

Planung energieeffizienter Routen in Straßennetzwerken

Diplomarbeit
von

Sabine Neubauer

an der Fakultät für Informatik

Erstgutachter:	Prof. Dr. Peter Sanders
Zweitgutachter:	Prof. Dr. Dorothea Wagner
Betreut durch:	Dipl.-Inform. Robert Geisberger Dipl.-Inform. Moritz Kobitzsch Dipl.-Inform. Stefan Hug (PTV AG) Dr. Ralf Mikulla (PTV AG) Dr. Frank Schulz (PTV AG)

Bearbeitungszeit: 20. Oktober 2009 – 17. März 2010

Zusammenfassung

Angesichts von Klimawandel und beschränkten Erdölressourcen ist ein Umdenken bezüglich Energieverbrauch und Schadstoffemission unumgänglich. Der Straßenverkehr ist einer der größten Endenergieverbraucher und trägt einen großen Anteil zu den Emissionen bei. Eine Reduzierung der Fahrten würde weniger Mobilität und Flexibilität bedeuten und ist daher kaum denkbar. Eine andere Möglichkeit den Energieverbrauch und damit auch den Schadstoffausstoß im Straßenverkehr zu senken bietet die Wahl energieeffizienter Routen.

Diese Arbeit stellt einen ersten Schritt in diesem Bereich dar. Es werden zwei Modelle jeweils in verschiedenen Varianten präsentiert, die der Energieverbrauchsberechnung dienen. Dabei handelt es sich um einen verbrauchsbasierten sowie um einen physikalischen Ansatz. Mithilfe der Modelle ist es möglich die Kostenfunktion für den Kürzeste-Wege-Algorithmus von Dijkstra in Abhängigkeit von dem Energieverbrauch zu definieren und somit optimale Routen bezüglich des Energieverbrauchs zu bestimmen.

Grundlage des verbrauchsbasierten Modells bilden Kraftstoffverbrauchswerte, welche aus dem Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) stammen. Abhängig von diversen Fahrzeugeigenschaften sowie Größen, die die Straße sowie die Verkehrssituation beschreiben, ergibt sich wie viel Kraftstoff verbraucht wird. In dieser Arbeit wird vor allem nach Straßenkategorie sowie nach Steigung und Gefälle unterschieden. Insgesamt kann die Vorgehensweise als Top-down-Ansatz bezeichnet werden.

Im Gegensatz dazu ist das physikalische Modell ein Bottom-up-Ansatz. Der Energieverbrauch wird auf Basis von physikalischen Formeln und Zusammenhängen bestimmt und hängt sowohl von dem zu überwindenden Fahrwiderstand als auch von den Wirkungsgraden des Motors sowie des Antriebsstrangs ab. Neben der Masse des Fahrzeugs hat die gefahrene Geschwindigkeit einen großen Einfluss auf den benötigten Kraftstoff. Auch in diesem Modell werden Längsneigungen berücksichtigt.

Nach der Modellierung des Energieverbrauchs wird ausführlich evaluiert, welchen Einfluss dieser in den diversen Modellvarianten auf den Verlauf und die Kosten einer Route hat. Letztere werden dabei im sogenannten Stundenlohnmodell abhängig von einem Stundenlohn des Fahrers sowie von den Kosten für den verbrauchten Kraftstoff bestimmt. Es werden Routen für Anfragen diverser Testdatensätze nach den verschiedenen Modellvarianten berechnet und miteinander verglichen. Dabei werden unterschiedliche Stundenlöhne eingesetzt um die Priorisierung von Fahrtzeit und Energieverbrauch zu variieren.

In der Evaluierung werden zwei Arten von Vergleichen betrachtet. Um den Effekt von Höhendaten herauszuarbeiten und die verschiedenen Evolutionsstufen zu analysieren, werden verschiedene Varianten innerhalb eines Modells einander gegenüber gestellt. Auf der anderen Seite werden Varianten beider Modelle miteinander verglichen, um die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen dem verbrauchsbasierten und dem physikalischen Ansatz herauszuarbeiten.

Zusätzlich wird untersucht wie sich eine Beschränkung der Geschwindigkeit im physikalischen Modell auf den Verlauf der nach Fahrtzeit und Energieverbrauch optimierten Routen auswirkt. Dabei wird gezeigt, dass auch das Fahrverhalten einen entscheidenden Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch hat.

Um eine Aussage machen zu können, ob sich eine Umsetzung der in dieser Arbeit beschriebenen Ansätze zur Berechnung energieeffizienter Routen in einem Produkt lohnt, werden Routen, welche standardmäßig nach Fahrtzeit und Distanz optimiert sind mit nach Fahrtzeit und Energieverbrauch optimierten Routen verglichen. Dabei werden neben den Unterschieden im Energieverbrauch auch die Kostendifferenzen der entstehenden Routen betrachtet.

Ferner enthält diese Arbeit eine gesonderte Betrachtung des innerstädtischen Verkehrs. Mithilfe des Verkehrssimulationsprogramms VISSIM werden zwei Kreuzungen modelliert und mikroskopisch simuliert. Aus den entstehenden Fahrzeugprotokollen wird der zusätzliche Zeitaufwand sowie Energiebedarf für das Überqueren der beiden Kreuzungen ermittelt. Darüber hinaus wird beschrieben wie die Resultate in einem Routenplanungsalgorithmus eingesetzt werden können und somit das komplexe Problem des innerstädtischen Verkehrs explizit berücksichtigt werden kann.

Danksagung

Für die großartige Betreuung meiner Arbeit danke ich Stefan Hug, Dr. Ralf Mikulla und Dr. Frank Schulz. Vielen Dank auch an all die anderen Kollegen der PTV AG für die Unterstützung und die Möglichkeit dieses sehr interessante Thema in einer immer sehr angenehmen Arbeitsatmosphäre bearbeiten zu können. Ein besonderer Dank geht an Martin Fix sowie Dr. Peter Vortisch und alle weiteren Kollegen aus der Traffic-Abteilung, welche mir in verkehrstechnischen Fragen Rede und Antwort standen.

Ich danke Prof. Dr. Peter Sanders für die Bereitschaft die Arbeit zu betreuen und die Unterstützung der Zusammenarbeit mit einem Unternehmen. Außerdem danke ich Robert Geisberger und Moritz Kobitzsch, den Betreuern dieser Arbeit am Institut für theoretische Informatik für die vielen hilfreichen Ideen und Diskussionen sowie für die zahlreichen Anregungen und Korrekturvorschläge. Ferner möchte ich mich bei Fabian Geisberger für die Durchführung von Testfahrten bedanken.

Insbesondere danke ich an dieser Stelle meiner Familie, speziell meinen Eltern, welche mich über den gesamten Zeitraum meines Studiums hinweg unterstützten und damit diese Arbeit erst ermöglichten. Ein herzlicher Dank geht auch an meinen Freund Fabian Oboril, der jederzeit ein offenes Ohr für mich hat und immer hinter mir steht.

Außerdem möchte ich allen anderen Personen, welche mir im Laufe meines Studiums und im Rahmen dieser Diplomarbeit mit Rat und Tat zur Seite standen jedoch an dieser Stelle noch nicht erwähnt wurden, danken.

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe und nur die angegebenen Hilfsmittel und Quellen verwendet wurden.

Karlsruhe, den 17. März 2010

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Motivation	7
1.2	Problemstellung	8
1.3	Relevante Arbeiten	8
2	Grundlagen	11
2.1	Benötigte Daten	11
2.2	Verwendete Algorithmen	14
3	Beschreibung der Modelle	18
3.1	Verbrauchsbasiertes Modell	18
3.2	Physikalisches Modell	21
3.3	Überblick über alle Modellvarianten	27
4	Evaluierung	28
4.1	Anfragedatensätze	28
4.2	Stundenlohnmodell	30
4.3	Verbrauchsbasierter Ansatz	32
4.4	Physikalischer Ansatz	43
4.5	Effekt von reduzierten Geschwindigkeiten im physikalischen Modell	48
4.6	Vergleich beider Ansätze	54
4.7	Vergleich mit herkömmlicher Optimierung	60
5	Innerstädtischer Verkehr	67
5.1	Vielschichtigkeit des Problems	67
5.2	VISSIM – Multimodale Verkehrssimulation	67
5.3	Bestimmung der Abbiegekosten	69
5.4	Abbiegekosten in der Routenplanung	77
6	Schlussbemerkungen	79
6.1	Überblick	79
6.2	Zukünftige Aufgaben	81
	Literaturverzeichnis	82
	Abbildungsverzeichnis	85
	Tabellenverzeichnis	86
A	Weitere Ergebnisse der Evaluierung	89
A.1	Verbrauchsbasierter Ansatz	89
A.2	Physikalischer Ansatz	97
A.3	Effekt von reduzierten Geschwindigkeiten im physikalischen Modell	103
A.4	Vergleich beider Ansätze	106
A.5	Vergleich mit herkömmlicher Optimierung	112

B Weitere Ergebnisse zum innerstädtischen Verkehr	118
B.1 Bestimmung der Abbiegekosten	118

1 Einleitung

Im ersten Kapitel wird aufgezeigt, warum es lohnenswert ist sich mit der Planung energieeffizienter Routen in Straßennetzwerken zu beschäftigen. Anschließend folgt eine formale Beschreibung der Problemstellung (Abschnitt 1.2). Des Weiteren wird ein Überblick über einige in diesem Gebiet relevante Arbeiten gegeben (Abschnitt 1.3).

1.1 Motivation

In Deutschland werden pro Tag rund 270 Millionen Wege mit über drei Milliarden Personenkilometern zurückgelegt [MiD02]. Bei rund 61 % dieser Wege fällt die Wahl des Verkehrsmittels auf den Pkw. Die Tendenz ist steigend. Aber nicht nur der motorisierte Individualverkehr nimmt immer mehr zu auch die Fahrleistung des Güterverkehrs stieg von 1991 bis 2007 um 50 %. Dies führt zu einem immer größer werdenden Energieverbrauch und zunehmender Umweltbelastung.

Der Anteil des Verkehrs am Endenergieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland betrug 2008 rund 28 %. Damit ist der Verkehr nach der Kategorie „übriger Bergbau und verarbeitendes Gewerbe“ (zusammen 29 %) der zweit größte Energieverbraucher [AGE09]. Der straßenverkehrsbezogene Anteil an den energiebedingten CO₂-Emissionen belief sich 2007 auf etwa 19 % [UBA09].

Diese Zahlen machen deutlich, dass es sich lohnt in diesem Bereich das Energieeinsparungspotential zu untersuchen. Wenn Energie eingespart werden könnte, würde dies nicht nur der Umwelt helfen, sondern könnte sich auch aus finanzieller Sicht lohnen. Die Kraftstoffpreise haben in den letzten Jahren stark angezogen und mit einer deutlichen Preissenkung ist nicht zu rechnen.

Rein subjektiv führen geringere Geschwindigkeiten, weniger Steigungen sowie konstantere Fahrt zu einer Energieeinsparung. Doch wie schauen energieeffiziente Routen in der Realität aus? Welchen Verlauf hat beispielsweise eine energieeffiziente Route von Nürnberg in die Nähe von Achern am Fuße des nördlichen Schwarzwalds (siehe Abbildung 1.1)?



Abbildung 1.1: Welchen Verlauf hat eine energieeffiziente Route von Nürnberg in die Nähe von Achern am nördlichen Fuß des Schwarzwalds? Führt sie durch oder am Rand des Schwarzwalds entlang?

Für Autofahrer, welche energieeffiziente Routen nutzen möchten, stellen sich einige Fragen. Muss man landschaftlich schöne Strecken wie die Schwarzwaldhochstraße vermeiden um Kraftstoff ein-

zusparen? Lohnt es sich Umgehungsstraßen zu nutzen auch wenn dadurch Umwege entstehen? Ist es aus energetischer Sicht günstiger Autobahnen im Vergleich zu Bundes- und Landstraßen zu nutzen? Hat es einen Effekt bezüglich des Kraftstoffverbrauchs, wenn man seine Reisegeschwindigkeit auf der Autobahn verringert?

Auch wenn sich diese Fragen nicht pauschal beantworten lassen, werden im Laufe dieser Arbeit Antworten darauf gesucht und zumindest teilweise auch gefunden. Dazu werden zunächst die verwendeten Daten vorgestellt sowie das Problem aus Sicht der Algorithmik betrachtet (Kapitel 2). Das Kernstück der Arbeit bilden das verbrauchsbasierte sowie das physikalische Modell, die der Energieverbrauchsberechnung dienen und in Kapitel 3 präsentiert werden. In Kapitel 4 werden die Modelle anhand von Experimenten genauer unter die Lupe genommen und evaluiert. Anschließend erfolgt eine genauere Betrachtung des innerstädtischen Verkehrs, welcher aufgrund seiner Komplexität in den beiden Modellen nicht explizit betrachtet wird (Kapitel 5). Die Arbeit endet mit einem Überblick über die Ergebnisse sowie einem kurzen Ausblick (Kapitel 6).

1.2 Problemstellung

Die Berechnung energieeffizienter Routen in Straßennetzwerken kann auf das sogenannte *Kürzeste-Wege-Problem*, einem aus der Graphentheorie stammenden Minimierungsproblem, zurückgeführt werden. Es geht dabei darum den kürzesten Weg von einem gegebenen Startpunkt zu einem bestimmten Ziel zu finden. Definition 1 beschreibt formal, was in der Graphentheorie unter einem kürzesten Weg verstanden wird.

Definition 1 (Kürzester Weg):

Gegeben sei

- ein gerichteter Graph $G = (V, E)$ mit einer endlichen Knotenmenge V sowie der Menge an Kanten $E \subseteq \{[u, v] : u, v \in V, u \neq v\}$,
- eine Gewichtsfunktion $w : E \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ sowie
- zwei Knoten $s, t \in V$ mit $s \neq t$.

Ein s - t -Weg P_{st} in G ist eine Folge von Knoten v_1, v_2, \dots, v_p mit $[v_i, v_{i+1}] \in E$ für $1 \leq i \leq p-1$, $v_1 = s$ und $v_p = t$. Das Gewicht W eines solchen Weges ist definiert als

$$W(P_{st}) = \sum_{i=1}^{p-1} w([v_i, v_{i+1}]).$$

Ist $W(P_{st})$ minimal über alle existierenden Wege zwischen s und t in G , so wird P_{st} auch als *kürzester Weg* von s nach t in G bezüglich der Gewichtsfunktion w bezeichnet.

Das gegebene Routenplanungsproblem lässt sich auf das Kürzeste-Wege-Problem wie folgt übertragen. Der zugrunde liegende Graph ist durch das Straßennetzwerk, welches später in Abschnitt 2.1.1 genauer beschrieben wird, gegeben. Die Kanten sind Straßensegmente und die Anfangs- sowie Endpunkte der Segmente stellen die Knoten dar. Das Gewicht einer Kante steht für die Kosten für das Benutzen eines Segments. Diese können abhängig vom Optimierungsziel definiert werden. Bei gängigen Routenplanungsanwendungen handelt es sich dabei meist um eine Funktion von Distanz und Zeit. Im Fall von energieeffizienten Routen geht die Energie in die Gewichtsfunktion mit ein, welche ein Fahrzeug benötigt, um das Straßensegment zu befahren.

1.3 Relevante Arbeiten

1.3.1 Routenplanung

Im Jahr 1959 veröffentlichte Edsger W. Dijkstra einen Algorithmus, der für Graphen mit statischen Kantengewichten eine Lösung der Kürzesten-Wege-Problems bestimmt [Dij59]. Dabei wird ausgehend von dem gewünschten Startpunkt ein Weg zum Ziel gesucht. Eine genauere Beschreibung

kann in Abschnitt 2.2 gefunden werden. Schneller zu Ergebnissen kommt man, wenn man eine bidirektionale Suche, d.h. zwei Suchen gleichzeitig, wobei die eine vorwärtsgerichtet vom Startpunkt aus und die andere rückwärtsgerichtet vom Ziel aus geht, durchführt. Sobald für einen Knoten die kürzeste Distanz vom Startknoten aus sowie zum Zielknoten hin bekannt ist, kann der kürzeste Weg aus den bisher gesammelten Informationen bestimmt werden [Dan63].

Auf den Algorithmus von Dijkstra basieren viele der bis heute entwickelten Beschleunigungstechniken, die eine Bearbeitung von europa- und deutschlandweiten Anfragen in kürzester Zeit ermöglichen. Einen ausführlichen Überblick zu diesem Thema bieten [DSSW09] sowie [Sch08]. Die dort vorgestellten Techniken können in drei Kategorien unterteilt werden. Es handelt sich hierbei um zielgerichtete bzw. hierarchische Ansätze sowie Kombinationen aus beiden Varianten. Im Folgenden wird ausschließlich auf die hierarchischen Ansätze eingegangen. Für weitere Informationen sei auf [DSSW09] und [Sch08] verwiesen.

Das Grundprinzip der hierarchischen Ansätze ist es eine Knotenordnung, welche aus der Struktur des Graphen folgt, bestmöglich auszunutzen. Im Folgenden werden die zwei aktuellsten Techniken beschrieben.

