to Map the World*. 2011. URL: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html> (besucht am 25.09.2011).
- [33] NAVTEQ. *NAVTEQ Helps Drivers Calculate How Much Can Be Saved By Using Navigation Systems*. 2011. URL: <http://press.navteq.com/index.php?s=4260&item=23373> (besucht am 02.11.2011).
- [34] Nissan. *Intelligent Cruise Control*. 2011. URL: <http://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/icc.html> (besucht am 24.10.2011).
- [35] OpenStreetMap.de. *OpenStreetMap.de - Die freie Wiki-Weltkarte*. 2011. URL: <http://www.openstreetmap.de> (besucht am 22.09.2011).
- [36] OpenStreetMap.org. *OpenStreetMap - The Free Wiki World Map*. 2011. URL: <http://www.openstreetmap.org> (besucht am 22.09.2011).
- [37] openstreetmap.org. *OpenStreetMap Foundation*. 2011. URL: <http://www.osmfoundation.org> (besucht am 21.10.2011).
- [38] OpenStreetMap.org. *OpenStreetMap Wiki*. 2011. URL: [http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Main\\_Page](http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Main_Page) (besucht am 22.09.2011).
- [39] United States Geological Survey. *Index of /srtm/version2\_1/SRTM3/Eurasia*. 2011. URL: [http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2\\_1/SRTM3/Eurasia/](http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/Eurasia/) (besucht am 10.10.2011).
- [40] VW. *Start-Stopp-System*. 2011. URL: <http://www.volkswagen.de/de/Volkswagen/InnovationTechnik/technik-lexikon/start-stopp-system.html> (besucht am 25.10.2011).