- **Contraction Hierarchies:** Bei diesem in [GSSD08] eingeführten Ansatz handelt es sich um einen Spezialfall von Highway Node Routing, dabei kommt zu jeder Knotenmenge V_l im Vergleich zu V_{l+1} genau ein Knoten hinzu. Für die Reihenfolge der Knoten wird geschätzt wie wichtig es ist den Knoten als nächstes zu kontrahieren. Die Berechnung einer Anfrage erfolgt auf zwei kantendisjunkten Graphen $G_\uparrow := (V, E_\uparrow)$ und $G_\downarrow := (V, E_\downarrow)$ mit $E_\uparrow := \{(u, v) \in E \mid u \text{ wird vor } v \text{ kontrahiert}\}$ und $E_\downarrow := \{(u, v) \in E \mid u \text{ wird nach } v \text{ kontrahiert}\}$. Eine Route wird anschließend mittels einer Vorwärtssuche G_\uparrow sowie einer Rückwärtssuche G_\downarrow bestimmt. Die beiden Suchräume treffen sich genau dann in einem Knoten v mit der höchsten Ordnung aller Knoten das Pfads, wenn so ein Pfad von Start- zu Zielknoten existiert. Weitere Informationen zu diesem Ansatz werden in Abschnitt 2.2 gegeben.
- **Transit-Node Routing:** Bei Transit-Node Routing handelt es sich um die aktuell schnellste Beschleunigungstechnik [BFSS07]. Der Algorithmus wählt eine Menge von wichtigen (Transit-) Knoten und berechnet für diese eine Distanztabelle. Darüber hinaus wird eine Distanztabelle aller relevanten Verbindungen zwischen den verbleibenden sowie den Transit-Knoten bestimmt. Untersuchungen ergaben, dass pro Knoten durchschnittlich zehn solcher Verbindungen ausreichend sind. Eine Route kann nach erfolgreicher Vorberechnung mittels Tabellen-Lookups bestimmt werden. Um auch lokalen Anfragen gerecht zu werden, können mehrere Level von Transit-Knoten genutzt werden. Mit dieser Technik sind Anfragezeiten von wenigen Mikrosekunden möglich, jedoch ist die Vorberechnungszeit erheblich.

Für die bisher beschriebenen Techniken ist die Kenntnis der Kantengewichte für die Vorberechnung unerlässlich. Das heißt, sie lassen sich nur auf Graphen mit statischen Kantengewichten anwenden. In der Praxis sind die Kantengewichte aber meist von mehreren Größen wie beispielsweise Fahrtzeit und Distanz sowie der Gewichtung der einzelnen Komponenten abhängig. In [Kob10] werden Contraction Hierarchies in der Art erweitert, so dass diese auch mit multikriteriellen Zielfunktionen umgehen können. Folglich kann die Priorisierung der einzelnen Größen der Zielfunktion erst nach der Vorberechnung festgelegt werden.

1.3.2 Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr

Es gibt diverse Möglichkeiten den Kraftstoffverbrauch und damit auch den Schadstoffausstoß im Straßenverkehr zu reduzieren. In [VDM01] sind einerseits Maßnahmen genannt, welche nur langfristig umgesetzt werden können als auch solche, die kurzfristig Erfolg versprechen. Auf lange Sicht bieten in der Automobilindustrie sowohl die Motoreffizienz als auch der Luft- und Rollwiderstand der Fahrzeuge einen Ansatzpunkt. Neue Gesetze und Richtlinien können dazu beitragen, dass in die Forschung in diesen Bereichen investiert wird. Zeitnah kann eine Verbesserung des Verkehrsflusses durch infrastrukturelle Maßnahmen sowie eine Anpassung des individuellen Fahrverhaltens zu geringerem Kraftstoffverbrauch und Emissionen führen.

Von den vier genannten Faktoren bieten neue Fahrzeugtechnologien laut [VDM01] mit etwa 49 % das größte Einsparungspotential. Im Vergleich dazu scheinen die 5 %, welche durch Verkehrsmanagement sowie Richtlinien eingespart werden können eher nebensächlich. Es muss jedoch auch beachtet werden, dass die Entwicklung und Einführung neuer Technologien relativ lange dauern kann. Durchschnittlich kann jeder Fahrer durch eine Änderung seines individuellen Fahrverhaltens geschätzte 15 % Kraftstoff einsparen.

Eine Fallstudie mit einer Testflotte von neun Personenkraftwagen in Antwerpen und Brüssel zeigt den Einfluss des Fahrverhaltens, der Straßenkategorie sowie der Verkehrssituation auf Emissionen und Kraftstoffverbrauch [VKK00]. Die Messungen an den Fahrzeugen ergaben, dass aggressives Fahrverhalten zu einem um 40 % höheren Verbrauch führen kann. Des Weiteren wurde ermittelt, dass auf Umgehungsstraßen nur halb so viel Energie verbraucht wird wie innerstädtisch. Eine höhere Verkehrsbelastung wirkt sich nach der Studie bei innerstädtischen Strecken in einem um 20–45 % höheren Kraftstoffverbrauch aus. Auf Umgehungsstraßen beträgt die Steigerung zwischen 10 und 200 %.

Nach [BE05] hängt das Fahrverhalten, also Geschwindigkeit, Beschleunigung sowie die Gangwahl von diversen Komponenten ab. Den größten Einfluss haben Straßencharakteristika wie die Anzahl von Kreuzungen, Geschwindigkeitsbeschränkungen und die Lage der Straße. Daneben spielt auch die Leistung des Fahrzeuges sowie Geschlecht und Alter des Fahrers eine entscheidende Rolle.

Der Einfluss der gefahrenen Geschwindigkeit auf den Energieverbrauch sowie den Schadstoffausstoß ist Thema einer Arbeit, die an der Universität von Kalifornien entstand. In [SBB06] wird untersucht wie sich angepasste Geschwindigkeiten auswirken. Dazu wurden unter anderem zwei gleichzeitig zur nachmittäglichen Stoßzeit stattfindende Fahrten auf einem 22 km langen Teilstück der kalifornischen Autobahn SR-91 miteinander verglichen. Dabei wurde einem der beiden Fahrer in Echtzeit eine optimale Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der aktuellen Verkehrssituation empfohlen und dem anderen nicht. Eine nachträgliche Bewertung der beiden Fahrten ergab, dass sich die Durchschnittsgeschwindigkeiten kaum unterscheiden, die empfohlenen Geschwindigkeiten jedoch zu einem 13 % niedrigeren Kraftstoffverbrauch bei einer um 6 % längeren Fahrtzeit führen.

Neben der gefahrenen Geschwindigkeit, der Straßenkategorie und der Verkehrssituation hat auch die Längsneigung der Straße einen erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch. In [PR06] wird mithilfe eines mikroskopischen Verkehrssimulationsprogramms ermittelt, dass eine um 1 % größere Steigung zu 9 % mehr Kraftstoffverbrauch sowie Emissionen führen kann.

1.3.3 Planung energieeffizienter Routen

Ende des Jahres 2006 wurde mit [ELB06] eine Arbeit veröffentlicht, in welcher das Potential von Navigationssystemen bezüglich Kraftstoffeinsparung untersucht wurde. Hierfür wurden Routen bestimmt, welche den niedrigsten Kraftstoffverbrauch aufweisen und mit den in der Realität gefahrenen Strecken verglichen. Grundlage hierfür bildeten Messungen in der schwedischen Stadt Lund aus welchen Verbrauchswerte für 22 Straßenklassen abhängig von zwei verschiedenen Verkehrssituationen abgeleitet wurden. Anschließend wurden etwa 100 Routen in Lund betrachtet, wobei Echtzeitinformationen bezüglich Staus berücksichtigt wurden. Dabei wurde festgestellt, dass in fast der Hälfte der Fälle der Fahrer intuitiv nicht die verbrauchsoptimale Route wählte. Durchschnittlich ergab sich ein Einsparungspotential von 4 % bezüglich des Kraftstoffverbrauchs.

Eine Forschungsgruppe der Universität von Kalifornien verfolgte 2007 einen ähnlichen Ansatz, dessen Ergebnisse in [BBV07] präsentiert werden. Jeder Kante des Testgraphen werden der Kraftstoffverbrauch und Emissionswerte nach dem Comprehensive Modal Emissions Model (CMEM) zugewiesen. Dieses Modell wurde im Rahmen eines amerikanischen Forschungsprojekts entwickelt und ist für dortige Gegebenheiten kalibriert [BAY⁺99]. Die Untersuchungen zeigen, dass das Durchfahren von Staus bzw. stark stockendem Verkehr zu einem höheren Verbrauch führen als die Wahl einer etwas längeren Alternativroute.

Beide Ergebnisse unterstreichen das Energieeinsparungspotential in der Routenplanung. Jedoch handelt es sich hierbei lediglich um Fallstudien in der schwedischen Studentenstadt Lund bzw. in Südkalifornien und nicht um einen Ansatz, welcher ohne weiteres auf große Straßennetze wie die Bundesrepublik Deutschland oder Europa angewendet werden kann.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die in dieser Arbeit genutzten geographischen Daten präsentiert (Abschnitt 2.1). Diese lassen sich in zwei Bereiche untergliedern. Die Paragraphen 2.1.1 und 2.1.2 befassen sich mit dem zugrunde liegenden Straßennetzwerk mitsamt der verwendeten Eigenschaften der Straßen selbst wie beispielsweise die rechnerische Geschwindigkeit. In Paragraph 2.1.3 werden die zum Einsatz kommenden Höhendaten vorgestellt.

In Abschnitt 2.2 wird auf die verwendeten Algorithmen eingegangen. Paragraph 2.2.1 beschäftigt sich mit einem der bekanntesten Algorithmen für das Kürzeste-Wege-Problem für positive Kantengewichte von Dijkstra. Im darauf folgenden Paragraphen 2.2.2 wird beschrieben, wie trotz negativer Kantengewichte der Algorithmus von Dijkstra angewendet werden kann. Paragraph 2.2.3 gibt einen kurzen Einblick in Contraction Hierarchies, der in dieser Arbeit verwendeten Beschleunigungstechnik, die zu kürzeren Laufzeiten führt.

2.1 Benötigte Daten

Die für diese Arbeit verwendeten Geodaten stammen überwiegend aus der Karte „PTV Europe City Map Premium 3a-2008t - NQ“. Grundlage dieser Karte sind Daten des Unternehmens NAVTEQ, welche von der PTV aufbereitet wurden. Des Weiteren kommen Höheninformationen, welche auf Ergebnissen der *Shuttle Radar Topograph Mission* (SRTM) basieren, zum Einsatz.

2.1.1 Straßennetzwerk

Ein Straßennetzwerk besteht generell aus Straßensegmenten und wichtigen Punkten. Letztere treten auf, wenn mehrere Straßen aufeinander treffen oder sich schneiden sowie wenn sich Eigenschaften einer fortlaufenden Straße ändern. Straßensegmente sind Verbindungen von jeweils zwei solcher Punkte.

In den Kartendaten ist für jedes Segment eine große Menge an Informationen hinterlegt. So kann neben Anfangs- und Endpunkt auch direkt auf den Typ des Segments (z.B. Teil einer Autobahn oder eines Feldweges) oder dessen Länge zugegriffen werden. Des Weiteren ist mithilfe der Attribute *Network Class* und *Speed Class*, wie im folgenden Abschnitt 2.1.2 erläutert, die rechnerische Geschwindigkeit spezifiziert.

Ferner sind Angaben über Sperrungen (Anlieger frei, für Schwerlastverkehr gesperrt, ...) oder die Lage des Segments (inner- oder außerorts) verfügbar. Weitere Attribute lassen Aussagen über Mautkosten, Zugehörigkeit zu einer Umweltzone oder über die baulichen Gegebenheiten (Tunnel, Brücke, Unterführung, ...) zu.

Vorhandene Fähren werden in dieser Arbeit nicht beachtet, da sie zum einen nicht Bestandteil eines Straßennetzwerkes sind und somit Extremfälle in der später folgenden Evaluierung (Kapitel 4) vermieden werden.

2.1.2 Geschwindigkeiten im Straßennetzwerk

Die für einen Streckenabschnitt vorgesehene rechnerische Geschwindigkeit ist abhängig von den Attributen *Network Class* (NC) und *Speed Class* (SC), welche in den Kartendaten der PTV für jedes Segment definiert sind. Dabei bildet die *Network Class* die Hierarchie des Straßennetzes ab und unterscheidet die Segmente nach ihrer Wichtigkeit. Die *Speed Class* dient der Differenzierung der Geschwindigkeit innerhalb einer *Network Class*. Durch jeweils acht *Network* sowie *Speed Classes* können insgesamt 64 Geschwindigkeiten festgelegt werden.

a) Network Class

Basis der Definition der Network Class ist das Attribut *Functional Road Class*, welches von NAVTEQ bereit gestellt wird und die Bedeutung der Straße beschreibt. Die Einteilung sieht dabei insgesamt fünf Kategorien vor.

Diese Klassen sind jedoch so definiert, dass keine klare Trennung zwischen Autobahnen und sonstigen wichtigen Verbindungsstrecken vorliegt. Diese ist aber notwendig um Funktionen wie beispielsweise „Autobahn vermeiden“ in einem Routing-Algorithmus umsetzen zu können. Darüber hinaus umfasst die Menge der am wenigsten bedeutenden Segmente mit allen Wohnstraßen, Feld- und Waldwegen sowie Rad- und Fußwegen ein breites Spektrum an unterschiedlichen Straßenkategorien. Es gibt also keine explizite Klasse für Streckenabschnitte, welche zwar nicht von Kraftfahrzeugen jedoch von Fußgängern und Radfahrern genutzt werden dürfen.

Die Network Class erlaubt eine Einteilung der Segmente in insgesamt acht statt der von NAVTEQ gegebenen fünf Kategorien. Dabei wird eine zusätzliche Klasse eingeführt, welche die Differenzierung zwischen Autobahnen und anderen Kraftfahrstraßen ermöglicht. Außerdem wird die Klasse der am wenigsten wichtigen Straßen in drei Teilklassen unterteilt. Tabelle 2.1 enthält die Bedeutung der Network Class, wie sie in den Kartendaten der PTV zum Einsatz kommt.

NC	Beschreibung
0	Autobahnen
1	Kraftfahrstraßen, Autobahnähnliche Straßen
2	Bundesstraßen, BAB- sowie B-Verbindungen
3	Verbindungsstraßen, wichtige Landstraßen
4	Stadtteilstraßen, Erschließungsstraßen
5	Wohnstraßen, Feldwege
6	befahrbare, aber normal gesperrte Straßen
7	Fuß- und Radwege

Tabelle 2.1: Bedeutung der Network Class (NC) in den Kartendaten der PTV

Mithilfe der so definierten Network Class sind im Vergleich zur Functional Road Class von NAVTEQ sowohl Funktionen der Art „Autobahn vermeiden“ als auch explizites Fahrrad- sowie Fußgänger-Routing durch einfaches Ausblenden kompletter Network Classes möglich. Für diese Arbeit ist dieser Vorteil jedoch nicht relevant.

b) Speed Class

Mithilfe der acht Speed Classes pro Network Class kann die Geschwindigkeit für Segmente innerhalb einer NC differenziert werden. Dies ist beispielsweise aufgrund der länderabhängigen Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen unerlässlich. Bei der Wahl der richtigen Speed Class für ein Segment spielen neben Tempolimits auch Kriterien wie beispielsweise die Lage des Segments (inner-/außerorts) eine entscheidende Rolle. Auf Anwendungsseite wird meist pro Network Class die minimale sowie die maximale Geschwindigkeit definiert. Die Aufteilung auf die Speed Classes erfolgt mittels Interpolation. Tabelle 2.2 enthält die in dieser Arbeit verwendeten Werte der maximalen bzw. minimalen Geschwindigkeit v_{\max} und v_{\min} für jede Network Class.

NC	v_{\max} [km/h]	v_{\min} [km/h]
0	135	65
1	125	35
2	85	25
3	60	25
4	50	20
5	40	18
6	16	9
7	6	4

Tabelle 2.2: Geschwindigkeitsspektrum pro Network Class – minimale v_{\min} sowie maximale Geschwindigkeit v_{\max} für jede NC

2.1.3 Höheninformationen

Für jeden Punkt des Straßennetzwerkes, d.h. für insbesondere für jeden Knoten des Graphen, ist die Höhe über dem Meeresspiegel bekannt. Mithilfe dieser Information ist es möglich die Steigung bzw. das Gefälle eines Segments zu bestimmen.

Die Daten hierfür basieren auf den Fernerkundungsdaten der *Shuttle Radar Topograph Mission* (SRTM), welche im Februar 2000 stattfand [FRC⁺07]. Innerhalb von elf Tagen wurde über 80 % der Landflächen der Erde vom Weltraum aus vermessen. Die Abdeckung beläuft sich hierbei auf den Bereich zwischen dem 60. nördlichen und dem 56. südlichen Breitengrad. Die Daten wurden in einer Auflösung von einer Bogensekunde ($\hat{=}$ 30 m am Äquator) und einer Höhengenaugigkeit von etwa 6 m erfasst.

Die frei verfügbare Version beinhaltet die Höhenwerte in einem 3"-Raster (bzw. 1"-Raster für Nordamerika). Dies entspricht am Äquator etwa einer Auflösung von 90 m (bzw. 30 m). In dieser Arbeit wird eine Aufbereitung der DDS Digital Data Services GmbH, einer Tochtergesellschaft der PTV AG, verwendet, welche die Zuordnung der Höhenangaben zu Koordinaten enthält.

Die Höhe einer beliebigen Koordinate wird mithilfe einer Interpolation ermittelt. Dabei werden zunächst die drei nächsten Nachbarn zu dem Punkt bestimmt und durch diese eine Ebene gelegt. Anschließend wird der Schnittpunkt der Ebene und der Senkrechten durch den Punkt, den die Koordinate spezifiziert, berechnet und somit die gesuchte Höhe ermittelt. Abbildung 2.1 veranschaulicht das Vorgehen.

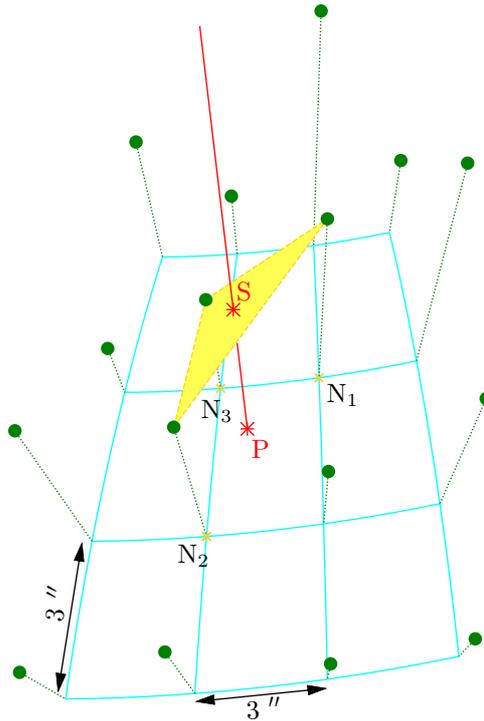


Abbildung 2.1: Bestimmung der Höhe für einen beliebigen Punkt P mithilfe einer Ebene durch die drei nächsten Nachbarn N_1 , N_2 sowie N_3 und dem Schnittpunkt S dieser Ebene mit der Senkrechten durch P . Das Gitter mit bekannten Höhen hat eine Auflösung von 3 Bogensekunden, was am Äquator etwa 90 m entspricht.

Bei der Bestimmung der Steigung für ein Segment muss noch auf die baulichen Gegebenheiten geachtet werden, da es sonst bei Brücken oder Tunneln, die aus mehreren Segmenten bestehen, zu großen Abweichungen kommen kann. Handelt es sich bei einem Segment um einen Teil eines solchen Bauwerks, so wird die Steigung mittels Interpolation zwischen den Höhenwerten des Anfangs- sowie des Endpunkts bestimmt. In den Kartendaten ist für betroffene Segmente das *Brunnel*-Flag gesetzt, welches kennzeichnet, dass es sich um eine Brücke oder einen Tunnel handelt.

Des Weiteren werden nur Werte zwischen -15 und $+15$ % Längsneigung berücksichtigt. Damit wird versucht den Einfluss der enthaltenen Fehler so gering wie möglich zu halten. So gibt es beispielsweise Segmente, bei denen fälschlicherweise das *Brunnel*-Flag nicht gesetzt ist. Auch kann die Lage eines Segments an einem Hang zu falschen Ergebnissen führen.

2.2 Verwendete Algorithmen

2.2.1 Algorithmus von Dijkstra

Einer der bekanntesten Algorithmen zur Lösung des Kürzesten-Wege-Problems ist der Algorithmus von Dijkstra [Dij59]. Die Grundidee des Greedy-Algorithmus ist, ab einem Startknoten immer die kürzest möglichen Wege weiter zu verfolgen. Das genaue Vorgehen ist als Pseudo-Code in Algorithmus 1 beschrieben.

Algorithmus 1 : Algorithmus von Dijkstra

```

Eingabe : Graph  $G = (V, E)$ , Gewichtsfunktion  $w : E \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ , Knoten  $s$  und  $t$ 
Ergebnis : Kürzester Weg von  $s$  nach  $t$ 
// Initialisierung
1 Für alle  $u \in V$  tue
2   |  $\text{dist}(u) \leftarrow \infty$ 
3   |  $\text{vor}(u) \leftarrow \perp$ 
// Eigentlicher Algorithmus
4 Generiere Prioritätswarteschlange  $Q$ 
5 Füge  $s$  in  $Q$  ein
6  $\text{dist}(s) \leftarrow 0$ 
7 Solange  $Q$  nicht leer ist und  $t$  noch nicht aus  $Q$  genommen wurde tue
8   | Nehme Knoten  $u$  mit der geringsten vorläufigen Distanz  $\text{dist}(u)$  aus  $Q$ 
9   | Für alle Nachbarn  $v$  von  $u$  tue
10  |   |  $\text{neueDist} \leftarrow \text{dist}(u) + w([u, v])$ 
11  |   | Wenn  $\text{neueDist} < \text{dist}(v)$  dann
12  |   |   | Wenn  $\text{dist}(v) = \infty$  dann
13  |   |   |   | Füge  $v$  in  $Q$  mit  $\text{neueDist}$  als Priorität ein
14  |   |   |   | sonst
15  |   |   |   |   | Setze Priorität von  $v$  in  $Q$  auf  $\text{neueDist}$ 
16  |   |   |   |  $\text{dist}(v) \leftarrow \text{neueDist}$ 
17  |   |   |   |  $\text{vor}(v) \leftarrow u$ 
// Pfad bestimmen
18 Generiere leere Liste  $P$ 
19  $u \leftarrow t$ 
20 Solange  $u \neq \perp$  tue
21   | Füge  $u$  am Anfang von  $P$  ein
22   |  $u \leftarrow \text{vor}(u)$ 
Ausgabe :  $P$ 

```

In der ursprünglichen Version kommt keine Prioritätswarteschlange sondern eine normale Liste zum Einsatz. Die Laufzeit beträgt hierbei $\mathcal{O}(n^2 + m)$, wobei n die Anzahl der Knoten und m die der Kanten bezeichnet. Wenn statt einer einfachen Liste beispielsweise ein Fibonacci-Heap [FT87] verwendet wird, reduziert sich die Laufzeit auf $\mathcal{O}(n \log n + m)$.

2.2.2 Negative Kantengewichte

Ein Manko des Algorithmus von Dijkstra ist die Tatsache, dass die Kantengewichte nicht negativ sein dürfen. Im Folgenden tritt jedoch dieser Fall auf (Abschnitt 3.2). Eine Möglichkeit damit umzugehen ist die Verwendung einer Knotenpotentialfunktion Π wie sie in Definition 2 beschrieben ist, welche zu einer angepassten Gewichtsfunktion \bar{w} führt.

Definition 2 ((Knoten-)Potentialfunktion):

Eine (Knoten-)Potentialfunktion Π weist jedem Knoten v einen Wert, d.h. sein Potential, zu. Für eine Kante $e = [u, v]$ bezeichne \bar{w} die angepasste Gewichtsfunktion und ist wie folgt definiert:

$$\bar{w}(e) = \Pi(u) + w(e) - \Pi(v).$$

Um den Algorithmus von Dijkstra auch für Graphen $G = (V, E)$ mit negativen Kantengewichten $w : E \rightarrow \mathbb{R}$ verwenden zu können wird also eine Funktion $\Pi : V \rightarrow \mathbb{R}$ benötigt, welche die

Bedingung in Gleichung 2.1 erfüllt.

$$\forall e \in E \text{ mit } e = [u, v]: \bar{w}(e) = \Pi(u) + w(e) - \Pi(v) \geq 0 \quad (2.1)$$

Solch eine Funktion existiert genau dann, wenn G keinen Kreis mit negativem Gewicht hat [KV08]. Sie kann durch Hinzufügen eines Knotens s' zu G sowie Kanten $[s', v]$ zu allen Knoten $v \in V$ mit $w([s', v])=0$ bestimmt werden. Das Potential $\Pi(v)$ eines Knotens v ist bestimmt durch die Länge des kürzesten Weges von s' zu v . Dieser Weg kann beispielsweise mithilfe des Moore-Bellman-Ford-Algorithmus, welcher mit negativen Kantengewichten umgehen kann, bestimmt werden [Bel58, For56, Moo59].

Kürzeste Wege nach der angepassten Gewichtsfunktion sind auch unter der ursprünglichen Gewichtsfunktion kürzeste Wege. Die Verwendung einer Potentialfunktion verändert diese Eigenschaft also nicht. Ein Beweis hierzu ist in [MS08] zu finden.

2.2.3 Contraction Hierarchies – eine Beschleunigungstechnik

Da die im Bereich der Routenplanung zugrunde liegenden Graphen im Allgemeinen eine sehr große Anzahl an Knoten sowie Kanten aufweisen, wurden in den letzten Jahren diverse Beschleunigungstechniken entwickelt um die Zeit der Anfragebearbeitung zu reduzieren. Dabei wird grundsätzlich versucht die Anzahl betrachteter Knoten so gering wie möglich zu halten. Meist ist hierfür eine etwas aufwendigere Vorberechnung notwendig.

Auch in dieser Arbeit wird eine solche Beschleunigungstechnik eingesetzt. Für die Evaluierung der Modelle (Kapitel 4) wird in den Experimenten eine sehr große Anzahl an Routen bestimmt. Mit Contraction Hierarchies wird auf eine hierarchische Beschleunigungstechnik zurückgegriffen, welche erstmals in [Gei08] präsentiert wurde. Sie ermöglicht trotz Vorberechnungsschritt eine deutliche Zeitersparnis bei der Durchführung der Experimente. Im Folgenden werden die drei wichtigsten Aspekte des Ansatzes betrachtet.

- **Kontraktion:** Contraction Hierarchies bauen allein auf dem Konzept der Knotenkontraktion auf. In jedem Kontraktionsschritt wird genau ein Knoten u kontrahiert, d.h. aus dem Graph entfernt sowie Abkürzungskanten eingefügt, welche dazu dienen die Längen der kürzesten Wege zu erhalten. Für jeden Pfad $\langle v, u, w \rangle$ wird genau dann eine Abkürzungskante $[v, w]$ mit Gewicht $w([v, w]) = w([v, u]) + w([u, w])$ eingefügt, falls dieser Pfad der einzige kürzeste Weg zwischen v und w ist.
- **Knotenordnung:** Die Knotenordnung bestimmt in welcher Reihenfolge die Knoten kontrahiert werden. Sie wird mithilfe einer einfachen und erweiterbaren Heuristik erstellt, deren Kern eine Prioritätswarteschlange bildet.

Die Prioritätsfunktion ordnet jedem Knoten eine Linearkombination verschiedener Terme zu. Dabei stellt die Differenz zwischen der Anzahl inzidenter Kanten des Knotens u und der Anzahl benötigter Abkürzungskanten für die Kontraktion von u , die sogenannte Kantendifferenz, einen der wichtigsten Terme dar. Durch diesen Term soll verhindert werden, dass der Graph durch das Kontrahieren zu dicht wird, was die Suche verlangsamen würde. Ferner spielt die Zahl benachbarter Knoten, welche schon kontrahiert wurden, eine Rolle. Mithilfe dieses Terms wird versucht die Kontraktion räumlich möglichst gleichmäßig verteilt durchzuführen und eine Konzentration auf bestimmte Teile des Graphen zu vermeiden, um eine möglichst hohe Beschleunigung zu erreichen. Darüber hinaus gibt es weitere Terme, welche beispielsweise zu Kontraktions- oder Suchkosten in Relation stehen. Je nach Anwendung können unterschiedliche Prioritätsterme kombiniert werden. Damit wird eine Tuningmöglichkeit zur Verfügung gestellt, welche dazu dient Hierarchien zu erhalten, welche möglichst gut auf das jeweilige Problem und dessen Lösung abgestimmt sind.

Die Knotenordnung wird durch wiederholte Anwendung von drei Schritten erstellt. Zunächst wird der unwichtigste Knoten aus der Prioritätswarteschlange entfernt. Dieser wird anschließend kontrahiert. Danach müssen die Prioritätswerte der verbleibenden Knoten aktualisiert

werden, da sich Terme wie beispielsweise die Kantendifferenz durch die Kontraktion ändern können.

- **Anfragebearbeitung:** Für die Suche von kürzesten Wegen wird ein modifizierter, bidirektionaler Dijkstra-Algorithmus verwendet, welcher die Knotenordnung ausnutzt. Die Anzahl betrachteter Knoten, d.h. die Größe des Suchraums, wird verringert, indem während der Vorwärtssuche ausschließlich Kanten relaxiert werden, die zu wichtigeren Knoten führen. Analog dazu werden bei der Rückwärtssuche nur Kanten betrachtet, die von wichtigeren Knoten kommen. Falls ein kürzester Weg für die Anfrage existiert, treffen sich die bei dem wichtigsten Knoten des gesuchten Pfades.

Die Suchzeit wird durch die Verwendung von Contraction Hierarchies im Vergleich zu den zuvor besten hierarchischen, Dijkstra-basierten Verfahren nochmals um einen Faktor fünf verkleinert. Genaue Informationen hierzu sind in [GSSD08] zu finden.

3 Beschreibung der Modelle

Im weiteren Verlauf werden zwei Ansätze vorgestellt, nach denen der Energieverbrauch für das Befahren eines Segments berechnet werden kann. Abschnitt 3.1 beschreibt das erste Modell, welches auf Kraftstoffverbrauchswerten basiert. Die Grundlage des zweiten Ansatzes sind physikalische Zusammenhänge (Abschnitt 3.2). Abschnitt 3.3 gibt einen Überblick über die diversen Varianten.

3.1 Verbrauchsbasiertes Modell

Dieser Abschnitt dient der Vorstellung des ersten von zwei Modellen. Die Basis des Modells bilden Kraftstoffverbrauchswerte, welche aus dem *Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs* in der Version 2.1 [HBEFA] stammen.

3.1.1 Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA)

Beim Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) der INFRAS AG handelt es sich um eine Datenbank, welche Emissionsfaktoren in Abhängigkeit von diversen Parametern bezüglich des Fahrzeugs und der Verkehrssituation bereitstellt. Das Handbuch wurde von den für Umwelt zuständigen Ministerien Deutschlands, Österreichs und der Schweiz in Auftrag gegeben. In dieser Arbeit kommt Version 2.1 zum Einsatz, welche im ersten Quartal 2004 herausgegeben wurde. Im Januar 2010 wurde die aktuelle Version 3.1 des Handbuchs veröffentlicht.

Die wichtigste Grundlage des Handbuchs bilden diverse im Auftrag der Umweltämter durchgeführte Messprogramme. Dabei wurden neben den Emissionswerten auch das Fahrverhalten der unterschiedlichen Fahrer und Fahrzeuge ermittelt. Die resultierenden Daten wurden anschließend aufbereitet und können nun unter anderem abhängig von Emissionsart, Fahrzeugkategorie sowie -größe, Verkehrssituation und Längsneigung abgefragt werden.

Bei der Emissionsart wird zwischen Emissionen im betriebswarmen Zustand, Kaltstartüber- und Verdampfungsemissionen unterschieden. Bei der Fahrzeugkategorie stehen sowohl Personenkraftwagen als auch Nutzfahrzeuge oder Zweiräder in diversen Varianten zur Verfügung. Die vorgegebenen Verkehrssituationen spiegeln sowohl unterschiedliche Straßenkategorien, als auch unterschiedliche Verkehrsbelastungen und Fahrverhalten wieder. Als Beispiele seien an dieser Stelle „Autobahn ohne Tempolimit“ und „Durchschnitt innerorts“ genannt. Des Weiteren wird nach sieben möglichen Werten zwischen -6 und $+6$ % für die Längsneigung differenziert.

Die Emissionsfaktoren des Handbuchs decken ein breites Spektrum an Schadstoffen ab. So wird beispielsweise angegeben wie viel Gramm Kohlenstoffdioxid bei der Fahrt von einem Kilometer ausgestoßen werden. Ferner existieren Angaben zu Kohlenstoffmonoxid, Stickoxiden, Blei sowie Schwefeldioxid und anderen Abfallprodukten eines Verbrennungsmotors. In dieser Arbeit wird ausschließlich der Emissionsfaktor für den Kraftstoffverbrauch verwendet.

Für weitere Informationen zum Handbuch sowie zur zugrunde liegenden Methodologie wird an dieser Stelle auf [HK04] verwiesen.

a) Kraftstoffverbrauch

Tabelle 3.1 enthält die aus der Datenbank exportierten Werte, welche im weiteren Verlauf relevant sind. Dabei wird ein Pkw mit Dieselmotor der Abgasnorm EURO 4 und einem Hubraum von 1,4 bis 2,0 Litern in warmem Betriebszustand angenommen. Für jede Straßenkategorie wird die Kraftstoffmenge ausgelesen, wobei der von INFRAS definierte Durchschnitt über die jeweiligen

Verkehrssituationen genommen wird. Darüber hinaus stellt HBEFA noch einen Wert unabhängig von der Straßenkategorie zur Verfügung, bei welchem es sich um einen gewichteten Durchschnittswert über alle Straßenkategorien handelt. Die Längsneigung wird auf 0 % gesetzt.

Straßenkategorie	Verkehrssituation	Kraftstoffmenge [g/km]	Kraftstoffverbrauch [l/100km]
Autobahn (AB)	\emptyset (AB)	57,75	6,96
Außerorts (ao)	\emptyset (ao)	43,40	5,23
Innerorts (io)	\emptyset (io)	55,50	6,69
Durchschnitt (alle)	\emptyset (alle)	51,32	6,18

Tabelle 3.1: Kraftstoffverbrauchswerte aus HBEFA 2.1 für einen Diesel-Pkw mit 1,4 bis 2,0 Litern Hubraum für die gegebenen Straßenkategorien als Durchschnitt über die jeweils möglichen Verkehrssituationen.

Der Emissionsfaktor für die Kraftstoffmenge wird in g/km angegeben. Da diese Einheit eher technischer Natur und daher im Alltag nicht gebräuchlich ist, enthält Tabelle 3.1 die Werte auch in der Einheit l pro 100 km. Die Umrechnung erfolgt über die Dichte ρ_{Diesel} von Diesel, welche etwa 0,83 kg/l beträgt.

Um die aus HBEFA resultierenden Kraftstoffmengen in Energieverbrauch umzurechnen wird der in Gleichung 3.1 dargestellte Zusammenhang verwendet. Dabei bezeichnet E_m den Energieverbrauch pro Meter [J/m], B die Kraftstoffmenge pro Kilometer [g/km] und H_{Diesel} den Heizwert von Diesel, welcher sich auf etwa 43 MJ/kg beläuft.

$$E_m = B \cdot H_{\text{Diesel}} \quad (3.1)$$

b) Längsneigungskorrekturfaktoren

Die Werte in Tabelle 3.1, welche aus HBEFA stammen, sind für Fahrten in der Ebene geeignet. Um auch Steigungen und Gefälle von Segmenten bei der Berechnung des Energieverbrauchs berücksichtigen zu können, werden noch Korrekturfaktoren abhängig von der Längsneigung sowie der Straßenkategorie benötigt. Abbildung 3.1 zeigt die im Folgenden verwendeten Faktoren. Die Werte basieren auf einer Grafik aus dem Benutzerhandbuch von HBEFA [KH04].

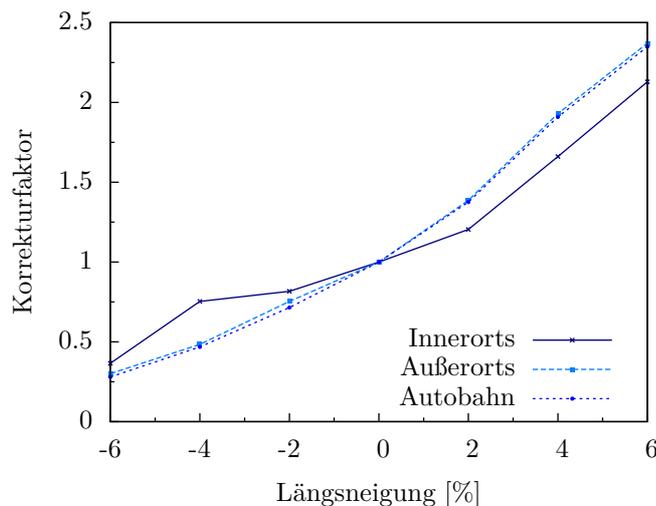


Abbildung 3.1: Einfluss der Längsneigung auf den Energieverbrauch eines Diesel-Pkws abhängig von der Straßenkategorie.

Nach diesem Diagramm bedeutet eine Steigung von 2 % für einen Diesel-Pkw innerorts einen zusätzlichen Energieverbrauch von etwa 20 %. Bei einem Gefälle von 2 % wird im Vergleich zur Ebene nur knapp 82 % Energie verbraucht.

3.1.2 Berechnung

Mithilfe der in Paragraph 3.1.1 gesammelten Daten lässt sich die für das Befahren eines Segment notwendige Energie nach Gleichung 3.2 bestimmen. Diese setzt sich aus dem Energieverbrauch pro Meter E_m nach Gleichung 3.1, dem Längsneigungskorrekturfaktor $K_{\text{Längsneigung}}$ sowie der Länge des Segments L zusammen.

$$E = E_m \cdot K_{\text{Längsneigung}} \cdot L \quad (3.2)$$

Um die Berechnung des Energieverbrauchs nach Gleichung 3.2 umsetzen zu können, müssen die Straßenkategorien, welche aus HBEFA stammen, den Segmenten aus der Karte zugeordnet werden. Dies erfolgt mittels einer Abbildung der Network Class aus den Kartendaten auf die Straßenkategorien nach HBEFA. Die Bedeutung der Network Class ist in Abschnitt 2.1.2 beschrieben.

Die Verbrauchswerte E_m und die Längsneigungskorrekturfaktoren $K_{\text{Längsneigung}}$ sind wie im vorherigen Abschnitt beschrieben definiert. Tabelle 3.2 gibt einen Überblick über die in das Modell eingehenden Werte und zeigt zusätzlich die Zuordnung von Network Class zu Straßenkategorie. Dabei bleiben die Network Classes 6 und 7 außen vor, da sie für Kraftfahrzeuge gesperrt sind.

Straßen- kategorie	NC	Kraftstoffmenge [g/km]	Energieverbrauch [kJ/m]
Autobahn (AB)	0-1	57,75	2,48
Außerorts (ao)	2-3	43,40	1,87
Innerorts (io)	4-5	55,50	2,39
Durchschnitt (alle)	-	51,32	2,21

Tabelle 3.2: Energieverbrauch abhängig von der Network Class (NC) auf Basis der Werte aus Tabelle 3.1 sowie der NC-unabhängige Durchschnittswert

3.1.3 Varianten

Je nach gewünschtem Detaillierungsgrad gibt es die Möglichkeit die in Gleichung 3.2 eingehenden Größen zu variieren.

- **ohne Höhendaten, durchschnittlicher Verbrauch:** Die allgemeinste Form ist die Verwendung eines konstanten Verbrauchswertes sowie die Nichtberücksichtigung von Steigungen bzw. Gefällen. Dies erreicht man indem $E_m = 2,21$ kJ/m für alle Straßenkategorien gilt. Des Weiteren wird der Längsneigungskorrekturfaktor konstant auf den Wert 1,0 gesetzt.

Angenommen die Kosten eines Segments für das Routing würden ausschließlich durch den Energieverbrauch bestimmt werden, dann käme dies einer Optimierung ausschließlich nach der Distanz gleich.

- **ohne Höhendaten, aber differenzierter Verbrauch:** In einer weiteren Variante werden statt des durchschnittlichen Energieverbrauchs die von der Network Class abhängigen Werte aus Tabelle 3.2 verwendet. Höheninformationen bleiben wiederum außen vor.
- **mit Höhendaten, durchschnittlicher Verbrauch:** Im dritten Fall werden Höheninformationen berücksichtigt, aber bezüglich des Energieverbrauchs pro Meter in der Ebene nicht nach der Network Class unterschieden. Dies bedeutet, der Energieverbrauch E_m wird konstant auf den Wert 2,21 kJ/m gesetzt. Die Längsneigungskorrekturfaktoren werden nach der zum Segment passenden Kurve in Abbildung 3.1 bestimmt.

- **mit Höhendaten, aber differenzierter Verbrauch:** Die genaueste Modellierung erhält man bei Verwendung von differenzierten Verbrauchswerten sowie Längsneigungskorrekturfaktoren. Der Energieverbrauch wird abhängig von der Network Class Tabelle 3.2 entnommen. Der Längsneigungskorrekturfaktor wird nach der jeweils passenden Funktion aus Abbildung 3.1 bestimmt.

3.2 Physikalisches Modell

Ziel im Folgenden ist es den Energieverbrauch auf Basis von physikalischen Formeln und Zusammenhängen zu bestimmen.

3.2.1 Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik

a) Fahrwiderstände

Um ein Fahrzeug in Bewegung zu bringen bzw. zu halten wird Energie dafür benötigt die Fahrwiderstände zu überwinden. Der Gesamtwiderstand F_{An} aus Gleichung 3.3 setzt sich aus vier Teilen zusammen: Radwiderstand F_R , Steigungswiderstand F_{St} , Luftwiderstand F_L und Beschleunigungswiderstand F_B . Er ist damit von der Masse m , der Stirnfläche A und dem Luftwiderstandsbeiwert c_w des Fahrzeugs abhängig. Des Weiteren spielt der Hangwinkel α , der Rollwiderstandsbeiwert f_r , die gefahrene Geschwindigkeit v sowie die Beschleunigung \dot{v} und der Drehmassenzuschlagsfaktor λ eine Rolle. Als physikalische Konstanten gehen die Erdbeschleunigung g und die Luftdichte ρ_L ein.

$$F_{An} = F_R + F_{St} + F_L + F_B \quad (3.3)$$

$$= f_r mg \cos(\alpha) + mg \sin(\alpha) + 0,5\rho_L c_w A v^2 + \lambda m \dot{v}$$

Beim *Radwiderstand* F_R wird in dieser Arbeit nur der größte Anteil, nämlich der Rollwiderstand berücksichtigt. Darüber hinaus treten am Rad unter anderem noch der Schwall-, Lager-, Vorspur- und Kurvenwiderstand auf. Nach [Hak08] beträgt der Anteil des Rollwiderstands am Radwiderstand unter der Voraussetzung, dass die Spur korrekt eingestellt ist und die Radlager intakt sind, bei Geradeausfahrt über 80%. Bei der hier verwendeten Näherung werden also maximal 20 % des gesamten Radwiderstands nicht beachtet.

Der *Steigungswiderstand* F_{St} ist identisch mit der Hangabtriebskraft, welche die parallel zur Ebene gerichtete Komponente der Gewichtskraft bezeichnet. Da die Steigung q einer Straße meist in Prozent und nicht als Hangwinkel α angegeben wird, muss dieser nach Gleichung 3.4 berechnet werden.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{q}{100}\right) \quad (3.4)$$

Der *Luftwiderstand* F_L entsteht nach [Huc05] überwiegend durch Druckdifferenzen am Fahrzeug in Strömungsrichtung (Anteil am Gesamtluftwiderstand >80%), Reibung an der Fahrzeugoberfläche (<10%) und aufgrund von Impuls- und Reibungsverlusten bei der Durchströmung von Kühler, Motorraum sowie dem Innenraum (<10%). All diese Widerstandsanteile sind im Luftwiderstandsbeiwert c_w zusammengefasst. Je niedriger der c_w -Wert eines Fahrzeuges desto besser sind dessen Strömungseigenschaften. Der durchschnittliche Luftwiderstandsbeiwert europäischer Pkws lag im Jahr 2003 bei 0,322. Die eigentlich bestimmende Größe ist die zu berücksichtigende Querfläche A . Der in Gleichung 3.3 verwendete Zusammenhang ist nur bei Windstille korrekt. Im Allgemeinen muss noch die Windgeschwindigkeit inklusive Richtung berücksichtigt werden, diese bleibt aber in dieser Arbeit außen vor.

Der *Beschleunigungswiderstand* F_B entspricht der Kraft, die aufgebracht werden muss, um die Trägheit des zu beschleunigenden Körpers zu überwinden. Dabei muss sowohl der translatorische als auch der rotatorische Anteil der Beschleunigung berücksichtigt werden. Es ist nicht die Masse alleine, die die Drehträgheit verursacht, sondern das Massenträgheitsmoment θ (Verteilung der

Masse um die Drehachse). Der Beschleunigungswiderstand kann wie in Gleichung 3.5 beschrieben werden, dabei bezeichnet m die Masse des Fahrzeugs, θ_R das Massenträgheitsmoment der Räder, θ_M das des Motors, r den dynamischen Reifenradius, i die Übersetzung und λ den Drehmassenzuschlagsfaktor, der einen Großteil der Parameter zusammenfasst.

$$F_B = \left(m + \frac{\theta_R + i^2 \theta_M}{r^2} \right) \dot{v} = \lambda m \dot{v} \quad (3.5)$$

In Abbildung 3.2 ist illustriert welchen Anteil die vier Widerstände am Gesamtfahrwiderstand F_{An} haben.

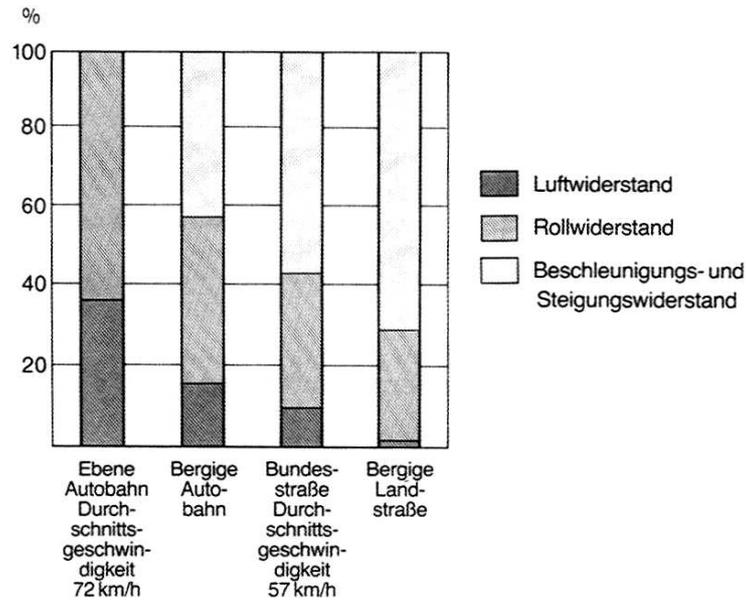


Abbildung 3.2: Zusammensetzung des Gesamtfahrwiderstands aus den vier Teilwiderständen am Beispiel eines 40-t-Sattelzuges bei verschiedenen Einsatzarten (aus [Huc05])

b) Energiebedarf

Der Energiebedarf W bestimmt sich aus den Wirkungsgraden des Antriebsstrangs η_A sowie des Motors η_M und der benötigten Leistung P über einen gewissen Zeitraum T . Der Leistungsbedarf ist hierbei eine Funktion des Fahrwiderstands F_{An} und der Geschwindigkeit v .

$$W = \int_0^T \frac{1}{\eta_A \eta_M} P dt = \int_0^T \frac{1}{\eta_A \eta_M} F_{An} v dt \quad (3.6)$$

► Motorwirkungsgrad η_M

Der Wirkungsgrad eines Motors η_M ist außer von der Motordrehzahl und damit von der Fahrgeschwindigkeit sowie dem gewählten Gang auch von der Technologie abhängig. Leider gibt es keinerlei konkrete zugängliche Zahlen zur Abhängigkeit zwischen Motorwirkungsgrad und Fahrgeschwindigkeit, da sich diese wohl aufgrund der vielen Einflüsse nicht in allgemeiner Form exakt bestimmen lassen und/oder Betriebsgeheimnis sind. Im Folgenden wird versucht unter einigen Annahmen und Vereinfachungen den Motorwirkungsgrad in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit, genauer gesagt von der Motorauslastung, zu beschreiben. Die präsentierte Modellierung ist sicherlich nicht exakt und muss als Näherungslösung betrachtet werden.

In [Hak08] finden sich Kennfelder von Fahrzeugmotoren, die den Wirkungsgrad abhängig vom Verhältnis der Motordrehzahl zur Nenndrehzahl n_{Nenn} enthalten. Unter Nenndrehzahl versteht

man die Drehzahl, bei der die Maximalleistung des Motors erreicht wird. Diesen Wert erfährt man für ein bestimmtes Fahrzeug aus dessen Datenblatt unter maximaler Leistung.

Abbildung 3.3 kann der Motorwirkungsgrad abhängig von der Drehzahlauslastung und dem Verhältnis der Leistung zur maximalen Leistung entnommen werden. Die Kennfelder werden nach oben durch die Volllast-Kennlinie beschränkt. Laut [Hak08] erreichen Ottomotoren einen maximalen Wirkungsgrad von bis zu 40%. Moderne Lkw-Dieselmotoren können hingegen einen maximalen Wirkungsgrad von beinahe 50% erreichen.

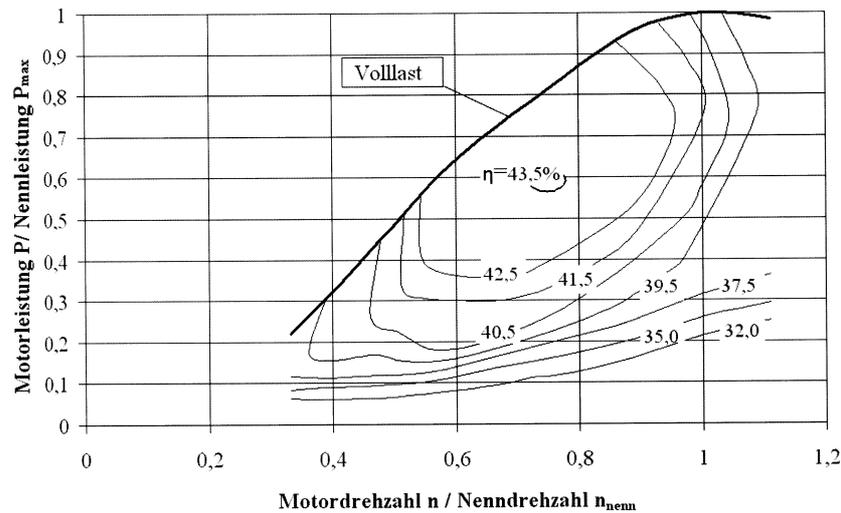


Abbildung 3.3: Kennfeld eines Dieselmotors als Direkteinspritzer mit Abgasturbolader (aus [Hak08])

Mithilfe der Werte aus Abbildung 3.3 wird der Motorwirkungsgrad abhängig vom Verhältnis Leistung zur maximalen Leistung modelliert. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.4 zu sehen.

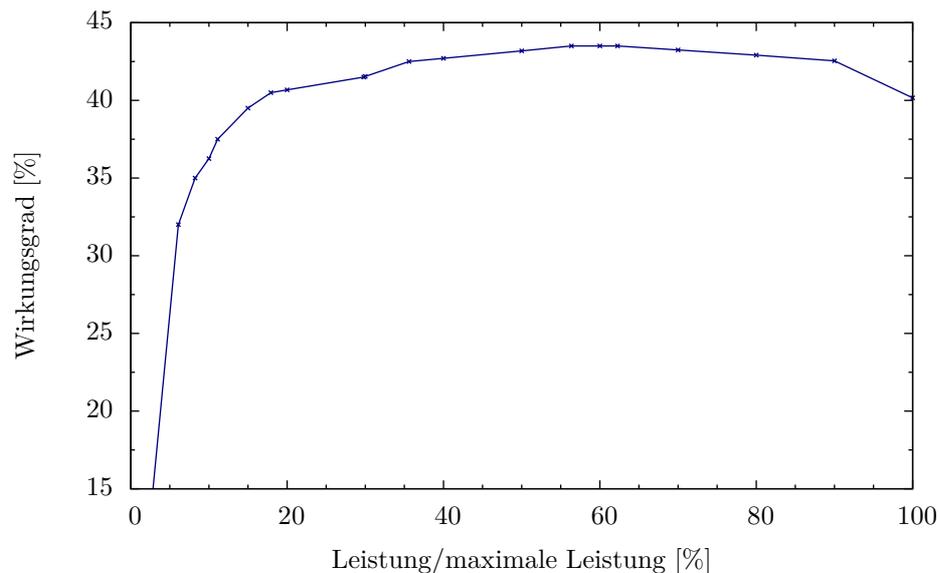


Abbildung 3.4: Wirkungsgrad eines Dieselmotors abhängig von der Leistungsauslastung

► Wirkungsgrad des Antriebsstrangs η_A

Neben dem Motorwirkungsgrad ist auch der Wirkungsgrad des Antriebsstrangs abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit insbesondere von der Gesamtübersetzung. Des Weiteren spielt die benötigte Leistung eine Rolle. Zum Antriebsstrang zählen alle Komponenten, welche im Fahrzeug das Drehmoment vom Motor bis auf die Straße übertragen. Dazu gehören beispielsweise das Getriebe, die Kupplung und die Räder, sowie diverse Antriebswellen.

Da für den Wirkungsgrad des Antriebsstrangs in der Literatur keine konkreten Werte gefunden werden konnten, wird dieser mithilfe von Messungen in der Ebene für verschiedene konstante Geschwindigkeiten modelliert. Als Fahrzeug dient ein Audi A3 2.0 TDI Sportback ABT Power mit 125 kW, welcher im gesamten Zeitraum dieser Arbeit zur Verfügung gestanden hat. Aus den erhaltenen Messwerten wird der Wirkungsgrad einerseits abhängig von der Geschwindigkeit und andererseits abhängig vom Leistungsbedarf, welcher aus dem Fahrwiderstand resultiert, modelliert. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.5 zu sehen. Im Folgenden wird das Maximum der beiden Varianten als Wirkungsgrad des Antriebsstrangs verwendet.

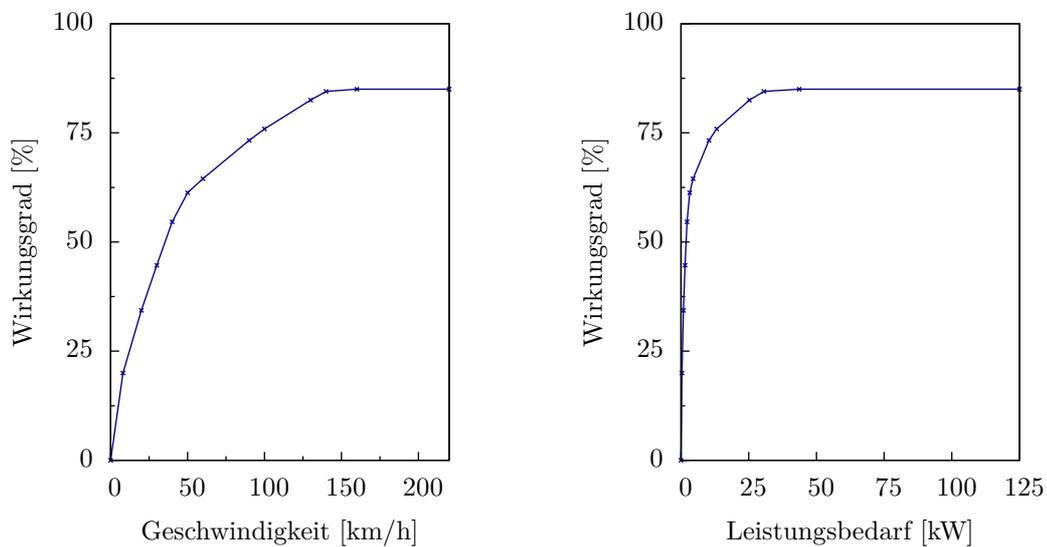


Abbildung 3.5: Wirkungsgrad des Antriebsstrangs abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit (links) bzw. abhängig vom Leistungsbedarf (rechts)

c) Rekuperation

Bedingt durch den Anteil des Steigungs- und Beschleunigungswiderstands kann der Fahrwiderstand nach Gleichung 3.3 negativ werden. Dies tritt bei Fahrten im Gefälle oder bei Verzögerungen auf. Die überschüssige kinetische Energie muss umgewandelt werden. Hierbei bestehen zwei Möglichkeiten entweder die Energie geht an den Bremsen und im Motor als Wärme verloren oder sie wird zumindest teilweise zurückgewonnen indem sie in einen Energiespeicher gespeist wird. Letztere Technik wird bei Fahrzeugen mit Elektromotor oder Hybridantrieb häufig eingesetzt und ist unter dem Begriff Rekuperation bekannt. In der Formel 1 Saison 2009 haben sogar einige Teams ein Energierückgewinnungssystem (KERS) im Rennsport eingesetzt um in bestimmten Situationen über zusätzliche Motorleistung verfügen zu können.

3.2.2 Berechnung

Auf Basis der Erkenntnisse aus Abschnitt 3.2.1 lässt sich nun der Energieverbrauch pro Segment mit Gleichung 3.7 beschreiben. Hierbei wird angenommen, dass jedes Segment jeweils mit kon-

stanter Geschwindigkeit befahren wird. Geschwindigkeitswechsel zwischen den Segmenten werden ebenfalls nicht berücksichtigt. Dies bedeutet, dass der Beschleunigungswiderstand F_B außen vor bleibt.

Der zu überwindende Fahrwiderstand F_{An} setzt sich also aus dem Radwiderstand F_R , dem Steigungswiderstand F_{St} und dem Luftwiderstand F_L zusammen. Wenn F_{An} negativ wird, kann wie bereits erwähnt bei vorhandenem System Energie zurückgewonnen werden. Daher sind bei der Berechnung des Energiebedarfs nach Gleichung 3.7 zwei Fälle zu unterscheiden.

$$E = \begin{cases} \int_0^T \frac{1}{\eta_M \eta_A} (F_R + F_{St} + F_L) \cdot v \, dt & , \text{ falls } F_{An} = F_R + F_{St} + F_L \geq 0 \\ \eta_R (F_R + F_{St} + F_L) \cdot L & , \text{ sonst} \end{cases} \\ = \begin{cases} \frac{1}{\eta_M \eta_A} (f_r mg \cos(\alpha) + mg \sin(\alpha) + 0,5 (\rho_L c_w A) v^2) \cdot L & , \text{ falls } F_{An} \geq 0 \\ \eta_R (f_r mg \cos(\alpha) + mg \sin(\alpha) + 0,5 (\rho_L c_w A) v^2) \cdot L & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (3.7)$$

Die Bedeutung der Größen, welche in Gleichung 3.7 eingehen, ist in Abschnitt 3.2.1 erklärt. Zusätzlich bezeichnet T die Fahrzeit, welche für das Segment bei der gegebenen Geschwindigkeit benötigt wird, und L die Segmentlänge. Des Weiteren steht η_R für den Rekuperationsfaktor, der den Anteil der zurückgewonnenen Energie am Energieüberschuss angibt.

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, dürfen die Kosten eines Segments bei dem verwendeten Algorithmus zur Bestimmung des günstigsten Weges zwischen zwei Orten nicht negativ sein. Dieser Fall könnte aber, wenn die Kosten eines Segments ausschließlich vom Energieverbrauch abhängen, aufgrund von Rekuperation auftreten. Daher wird, wenn Rekuperation berücksichtigt wird, das Kantengewicht wie in Definition 2 beschrieben mithilfe einer Potentialfunktion angepasst. Als Potentialfunktion eignet sich die Lageenergie des Fahrzeuges, da höchstens die Differenz der Lageenergien zwischen Start- und Zielknoten des Segments zurückgewonnen werden kann.

Tabelle 3.3 enthält die Werte für die benötigten Fahrzeuggrößen sowie physikalische Konstanten, welche im weiteren Verlauf verwendet werden. Als Fahrzeug wird ein Audi A3 2.0 TDI simuliert, da dieser die Basis der Modellierung des Wirkungsgrads für den Antriebsstrang darstellt.

Größe	Wert	Einheit
<i>Physikalische Konstanten</i>		
Erdbeschleunigung g	9,81	m/s^2
Luftdichte ρ_L	1,2	kg/m^3
<i>Straßenabhängige Größen</i>		
Rollwiderstandsbeiwert f_r	0,01	-
<i>Fahrzeuggrößen</i>		
Luftwiderstandsbeiwert c_w	0,33	-
Stirnfläche A	2,19	m^2
Masse m	1 370	kg
Maximale Leistung P_{max}	125	kW

Tabelle 3.3: Verwendete Werte für die Größen, die in Gleichung 3.7 eingehen. Die Fahrzeuggrößen werden in Anlehnung an einen Audi A3 2.0 TDI Sportback gewählt.

3.2.3 Varianten

Bei der Bestimmung des Energieverbrauchs für die Fahrt über ein Segment nach Gleichung 3.7 sind einige Variationsmöglichkeiten gegeben.

- **ohne Höhendaten:** In diesem Fall wird angenommen, dass grundsätzlich in der Ebene gefahren wird. Folglich ist der Hangwinkel α nicht von der realen Längsneigung des Segments abhän-

gig, sondern konstant auf den Wert 0 gesetzt. Rekuperation spielt in diesem Fall keine Rolle, da der Fahrwiderstand ohne Gefälle und ohne Verzögerungen immer positiv ist.

- **mit Höhendaten, aber ohne Rekuperation:** In der nächsten Stufe wird der Hangwinkel α nach der Steigung bzw. dem Gefälle des Segments gewählt. Jedoch wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug kein Energierückgewinnungssystem hat, sondern ausschließlich von einem Verbrennungsmotor angetrieben wird. Daher wird der Rekuperationsfaktor η_R konstant auf den Wert 0 gesetzt.

Abbildung 3.6 gibt einen Einblick in diese Variante. Für einen simulierten Audi A3 2.0 TDI ist der Energieverbrauch abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit für diverse Längsneigungen zwischen -10 und $+10$ Prozent illustriert. Bei positiven Längsneigungen liegt die optimale Geschwindigkeit bezüglich Energieverbrauch bei 60 bzw. 65 km/h. Bei Gefällen von -1 , -5 bzw. -10 % beträgt sie 85, 125 bzw. 190 km/h.

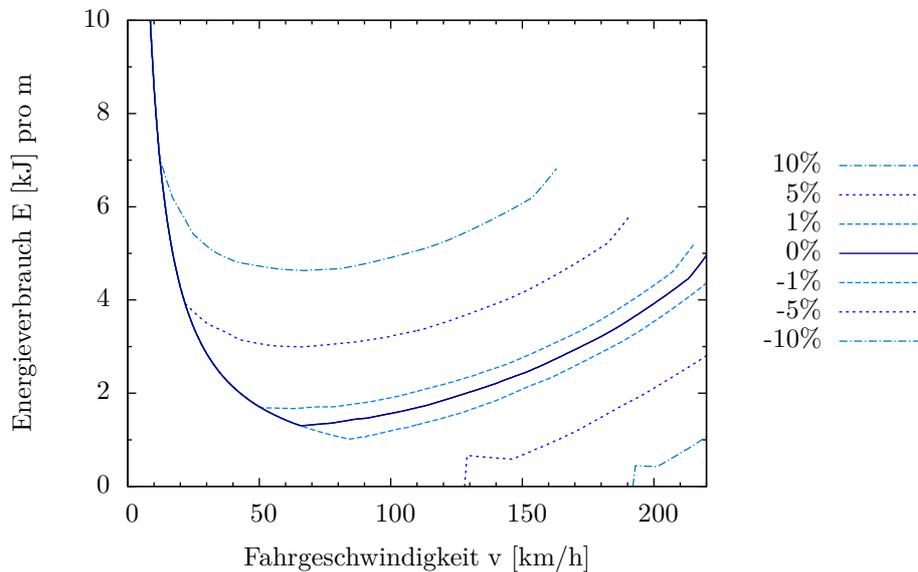


Abbildung 3.6: Berechneter Energieverbrauch eines Audi A3 2.0 TDI für verschiedene Längsneigungen zwischen -10 und $+10$ %.

Bei Steigungen werden die Fahrgrenzen des Fahrzeugs deutlich. So beträgt die maximal mögliche Geschwindigkeit bei 5 bzw. 10 % Steigung 191 bzw. 163 km/h. Bei Gefällen von -5 bzw. -10 % gibt es eine Geschwindigkeit, unterhalb welcher der zu überwindende Fahrwiderstand negativ ist und somit keine Energie verbraucht wird. Wenn dieser Punkt jedoch nur minimal überschritten wird, führt dies zu deutlich von Null verschiedenen Energieverbrauchswerten, da der Motorwirkungsgrad aufgrund der geringen Last sehr niedrig ist. Die weiteren Unebenheiten der Kurven liegen in den linear interpolierten Wirkungsgraden bei niedrigen Geschwindigkeiten bzw. Lastzuständen sowie im konstanten Wirkungsgrad des Antriebsstrangs nach Erreichen des Maximalwerts begründet.

- **mit Höhendaten und Rekuperation:** Als letzte Variante bietet sich die Berücksichtigung von Längsneigungen und Rekuperation an. Das bedeutet, dass der Hangwinkel α vom Segment bzw. von der Höhe des Start- und Zielknotens sowie der Länge des Segments abhängig ist. Der Rekuperationsfaktor η_R wird konstant auf 50 % gesetzt. Dies stellt eine Vereinfachung dar, da korrekterweise der Wirkungsgrad sowie die Kapazität des Energiespeichers im Verlauf

des Routings berücksichtigt werden müsste. Damit könnte der Energieverbrauch aber nicht für jedes Segment vorberechnet werden, da er vom Routenverlauf abhängig wäre.

3.3 Überblick über alle Modellvarianten

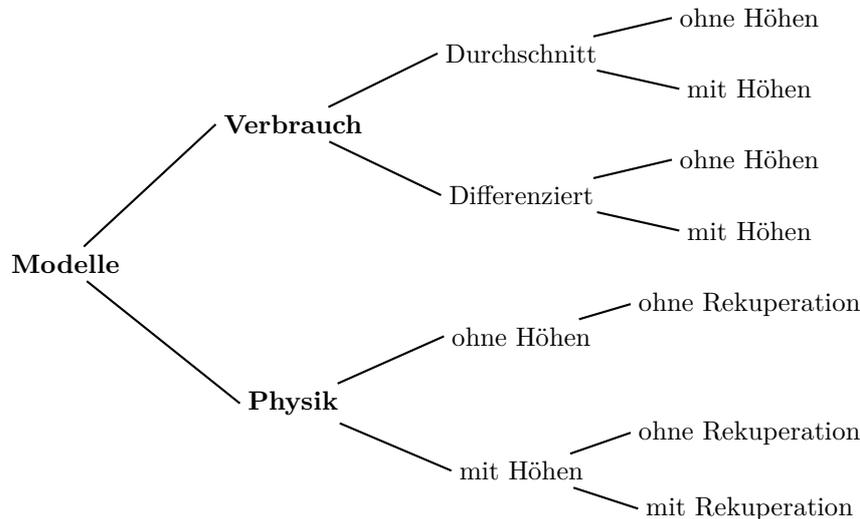


Abbildung 3.7: Modelle im Überblick: physikalischer Ansatz versus verbrauchs-basiertes Modell in den unterschiedlichen Varianten

Abbildung 3.7 gibt einen Überblick über die beiden vorgestellten Ansätze und deren Varianten. Die grundlegende Idee ist bei beiden Ansätzen identisch. Auf zwei verschiedene Arten wird der Energieverbrauch für die Fahrt eines Meters auf dem jeweiligen Segment bestimmt. Die eingehenden Parameter unterscheiden sich teilweise. Es ist jedoch durchaus denkbar, den verbrauchs-basierten Ansatz weiter zu verfeinern, so dass dieser dem physikalischen Ansatz noch deutlich näher kommt.

Das in Abschnitt 3.1 vorgestellte verbrauchs-basierte Modell basiert auf Daten aus dem Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [HBEFA]. Dabei wird nach drei Straßenkategorien unterschieden. Optional geht auch die Längsneigung des Segments mit in die Berechnung des Energieverbrauchs nach Gleichung 3.2 mit ein.

Die wichtigste Eingangsgröße für die Berechnung nach dem physikalischen Modell aus Abschnitt 3.2 ist die rechnerische Geschwindigkeit des Segments. Abhängig von dieser sowie einiger Fahrzeugeigenschaften wird der Energieverbrauch auf Basis von physikalischen Zusammenhängen nach Gleichung 3.7 bestimmt. Dabei wird der Roll-, Steigungs- sowie Luftwiderstand berücksichtigt. Der Beschleunigungswiderstand bleibt außen vor. Es werden also weder Geschwindigkeitsänderungen während der Fahrt auf einem Segment noch zwischen zwei Segmenten beachtet. Die Variationsmöglichkeiten des physikalischen Ansatzes sind die Berücksichtigung von Höheninformationen sowie von Rekuperation. Im letzteren Fall kann bei Fahrten mit Gefälle ein Anteil des Energieüberschusses durch den negativen Fahrwiderstand zurückgewonnen werden.

Alle vorgestellten Varianten der beiden Ansätze werden in Kapitel 4 genauer beleuchtet und einander gegenübergestellt.

4 Evaluierung

Dieses Kapitel dient der Bewertung der präsentierten Modelle zur Energieverbrauchsberechnung. Zunächst werden die verschiedenen zum Einsatz kommenden Anfragedatensätze vorgestellt (Abschnitt 4.1). Anschließend wird mit dem Stundenlohnmodell ein Ansatz eingeführt, der in den folgenden Betrachtungen greifbare und anschauliche Ergebnisse ermöglicht (Abschnitt 4.2). Die beiden nächsten Abschnitte 4.3 und 4.4 haben jeweils die Analyse eines der beiden Modelle aus Kapitel 3 zum Inhalt. Der darauffolgende Abschnitt 4.5 beschäftigt sich mit dem Effekt von niedrigeren Geschwindigkeiten auf den Energieverbrauch nach dem physikalischen Modell. In Abschnitt 4.6 werden der verbrauchsbasierte und der physikalische Ansatz gegenüber gestellt. Abschließend folgt ein Vergleich der berechneten Routen mit denen der bisherigen Optimierung nach Distanz und Zeit (Abschnitt 4.7).

4.1 Anfragedatensätze

Für die Analyse und Bewertung der verschiedenen Modelle werden unterschiedliche Testdatensätze mit jeweils 1000 Anfragen innerhalb Deutschlands verwendet. Diese unterscheiden sich zum einen in der Verteilung der kürzesten Distanzen und zum anderen in der Wahl der Start- und Zielknoten.

4.1.1 Distanzen

Die einzelnen Anfragen werden mittels einer Dijkstra-Suche (Abschnitt 2.2) generiert, welche als Kantengewicht die Länge der Segmente nutzt. Die unidirektionale Suche geht dabei von einem zufälligen Knoten, der aus einer bestimmten Menge gezogen wird, aus und bricht bei Erreichen der gewünschten Distanz, welche entsprechend einer konkreten Verteilung gewählt wird, ab. Die in Frage kommenden Knotenmengen werden in Paragraph 4.1.2 vorgestellt. Um neben Fahrten in das gewünschte Gebiet auch Fahrten aus dem Gebiet heraus zu simulieren, wird bei einer Hälfte der Anfragen vom Startknoten aus vorwärts und bei der anderen Hälfte vom Zielknoten aus rückwärts gesucht.

Um die Auswirkungen von diversen Streckenlängen zu untersuchen, werden die kürzesten Distanzen gleichverteilt innerhalb unterschiedlicher Intervalle gewählt. Hierbei werden Anfragen sehr kurzer (1–5 km), kurzer (5–10 km), mittellanger (20–40 km) bzw. langer (200–400 km) Distanz generiert.

Des Weiteren werden typische Strecken betrachtet. Hierfür wird eine Verteilung definiert, welche den Ergebnissen aus der Studie Mobilität in Deutschland aus dem Jahr 2002 ([MiD02]) entspricht. Dem Tabellenbuch kann für jedes Distanzintervall entnommen werden wie viele Fahrten dieser Länge in der Haushaltsbefragung angegeben wurden. Über die Verteilung der Fahrten innerhalb der Intervalle sowie über die Maximaldistanz werden keine Angaben gemacht. Unter der Annahme, dass die Distanzen innerhalb der Intervalle gleichverteilt sind und die maximale Distanz 200 km beträgt, ergibt sich die in Abbildung 4.1 dargestellte Verteilung.

Weglänge [km]		Anteil [%]
von	bis	
0,0	0,4	1,02
0,4	0,6	2,04
0,6	1,0	7,14
1,0	5,0	38,77
5,0	10,0	19,39
10,0	25,0	20,41
25,0	100,0	10,20
100,0	∞	1,02

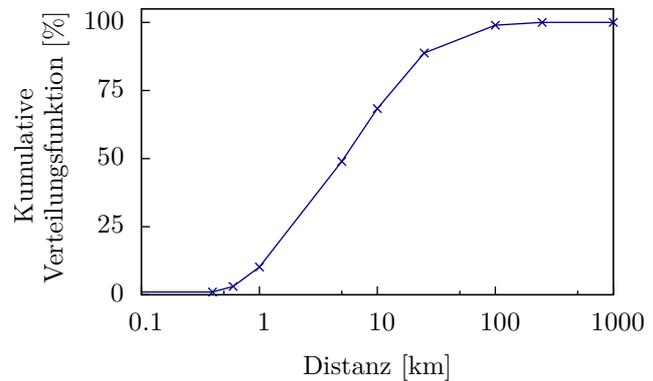


Abbildung 4.1: Verteilung der Distanzen typischer Wege deutscher Autofahrer nach [MiD02]

Als dritte Variante wird keine Vorgabe bezüglich der Verteilung der kürzesten Distanzen gemacht. Diese Anfragen werden durch zufälliges Ziehen des Start- und des Zielknotens sowie anschließendes Testen, ob ein Weg existiert, generiert.

4.1.2 Start- und Zielknoten

Bei der Wahl des Start bzw. Zielknotens für die Dijkstra-Suche werden drei unterschiedliche Varianten genutzt. Im allgemeinsten Fall kommen alle Knoten des Graphen, welcher Deutschland repräsentiert, in Frage. Im zweiten Fall erfolgt eine Einschränkung der Menge der Knoten auf Bebauungsgebiete. Dies wird mithilfe des Urban-Flags der Segmente in den Kartendaten bewerkstelligt. Die resultierende Menge enthält knapp 43 % aller Knoten. Des Weiteren wird das Gebiet zwischen den Bundesautobahnen A 5, A 8 sowie A 81 als „Schwarzwald“ definiert. Die entstehende Menge von Knoten umfasst das größte zusammenhängende Mittelgebirge Deutschlands und dient insbesondere dazu den Effekt von Höheninformationen zu untersuchen. Abbildung 4.2 veranschaulicht die Knotenmengen „Bebauungsgebiete“ und „Schwarzwald“.

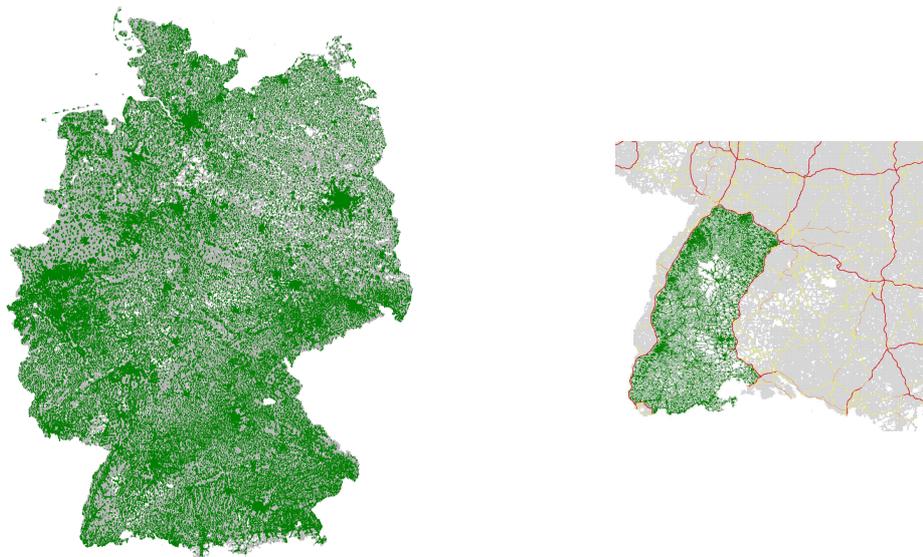


Abbildung 4.2: Veranschaulichung der Knotenmengen „Bebauungsgebiete“ (links) und „Schwarzwald“ (rechts)

4.1.3 Überblick

Wenn man die vorgestellten Varianten der Distanz-Verteilungen mit den möglichen Start-Ziel-Knotenmengen kombiniert, erhält man diverse potentielle Anfragedatensätze. Abbildung 4.3 zeigt die Arten von Anfragen, welche im Folgenden im Rahmen der Evaluierung Verwendung finden.

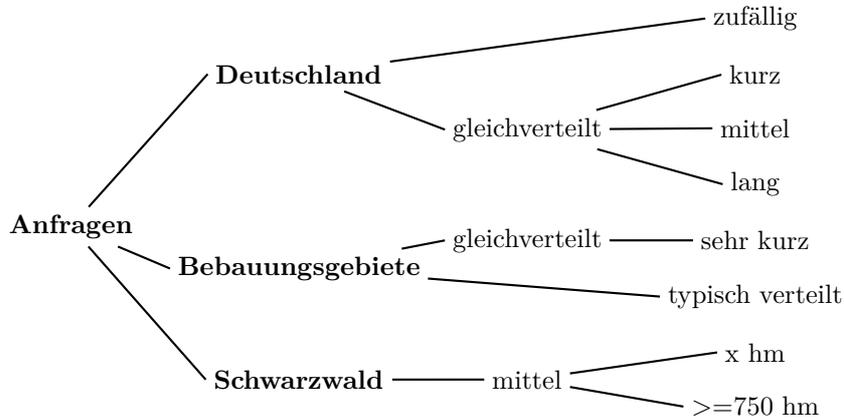


Abbildung 4.3: Überblick über die im Folgenden betrachteten Anfragedatensätze

Bei deutschlandweiten Anfragen werden zum einen zufällig gewählte Start-Ziel-Knoten-Paare und zum anderen Anfragen mit gleichverteilten kürzesten Distanzen unterschiedlicher Länge betrachtet. Letztere sollen Kurz-, Mittel- und Langstrecken repräsentieren.

Bei der nächsten Gruppe von Anfragedatensätzen ist der gewählte Start- oder Zielknoten Teil der Knotenmenge „Bebauungsgebiete“. Der zweite Knoten wird so bestimmt, dass entweder die kürzesten Distanzen zwischen 1 und 5 km gleichverteilt sind oder die Verteilung der in Abbildung 4.1 entspricht. Erstere Anfragen stehen für sehr kurze Strecken in Städten und Wohngebieten. Letztere sind stellvertretend für typische Strecken nach der Studie *Mobilität in Deutschland* ([MiD02]).

Die Start- und Zielknoten der Anfragen in der dritten und letzten Gruppe liegen allesamt in der Knotenmenge „Schwarzwald“. Die kürzesten Distanzen sind gleichverteilt zwischen 20 und 40 km. Daher sind die Anfragen von ihrer Länge her mit Mittelstrecken vergleichbar. Optional werden die resultierenden Start-Ziel-Knoten-Paare noch danach gefiltert, ob auf der kürzesten Route insgesamt mindestens 750 hm überwunden werden.

4.2 Stundenlohnmodell

Ziel ist es greifbare und anschauliche Ergebnisse zu erhalten. Daher sollen die Kosten einer Route in Euro ausgedrückt werden. Dies bedeutet, dass bei einer Optimierung nach Zeit und Energieverbrauch einerseits ein Stundenlohn des Fahrers und andererseits der Kraftstoffpreis berücksichtigt werden.

4.2.1 Kosten pro Segment

Die Kosten für ein Segment sind in Gleichung 4.1 beschrieben. Die Fahrzeit ergibt sich aus den in den Kartendaten hinterlegten Werten für Segmentlänge und Geschwindigkeit (vgl. Abschnitt 2.1). Für den Kraftstoffverbrauch wird der Energieverbrauch nach Gleichung 3.2 bzw. 3.7 bestimmt und dieser durch den Heizwert dividiert sowie mit der Segmentlänge multipliziert.

$$\text{Kosten} = \text{Fahrzeit} \cdot \text{Stundenlohn} + \text{Kraftstoffverbrauch} \cdot \text{Kraftstoffpreis} \quad (4.1)$$

Der Stundenlohn des Fahrers wird im Folgenden variiert. So werden 0, 1, 5 bzw. 10 Euro angesetzt um die Auswirkungen verschiedener Priorisierungen bezüglich Zeit und Energieverbrauch bewerten

zu können. Wenn der Fahrer nichts verdient, so ist die optimale Route gleich der Route mit niedrigstem Energieverbrauch nach dem jeweiligen Modell. Bei einem Stundenlohn von 10 Euro fällt die Berücksichtigung des Energieverbrauchs relativ gering aus. Die beiden Werte dazwischen vervollständigen das Bild.

Auch in der Realität liegen die Löhne deutscher Fernfahrer abhängig von der Region relativ weit auseinander. Während in Sachsen-Anhalt nach Tarif bis zu 6,73 € in der Stunde bezahlt werden, sind in Schleswig-Holstein bis zu 9,32 € möglich. In Bayern liegt der maximale tarifliche Stundenlohn bei 10,88 € [BAG09]. Die gewählten Werte des Stundenlohnmodells liegen also zumindest teilweise von realen Löhnen deutscher Berufskraftfahrer nicht weit entfernt.

Als Preis für einen Liter Diesel dient das Mittel der durchschnittlichen Preise von Juli 2008 bis Juni 2009 nach dem Statistischen Bundesamt [MWV09]. Daraus ergibt sich, dass ein Liter Diesel 1,09 € kostet.

4.2.2 Methodik

Für die Evaluierung der Modelle werden für jede Kombination aus Anfragedatensatz, Modell und Stundenlohn jeweils 1000 Routen berechnet. Bei vier Stundenlöhnen bedeutet dies, dass 224 000 Routen bestimmt werden. Die acht Anfragedatensätze sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Einen Überblick über die sieben Modellvarianten bietet Abbildung 3.7.

Im weiteren Verlauf werden jeweils zwei Modelle miteinander verglichen, welche sich in genau einem Aspekt unterscheiden. Für jede s - t -Anfrage werden die optimalen Routen nach den beiden zu vergleichenden Modellen bestimmt. Die resultierenden Pfade von s nach t werden anschließend nach dem detaillierteren der beiden Modelle bewertet und die relativen Differenzen zwischen den beiden Modellierungen ermittelt.

4.2.3 Vergleich zweier Modelle

Im weiteren Verlauf des Kapitels wird der Begriff *relative Differenz* als Maß in den Vergleichen zweier Modelle verwendet. Definition 3 beschreibt formal, was darunter verstanden wird.

Definition 3 (Relative Differenz – Vergleich zweier Modelle):

Gegeben sei eine s - t -Anfrage sowie die Zielfunktionen Kosten, Distanz, Zeit und Energieverbrauch. Seien A und B zwei Modelle für die Energieverbrauchsberechnung, welche sich in genau einem Aspekt unterscheiden. Modell A sei in diesem Punkt detaillierter als Modell B . P_A bzw. P_B bezeichne den Pfad, welcher die nach Modell A bzw. B optimale Route von s nach t , repräsentiert. Des Weiteren sei Z_A eine Zielfunktion nach Modell A . Dann bezeichne

$$\Delta_{\text{relativ}, Z_A} = \begin{cases} 1 - \frac{Z_A(P_A)}{Z_A(P_B)} & , \text{ falls } Z_A(P_A) \leq Z_A(P_B) \\ \frac{Z_A(P_B)}{Z_A(P_A)} - 1 & , \text{ sonst} \end{cases}$$

die *relative Differenz* von Modell A und Modell B der s - t -Anfrage bezüglich der Zielfunktion Z_A .

Eine positive relative Differenz bedeutet, dass durch eine explizite Optimierung nach Modell A im Vergleich zur Optimierung nach Modell B Kosten, Distanz, Zeit bzw. Energie eingespart werden können. Fällt die relative Differenz für eine Zielfunktion negativ aus, so führt die Optimierung nach Modell A zu einem Mehraufwand in diesem Aspekt.

An dieser Stelle ist zu beachten, dass die Zielfunktion Z_A in den Fällen Zeit und Distanz nicht von dem gewählten Modell A abhängt, welches nur auf den Energieverbrauch und somit auch auf die Kosten Einfluss hat.

a) Semantik der Tabellen

In den folgenden Abschnitten 4.3 bis 4.7 werden für die verschiedenen Vergleiche zwei Arten von Tabellen präsentiert.

Der erste Tabellentyp enthält Durchschnitte über die relativen Differenzen nach Definition 3 der 1000 Anfragen. Modell *A* ist im weiteren Verlauf immer das erstgenannte Modell in den jeweiligen Überschriften, Modell *B* somit das letztgenannte. Für die Kosten ist neben dem Durchschnittswert noch das 90%-Quantil in Klammern angegeben. Des Weiteren enthalten die Tabellen Angaben darüber wie viel Prozent der verglichenen Routen einen identischen Verlauf (d.h. gleiche Distanz und gleiche Energiekosten nach allen Modellen) vorweisen.

Ferner werden Tabellen angegeben, die für Kosten, Distanz, Zeit und Energie den Durchschnitt über alle betrachteten Routen enthalten. Die Werte in der oberen Zeile sind dabei die Größen des Pfads P_A nach Modell *A*. Die untere Zeile enthält den Durchschnitt über die Ergebnisse der Bewertung des Pfads P_B nach Modell *A*.

4.3 Verbrauchsbasierter Ansatz

4.3.1 Allgemeines

Der in Abschnitt 3.1 vorgestellte Ansatz basiert auf Daten aus dem Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [HBEFA].

a) Durchschnittliche Verbrauchswerte

In der einfachsten Variante ist der Kraftstoffverbrauch mit 6,18 l pro 100 km für alle Straßenkategorien konstant. Der Energiebedarf für das Befahren eines Segments ist daher linear zu dessen Länge. Pfade, welche bei einem Stundenlohn von 0€ und einheitlichen Verbrauchswerten für jede Network Class entstehen, entsprechen kürzesten Wegen bezüglich der Distanz. Das heißt, die gleichen Ergebnisse werden erzielt, wenn ausschließlich nach Distanz optimiert wird. Folglich entspricht eine Optimierung nach Zeit und Energieverbrauch in diesem Fall der herkömmlichen Optimierung nach Zeit und Distanz.

b) Differenzierte Verbrauchswerte

Das Modell wird durch die Verwendung von differenzierten Verbrauchswerten nach Tabelle 3.2 verfeinert. Tabelle 4.1 enthält die Kosten für eine Fahrt von 10 km Distanz abhängig vom Stundenlohn und der Network Class auf Basis der Daten aus den Tabellen 2.2 und 3.2. Für jede Network Class gibt es aufgrund der acht verschiedenen Speed Classes keine eindeutigen Kosten, sondern für jede Geschwindigkeit einen Wert. In Tabelle 4.1 ist jeweils der resultierende Bereich für die Kosten angegeben.

NC \ Lohn	Lohn			
	0 Euro	1 Euro	5 Euro	10 Euro
0	0,76	0,83 - 0,91	1,13 - 1,53	1,50 - 2,30
1		0,84 - 1,04	1,16 - 2,19	1,56 - 3,62
2	0,57	0,69 - 0,97	1,16 - 2,57	1,75 - 4,57
3		0,74 - 0,97	1,40 - 1,57	2,24 - 4,57
4	0,73	0,93 - 1,23	1,73 - 3,23	2,73 - 5,73
5		0,98 - 1,28	1,98 - 3,51	3,23 - 6,28

Tabelle 4.1: Kosten im verbrauchsbasierten Modell mit differenzierten Verbrauchswerten für eine 10 km lange Fahrt

Bei einem Stundenlohn von 0 € findet eine Gewichtung der Segmente nach ihrer Network Class statt. Straßen der NC 2 und 3 weisen den geringsten Energieverbrauch auf. An zweiter Stelle stehen Streckenabschnitte mit NC 4 oder 5, welche auf die aus HBEFA stammenden Straßenkategorie Innerorts abgebildet werden. Den höchsten Energieverbrauch haben somit Autobahnen und Kraftfahrstraßen, die zu den beiden obersten Network Classes zählen.

Dies hat zur Folge, dass Routen, welche nach dem Modell mit differenzierten Verbrauchswerten optimiert werden, zum einen Autobahnen vermeiden, in Städten meist über Hauptverkehrsstraßen mit NC 2 bzw. 3 führen und gleichzeitig Siedlungen (NC 4 und 5) umfahren. In Einzelfällen wird aber auch der Weg über die Autobahn einer Überlandstrecke vorgezogen. Dies ist der Fall, wenn die Strecke über das Land durch viele kleinere Ortschaften (NC 4 und 5) führt.

Ferner veranschaulichen die Zahlen in Tabelle 4.1, dass Fahrten in Städten und Wohngebieten (NC 4 und 5) für Stundenlöhne über 0 € mit am teuersten sind. Je nach Geschwindigkeit und Priorisierung der Zeit werden Segmente der vier oberen Network Classes 0 bis 3 bevorzugt. Bei einem Stundenlohn von 10 € spielt die Fahrtzeit eine große Rolle, sodass eine Fahrt auf Autobahnen und Kraftfahrstraßen bei hoher Geschwindigkeit die geringsten Kosten aufweist.

In welchem Maß sich die Verwendung differenzierter Kraftstoffverbrauchswerte im Vergleich zu einem einheitlichen Wert auf den Routenverlauf auswirkt, wird in den Paragraphen 4.3.2 und 4.3.3 untersucht.

c) Höhendaten

Eine weitere Variationsmöglichkeit besteht in der Berücksichtigung von Höhendaten. Da bei einer Fahrt im Gefälle weniger Energie eingespart werden kann als für die äquivalente Steigung zusätzlich benötigt wird, sind Fahrten mit so wenigen Höhenunterschieden wie möglich in der Theorie am günstigsten. Ob dies auch in der Praxis zutrifft oder ob die Längsneigungskorrekturfaktoren aus Abbildung 3.1 keinen Effekt auf den Routenverlauf haben, wird in Paragraph 4.3.4 untersucht.

4.3.2 Differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch (ohne Höhen)

Im ersten Vergleich soll untersucht werden, welchen Effekt die Verwendung von differenzierten Verbrauchswerten im Vergleich zu einem einheitlichen Wert auf den Routenverlauf hat. Das erste Modell ist also die Variante des verbrauchsbasierten Ansatzes mit nach Straßenkategorie differenzierten Verbrauchswerten. Im zweiten Modell kommt ein einheitlicher Verbrauchswert statt der differenzierten Werte zum Einsatz. Höhendaten bleiben in dieser Betrachtung außen vor.

Mit den Datensätzen typische Strecken sowie Langstrecken werden im Folgenden zwei relativ gegensätzliche Anfragearten betrachtet. Erstere haben eine durchschnittliche kürzeste Distanz von 14,5 km wohingegen bei letzteren im Mittel mindestens 300 km zurückgelegt werden müssen. Die Ergebnisse zu den restlichen Testdatensätzen sind in Anhang A zu finden.

a) Typische Strecken

Die Tabellen 4.2 und 4.3 zeigen, wie in Paragraph 4.2.3 beschrieben, die Ergebnisse des Vergleichs für Anfragen, deren kürzesten Distanzen typisch verteilt (siehe Abbildung 4.1) sind.

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	53,1	1,587 (5,432)	-1,282	1,715	1,587
1	65,1	0,844 (3,066)	-0,895	-0,829	1,257
5	85,3	0,132 (0,135)	-0,079	-0,285	0,520
10	91,7	0,047 (0,000)	0,156	-0,169	0,493

Tabelle 4.2: Relative Differenzen von Anfragen mit typisch verteilten kürzesten Distanzen (differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch jeweils ohne Höhen).

Der Anteil an gleichen Routen liegt je nach Stundenlohn zwischen 53 und über 91 %. Im Durchschnitt fallen die Differenzen relativ gering aus. Für typische Strecken scheint also eine Optimierung ausschließlich nach Distanz und Zeit zumindest bei realistischen Stundenlöhnen ab 5 € ausreichend. Wenn der Energieverbrauch jedoch stärker gewichtet wird, so kann mithilfe einer Optimierung nach dem Modell mit differenzierten Verbrauchswerten im Vergleich zu einer Optimierung nach dem Modell mit einheitlichen Verbrauchswerten für ein Zehntel der Strecken immerhin knapp 3,1 bzw. 5,4 % der Kosten gespart werden. Dies stellt zumindest für diese Strecken ein erhebliches Einsparungspotential dar.

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,90	14,8	00:21	29,3
	0,93	14,5	00:21	30,4
1	1,25	14,8	00:20	29,7
	1,28	14,8	00:18	31,5
5	2,48	15,4	00:17	33,0
	2,49	15,6	00:17	33,8
10	3,93	15,8	00:17	34,2
	3,94	16,0	00:17	35,1

Tabelle 4.3: Absolute Werte von Anfragen mit typisch verteilten kürzesten Distanzen (differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch jeweils ohne Höhen). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

Die absoluten Werte aus Tabelle 4.3 belegen, dass für die meisten Anfragen mit typischer Distanzverteilung kaum ein nennenswerter Unterschied besteht. So weicht das Mittel über die Kosten aller betrachteten Anfragen um maximal 3 Cent ab. Auch die Distanzen und Fahrtzeiten sind durchschnittlich beinahe identisch.

b) Langstrecken

Wenn man nun Routen mit längeren Distanzen vergleicht, ergibt sich ein anderes Bild. Tabelle 4.4 enthält die relativen Differenzen für Anfragen, welche Langstrecken entsprechen. Auffallend ist zunächst, dass bei einem Stundenlohn von bis zu einem Euro die entstehenden Routen sich beinahe alle unterscheiden. Bei einer durchschnittlichen kürzesten Distanz von 300 km gibt es für einen Weg zwischen zwei Orten meist einige Alternativen.

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	0,0	7,081 (12,279)	-2,682	-8,359	7,081
1	0,0	5,592 (9,647)	0,909	-30,765	14,753
5	35,4	0,510 (1,660)	2,091	-3,890	3,969
10	64,2	0,117 (0,363)	1,053	-0,937	1,616

Tabelle 4.4: Relative Differenzen von Anfragen mit langen kürzesten Distanzen (differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch jeweils ohne Höhen).

Bei einem Stundenlohn von 0 bzw. 1 € können 7,1 bzw. 5,6 % Kosten nach dem Modell mit differenzierten Verbrauchswerten gespart werden, indem explizit nach diesem Modell optimiert wird. Diese Ersparnis geht aber mit einem extremen Mehraufwand an Fahrtzeit einher. Dies liegt daran, dass bei von der Network Class abhängigen Verbrauchswerten, der Energieverbrauch für Autobahnen und Kraftfahrstraßen am höchsten ist und diese daher vermieden werden, obwohl dort die höchsten Geschwindigkeiten erlaubt sind. So führt die Route von Karlsruhe nach München unter

Verwendung von einheitlichen Verbrauchswerten über die A 8, da dies der kürzeste Weg zwischen den Orten ist. Bei differenzierten Verbrauchswerten wird auf parallele Bundes- und Landstraßen ausgewichen, was eine deutlich höhere Fahrtzeit zur Folge hat aber zu einem niedrigeren Energieverbrauch im Modell mit differenzierten Verbrauchswerten führt. Konkrete Zahlen zu den Kosten einer Fahrt abhängig von der Network Class sind in Tabelle 4.1 enthalten.

Erwähnenswert sind zudem die Durchschnittswerte der relativen Differenzen für Energie. So zeigen Werte zwischen 1,61 und 14,75 % ein erhebliches Einsparungspotential an Kraftstoff durch eine explizite Optimierung nach dem Modell mit differenzierten Verbrauchswerten.

Tabelle 4.5 verdeutlicht anhand der absoluten durchschnittlichen Werte für Kosten, Distanz, Fahrtzeit und Energieverbrauch die Unterschiede zwischen den optimalen Routen der beiden Modelle, wobei alle Routen nach dem Modell mit differenzierten Verbrauchswerten bewertet werden. So beträgt die Differenz der durchschnittlichen Kosten je nach Stundenlohn teilweise über einen Euro. Es kann also einiges an Kosten eingespart werden indem explizit nach dem Modell mit differenzierten Verbrauchswerten optimiert wird.

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	17,94	308,7	06:40	587,4
	19,36	300,3	06:05	633,7
1	24,30	307,9	05:49	604,7
	25,77	310,8	03:58	713,3
5	40,81	322,0	03:32	757,4
	41,02	329,1	03:22	789,8
10	57,88	331,3	03:21	795,7
	57,95	335,1	03:19	809,8

Tabelle 4.5: Absolute Werte von Anfragen mit langen kürzesten Distanzen (differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch jeweils ohne Höhen). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

Die sehr hohe Differenz der durchschnittlichen Fahrtzeiten bei einem Stundenlohn von 1 € erklärt sich dadurch, dass im Modell mit einheitlichem Verbrauchswert aufgrund der Berücksichtigung der Reisezeit Umwege in Kauf genommen werden, um die schnellere, aber aus energetischer Sicht gleich günstige Autobahn zu nutzen. Bei differenzierten Verbrauchswerten lohnen sich diese Umwege bei einem Euro Stundenlohn oftmals noch nicht, da die Zeitersparnis durch den auf der Autobahn höheren Energieverbrauch aufgehoben wird. Folglich führt die Route relativ direkt über Bundes- und Landstraßen, welche zu den Network Classes 2 und 3 gehören. Ein Beispiel für dieses Phänomen ist in Abbildung 4.4 zu sehen.

Die optimale Route des Modells mit differenzierten Verbrauchswerten führt relativ direkt aus der Nähe von Enschede an einen Ort nordwestlich von Koblenz. Die optimale Route unter Verwendung von einem einheitlichen Wert für alle Straßenkategorien nutzt diverse Autobahnen. An Kosten können in diesem Beispiel mit 0,67 € gute 3,2 % nach dem Modell mit differenziertem Verbrauch gespart werden. Jedoch muss mit einer Fahrtzeit von 5 h 33 min ein zusätzlicher Zeitaufwand von knapp 3 h 20 min in Kauf genommen werden, dafür dass mit 130,7 MJ etwa 21,6 % Energie gespart werden kann.



Abbildung 4.4: Zwei unterschiedliche Routen aus der Umgebung von Enschede zu einem Ort nordwestlich von Koblenz. Die optimale Route nach dem Modell mit einheitlichem Verbrauch für alle Network Classes (blau) führt über diverse Autobahnen. Die nach differenziertem Verbrauch (grün) optimierte Route verläuft relativ direkt über Land- und Bundesstraßen. Als Stundenlohn wird in diesem Beispiel 1 Euro angesetzt.

4.3.3 Differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch (mit Höhen)

Im Folgenden wird wiederum eine Variante des verbrauchs-basierten Modells mit differenzierten Verbrauchswerten einer Variante mit durchschnittlichem Verbrauchswert gegenübergestellt. Anders als in Paragraph 4.3.2 werden jedoch in beiden Modellen Höheninformationen berücksichtigt.

Die betrachteten Anfragen sind dabei Kurzstrecken, welche bei einer Länge von 5 bis 10 km teilweise erhebliche Differenzen aufweisen. Um darüber hinaus auch Strecken mit Höhendifferenzen zu untersuchen, handelt es sich bei dem zweiten Testdatensatz dieses Vergleichs um mittellange Strecken im Schwarzwald. Anhang A enthält weitere Resultate.

a) Kurzstrecken

Tabelle 4.6 enthält Ergebnisse des Vergleichs der beiden Modelle für Kurzstrecken. Die kürzesten Distanzen der Anfragen sind also gleichverteilt zwischen fünf und zehn Kilometer.

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	53,7	1,336 (4,520)	-0,855	2,905	1,336
1	69,5	0,593 (2,402)	-0,922	0,949	0,400
5	88,2	0,097 (0,068)	-0,408	0,107	0,028
10	92,3	0,039 (0,000)	-0,171	-0,005	0,111

Tabelle 4.6: Relative Differenzen von Anfragen, die für Kurzstrecken stehen (differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch jeweils mit Höhen).

Im Allgemeinen fällt, wie auch die Werte aus Tabelle 4.7 zeigen, die Kostenersparnis durch eine explizite Optimierung unter der Verwendung von differenzierten Verbrauchswerten relativ gering aus. Wenn man aber den hohen Anteil an identischen Routen berücksichtigt, so sind die durchschnittlichen Differenzen durchaus beachtlich. Es existieren außerdem durchaus Beispiele, bei denen über 5 % der anfallenden Kosten nach dem Modell mit differenzierten Verbrauchswerten gespart werden können.

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,52	7,6	00:12	16,9
	0,52	7,5	00:12	17,1
1	0,72	7,6	00:12	16,9
	0,72	7,6	00:12	17,0
5	1,51	7,8	00:11	17,2
	1,51	7,7	00:11	17,2
10	2,49	7,8	00:11	17,3
	2,49	7,8	00:11	17,4

Tabelle 4.7: Absolute Werte von Anfragen, die für Kurzstrecken stehen (differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch jeweils mit Höhen). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

Die Unterschiede liegen in ähnlichen Größenordnungen wie im Vergleich ohne Berücksichtigung von Höhendaten und haben den gleichen Hintergrund. Auch wenn Höhendaten mit in die Berechnung einfließen führt die Verwendung von differenzierten Verbrauchswerten oft zu einer Vermeidung von Autobahnen. Analog zu dem genannten Beispiel in Abbildung 4.4 findet man unter den betrachteten Kurzstrecken Anfragen, die bei differenziertem Verbrauch zu relativ direkt verlaufenden Wegen und zu Umwegen durch die Nutzung von Autobahnen bei durchschnittlichem Verbrauchswert führen.

b) Mittellange Strecken im Schwarzwald

Tabelle 4.8 zeigt die Resultate eines Vergleichs der beiden Modelle für mittellange Strecken im Schwarzwald.

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	6,3	2,745 (6,591)	-1,293	5,448	2,745
1	24,1	1,413 (4,213)	-1,235	0,194	1,649
5	58,3	0,438 (1,490)	0,211	-0,722	1,709
10	75,4	0,150 (0,386)	0,505	-0,439	1,374

Tabelle 4.8: Relative Differenzen von Anfragen, die mittellange Strecken im Schwarzwald repräsentieren (differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch jeweils mit Höhen).

Bei einem Stundenlohn von 0€ beträgt der Mittelwert der relativen Differenzen knapp 2,75 % bezüglich der Kosten sowie des Energieverbrauchs und 5,45 % bezüglich der Fahrtzeit. Die Werte erklären sich dadurch, dass die Routen nach einheitlichem Verbrauch oftmals über Segmente der Network Class 4 bzw. 5 führen wohingegen nach differenziertem Verbrauch die nächstgelegene größere Bundes- oder Landstraße (NC 2 bzw. 3) gewählt wird. Dadurch wird sowohl weniger Zeit als auch Energie benötigt.

Bei höheren Stundenlöhnen ab 5€ ist die Fahrtzeit der nach differenzierten Verbrauchswerten optimierten Routen im Durchschnitt länger, aber die zurückgelegte Distanz kürzer. Dies liegt daran, dass ab einer gewissen Priorisierung der Zeit die Routen mit durchschnittlichem Verbrauchswert über Autobahnen führen, obwohl hierfür gewisse Umwege gemacht werden müssen. Wenn man solche Routen im Modell mit differenzierten Verbrauchswerten betrachtet, so fällt auf, dass der Zeitgewinn durch den auf der Autobahn höheren Energieverbrauch egalisiert wird. Daher lohnt sich im Modell mit differenzierten Verbrauchswerten oftmals der direktere aber langsamere Weg über Bundes- und Landstraßen.

Ein Beispiel hierfür ist eine Route von Pforzheim in die Nähe von Gärtringen (Landkreis Böblingen) bei einem Stundenlohn von 10€, welche in Abbildung 4.5 dargestellt ist. Unter der Verwendung von einem einheitlichen Energieverbrauchswert für alle Straßenkategorien führt der Weg über die A 8 sowie die A 81, da hier die rechnerische Geschwindigkeit am höchsten ist. Die optimale Route nach dem Modell mit differenzierten Verbrauchswerten verläuft trotz Berücksichtigung von Höhendaten über diverse Bundesstraßen direkt durch den Schwarzwald. Trotz einer um knapp 13 Minuten längeren Fahrtzeit werden nach dem Modell mit differenzierten Verbrauchswerten mit 0,54€ knapp 4,2 % der Kosten eingespart. Die Distanz wird um 26,3 km verkürzt. Bei diesen Differenzen ist für einen Berufspendler die langsamere Route auf jeden Fall eine Option. Damit können bei 10 Fahrten in einer Woche immerhin 5,40€ gespart werden.

Tabelle 4.9 stellt die absoluten durchschnittlichen Werte des Vergleichs dar. Die Differenzen scheinen relativ bedeutungslos. Man muss aber auch beachten, dass diese pro gefahrener Route auftreten und Mittelwerte darstellen. Bei einzelnen Routen ist durchaus eine Ersparnis im Bereich von 0,50€ bei einer Streckenlänge von maximal 40 km möglich, dadurch das explizit nach differenzierten Verbrauchswerten optimiert wird.

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	2,06	30,7	00:42	67,5
	2,12	30,3	00:45	69,5
1	2,76	30,8	00:41	67,8
	2,80	30,4	00:41	69,1
5	5,42	31,8	00:38	71,8
	5,45	31,9	00:38	73,4
10	8,62	32,7	00:38	74,6
	8,63	32,9	00:37	76,0

Tabelle 4.9: Absolute Werte von Anfragen mittellanger Strecken im Schwarzwald (differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch jeweils mit Höhen). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

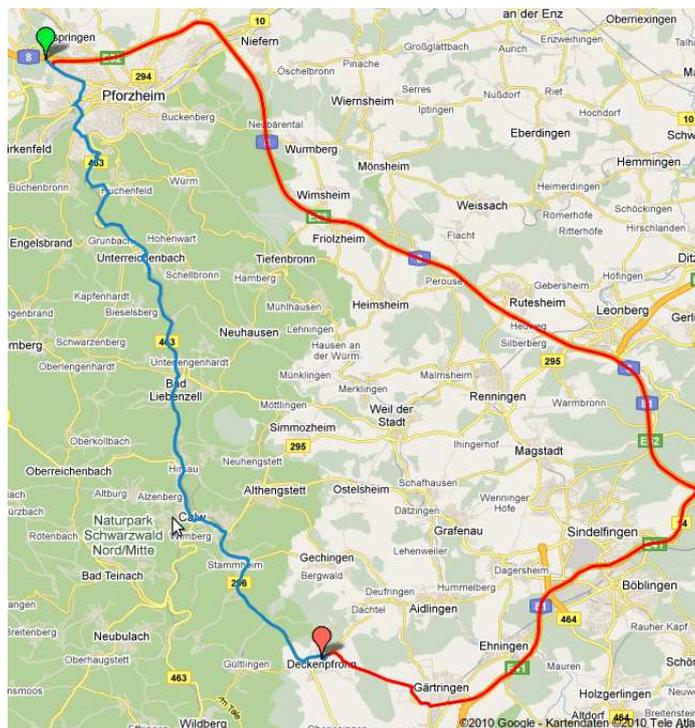


Abbildung 4.5: Zwei Routen von Pforzheim in den Landkreis Böblingen bei einem Stundenlohn von 10 Euro. Die Route, welche mit einheitlichem Verbrauchswert (rot) berechnet wurde, führt über die A 8 sowie die A 81. Bei Verwendung von differenzierten Verbrauchswerten (hellblau) wird ein relativ direkter Weg durch den Schwarzwald gewählt. Dadurch können über 26 km Distanz bei einer um etwa 13 Minuten längeren Fahrtzeit eingespart werden. Mit 0,54€ werden zudem knapp 4,2 % der Kosten durch einen geringeren Energieverbrauch eingespart.

4.3.4 Mit vs. ohne Höhen (differenzierter Verbrauch)

Der folgende Vergleich soll den Effekt von Höheninformationen im verbrauchsbasierten Modell aufzeigen. Es werden zwei Varianten des verbrauchsbasierten Ansatzes gegenübergestellt, wobei bei beiden differenzierte Verbrauchswerte zum Einsatz kommen. Die Längsneigungskorrekturfaktoren werden bei einem Modell abhängig von der Straßenkategorie verwendet, bei dem zweiten Modell wird der Wert konstant auf 1,0 gesetzt, also Steigungen und Gefälle außer Acht gelassen.

Im Folgenden werden mittellange Strecken betrachtet. Dabei handelt es sich zunächst um deutschlandweite Anfragen und anschließend um Anfragen im Schwarzwald. Mit dieser Wahl der Testdatensätze soll untersucht werden, ob der Effekt von Höhendaten in dem größten zusammenhängenden Mittelgebirge Deutschlands größer als im Rest der Bundesrepublik ausfällt. Die Resultate für die restlichen Testdatensätze sind in Anhang A zu finden.

a) Mittellange Strecken

Tabelle 4.10 enthält die Mittelwerte der relativen Differenzen über 1000 Anfragen, die für mittellange Strecken stehen. Die kürzesten Distanzen sind also zwischen 20 und 40 km gleichverteilt. Die Anfragen sind über ganz Deutschland verstreut.

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	50,8	0,281 (0,831)	-0,096	-0,381	0,281
1	65,4	0,139 (0,441)	-0,046	-0,476	0,345
5	86,1	0,029 (0,021)	0,195	-0,234	0,391
10	91,5	0,012 (0,000)	0,186	-0,129	0,329

Tabelle 4.10: Relative Differenzen von Anfragen, die mittellange Strecken repräsentieren (mit vs. ohne Höhen jeweils mit differenzierten Verbrauchswerten).

Der Anteil an identischen Routen zeigt, dass es einen Unterschied machen kann, ob bei der Optimierung Höheninformationen berücksichtigt werden oder nicht. Dennoch fallen die relativen Differenzen eher gering aus. Selbst die 90%-Quantile der Kostendifferenzen liegen unabhängig vom Stundenlohn deutlich unter einem Prozent.

Die Werte in Tabelle 4.11 bestätigen das bisher erhaltene Bild. Die durchschnittlichen Größen der entstehenden Routen wie Kosten, Distanz, Zeit oder Energie unterscheiden sich kaum. Die Durchschnittswerte weichen um maximal einen Cent, 100 Meter oder 0,3 MJ ab. Die Werte für die Fahrtzeit stimmen sogar im Minutenbereich überein.

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,98	30,8	00:44	64,9
	1,99	30,8	00:44	65,1
1	2,70	30,9	00:41	65,6
	2,70	30,9	00:41	65,9
5	5,28	32,0	00:37	70,8
	5,28	32,1	00:37	71,2
10	8,35	33,0	00:36	74,1
	8,36	33,1	00:36	74,4

Tabelle 4.11: Absolute Werte von Anfragen, die mittellange Strecken repräsentieren (mit vs. ohne Höhen jeweils mit differenzierten Verbrauchswerten). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

Insgesamt hat es den Anschein als ob sich eine Berücksichtigung der Höhendaten im verbrauchs-basierten Modell mit differenzierten Verbrauchswerten nicht lohnen würde.

b) Mittellange Strecken im Schwarzwald mit großen Höhendifferenzen

Auch bei Strecken mittlerer Länge im Schwarzwald wirkt sich eine Berücksichtigung von Höheninformationen nach Tabelle 4.12 kaum aus, auch wenn die Differenzen immerhin größer als bei deutschlandweiten Strecken ausfallen. Ferner zeigen die angegebenen Quantile, dass für ein Zehntel der Strecken die Kostendifferenz bei einem Stundenlohn von 0€ größer als 1,75 % ist. Die Auswirkungen auf den Routenverlauf können nicht einheitlich beschrieben werden. Es gibt Anfragen, bei denen die Berücksichtigung von Höheninformationen dazu führt, dass statt Bundesstraßen nun Landstraßen genutzt werden. Aber auch eine Verschiebung in die andere Richtung kann der Fall sein, d.h. es wird bei einzelnen Anfragen nun die Autobahn statt der Bundesstraße genutzt, da diese weniger Steigungen aufweist.

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	23,4	0,633 (1,756)	-0,350	-1,552	0,633
1	47,8	0,298 (0,897)	-0,126	-0,643	0,571
5	80,1	0,053 (0,089)	0,058	-0,048	0,195
10	87,7	0,021 (0,017)	-0,057	0,013	0,062

Tabelle 4.12: Relative Differenzen von Anfragen, die mittellange Strecken im Schwarzwald repräsentieren (mit vs. ohne Höhen jeweils mit differenzierten Verbrauchswerten). Die kürzesten Wege weisen mindestens 750 Höhenmeter auf.

Die Mittelwerte der absoluten Werte für mittellange Strecken im Schwarzwald weichen, wie Tabelle 4.13 zeigt, kaum voneinander ab. Im Durchschnitt macht es auch bei diesen Anfragen nicht wirklich einen Unterschied ob bei der Optimierung Höheninformationen außen vor gelassen werden oder nicht.

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	2,37	30,7	00:43	77,7
	2,39	30,6	00:42	78,2
1	3,09	30,8	00:42	78,0
	3,10	30,7	00:42	78,5
5	5,87	31,2	00:41	79,6
	5,87	31,2	00:41	79,8
10	9,29	31,7	00:40	80,8
	9,29	31,6	00:40	80,8

Tabelle 4.13: Absolute Werte von Anfragen mittellanger Strecken im Schwarzwald, deren kürzesten Wege mindestens 750 Höhenmeter aufweisen (mit vs. ohne Höhen jeweils mit differenzierten Verbrauchswerten). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

Die bisherigen Ergebnisse führen zu der Schlussfolgerung, dass sich eine Berücksichtigung von Höheninformationen im verbrauchsbasierten Modell nicht lohnt. Diese Aussage ist sicherlich für einen Großteil möglicher Anfragen korrekt. Abbildung 4.6 zeigt jedoch ein Beispiel, bei dem die Berücksichtigung von Höheninformationen bei der Optimierung zu einem deutlich anderen Routenverlauf führt. Dabei wird ausschließlich nach Energieverbrauch optimiert, d.h. der Stundenlohn beträgt 0€. Durch eine explizite Optimierung mit Höhendaten können knapp 3,2 % Energie eingespart werden. Dies entspricht einer Einsparung von 0,59€, wobei gerade einmal zwei Minuten mehr Fahrtzeit investiert werden muss.

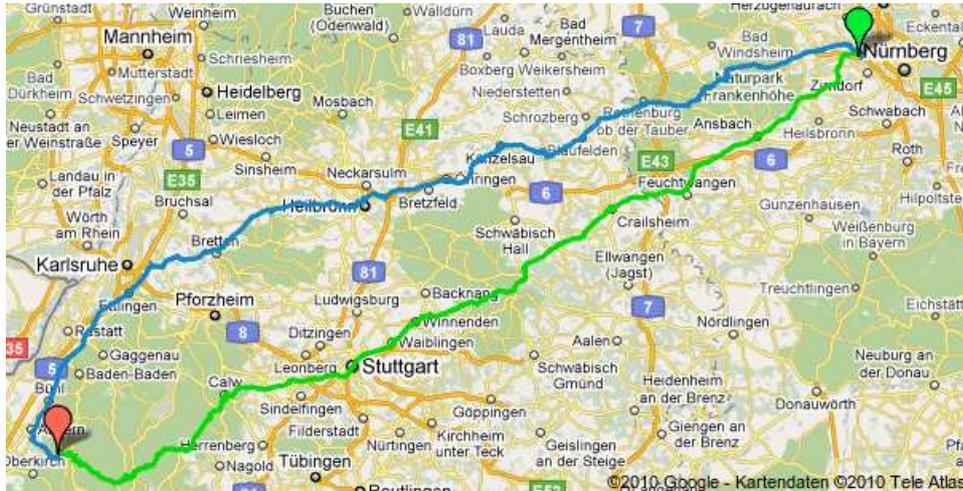


Abbildung 4.6: Aus der Nähe von Nürnberg in den Westen des Schwarzwalds. Die Route ohne Berücksichtigung von Höheninformationen (grün) führt mitten durch den Schwarzwald. Werden Steigungen und Gefälle bei der Optimierung mit einberechnet (hellblau), dann verläuft der Fahrtweg am westlichen und nördlichen Rand des Schwarzwalds entlang. In diesem Beispiel wird ausschließlich nach Energieverbrauch optimiert, was einem Stundenlohn von 0€ entspricht.

Dieses Beispiel zeigt, dass die Berücksichtigung von Höheninformationen einen Einfluss auf den Routenverlauf haben kann. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn eines der zahlreichen, deutschen Mittelgebirge auf dem Weg liegt.

4.3.5 Fazit

Wie die obigen Ergebnisse (Paragraph 4.3.2 und 4.3.3) zeigen, hat die Wahl der Verbrauchswerte einen großen Einfluss auf den Routenverlauf. Die Verwendung von differenzierten Verbrauchswerten führt in vielen Fällen zu einer Vermeidung von Autobahnen sowie Schnellstraßen, da diese den höchsten Verbrauch aufweisen. Da Bundes- und Landstraßen im verbrauchsbasierten Modell mit differenzierten Verbrauchswerten aus energetischer Sicht am günstigsten sind, werden darüber hinaus auch kleinere Ortschaften sowie Wohngebiete umfahren.

Es hat den Anschein als ob bei der Verwendung von differenzierten Werten Straßensegmente der Network Classes 0 bzw. 1 zu sehr vermieden werden. Dieser Effekt kann durch eine detaillierte Differenzierung abgeschwächt oder sogar behoben werden. Das Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [HBEFA] bietet beispielsweise für jede Straßenkategorie geschwindigkeitsabhängige Verkehrssituationen, so dass an dieser Stelle eine genauere Unterscheidung möglich ist.

Die Berücksichtigung von Höheninformationen (Paragraph 4.3.4) hat bei einem Großteil der Anfragen kaum einen Effekt. Wenn man jedoch Routen betrachtet, die im Schwarzwald oder einem anderen deutschen Mittelgebirge liegen, so fallen die Differenzen sehr viel deutlicher aus und es können auch Beispiele (siehe Abbildung 4.6) gefunden werden, die ein deutliches Einsparungspotential aufweisen.

Auch wenn das Modell noch Schwächen aufweist, so zeigt es, dass mit relativ einfachen Mitteln einiges in Richtung energieeffizienter Routen erreicht werden kann. Darüber hinaus ist es möglich das Modell mit wenig Aufwand auf andere Fahrzeugkategorien zu übertragen, da mit dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [HBEFA] eine große Datenbasis die Grundlage des Ansatzes bildet.

4.4 Physikalischer Ansatz

4.4.1 Allgemeines

In dem in Abschnitt 3.2 vorgestellten Ansatz wird der Energieverbrauch auf Basis von physikalischen Grundlagen bestimmt. Dabei wird der Rollwiderstand sowie der Luftwiderstand berücksichtigt. Da die Geschwindigkeit mit in die Berechnung eingeht werden pro Network Class mindestens acht verschiedene Verbrauchswerte eingesetzt.

Wie Abbildung 3.6 zeigt ist der Energieverbrauch bei einer Geschwindigkeit von 65 km/h in der Ebene am geringsten. Tabelle 4.14 enthält die Kosten einer Fahrt von 10 km Distanz für verschiedene Geschwindigkeiten abhängig vom Stundenlohn.

v \ Lohn	0 Euro	1 Euro	5 Euro	10 Euro
30	0,87	1,20	2,54	4,20
50	0,52	0,72	1,52	2,52
70	0,40	0,55	1,12	1,83
100	0,48	0,58	0,98	1,48
135	0,65	0,72	1,02	1,39

Tabelle 4.14: Kosten im physikalischen Modell für eine 10 km lange Fahrt bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Stundenlöhnen

Die Werte in Tabelle 4.14 zeigen, dass erst ab einem Stundenlohn von 10€ die schnellste Geschwindigkeit auch die günstigste ist. Bei geringeren Stundenlöhnen ist der Einfluss des Energieverbrauchs auf die Gesamtkosten noch groß genug, so dass sich langsamer fahren aus Sicht der Kosten lohnt.

a) Höhendaten

Eine Variationsmöglichkeit beim physikalischen Modell ist wie auch beim verbrauchsbasierten Ansatz die Berücksichtigung von Höhendaten. In diesem Fall kommt zum Gesamtfahrwiderstand, der den Energiebedarf bestimmt, noch der Steigungswiderstand hinzu. Die Auswirkungen von Höheninformationen bei der Optimierung auf den Routenverlauf werden in Paragraph 4.4.2 betrachtet.

b) Rekuperation

Durch die Berücksichtigung des Steigungswiderstands kann der berechnete Energiebedarf aufgrund von Gefällen negativ werden. Ob die Energie in einem solchen Fall zurückgewonnen oder vollständig in Wärme durch einen Bremsvorgang umgewandelt wird, stellt eine weitere Variationsmöglichkeit im physikalischen Modell dar. Ob eine explizite Optimierung mit Rekuperation lohnenswert ist, wird in Abschnitt 4.4.3 untersucht.

4.4.2 Mit vs. ohne Höhen

Der Effekt von Höhendaten im verbrauchsbasierten Modell fällt, wie die Ergebnisse in Paragraph 4.3.4 zeigen, bei den meisten Anfragen eher gering aus. In diesem Abschnitt soll nun untersucht werden, welchen Einfluss Höheninformationen im physikalischen Modell haben.

Die Grundlage dieses Vergleichs bilden sehr kurze Stadtstrecken, welche auffällig hohe relative Differenzen aufweisen, sowie mittellange Strecken im Schwarzwald. Letztere zeichnen sich durch einen für die durchschnittliche Streckenlänge verhältnismäßig geringen Anteil an identischen Routenverläufen bei niedrigen Stundenlöhnen aus und stehen zudem stellvertretend für Anfragen, die in einem deutschen Mittelgebirge liegen. Werte zu den restlichen Testdatensätzen sind in Anhang A zu finden.

a) Sehr kurze Stadtstrecken

Tabelle 4.15 enthält die relativen Differenzen für sehr kurze Strecken, welche entweder in einem Bebauungsgebiet beginnen oder dort enden. Angesichts des hohen Anteils an identischen Routen von mindestens 65 % ist die Höhe der durchschnittlichen Differenzen beachtlich.

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	65,8	2,341 (7,188)	-0,611	-1,979	2,341
1	73,3	1,053 (3,322)	0,021	-1,004	2,149
5	88,3	0,202 (0,142)	0,224	-0,198	1,230
10	92,9	0,070 (0,000)	0,094	-0,060	0,680

Tabelle 4.15: Relative Differenzen von Anfragen, die sehr kurze Strecken repräsentieren (physikalischer Ansatz mit vs. ohne Höhen).

Betrachtet man jedoch einzelne Strecken, so fallen die Unterschiede aufgrund der sehr kurzen Distanz eher gering aus. Auf Satellitenbildern ist häufig der Grund für die unterschiedlichen Routenverläufe nicht erkennbar. Dies liegt daran, dass die absoluten Werte kaum abweichen. Der Durchschnitt über alle Anfragen ist, wie Tabelle 4.16 zeigt, beinahe identisch. Bei diesen geringen Kosten entspricht eine Kostenersparnis von 7,2 %, welche immerhin ein Zehntel der Anfragen bei einem Stundenlohn von 0 € aufweisen, nur sehr wenigen Cent.

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,22	3,2	00:05	7,1
	0,22	3,1	00:05	7,2
1	0,31	3,1	00:05	7,1
	0,31	3,1	00:05	7,2
5	0,68	3,1	00:05	7,1
	0,68	3,1	00:05	7,2
10	1,15	3,1	00:05	7,2
	1,15	3,1	00:05	7,2

Tabelle 4.16: Absolute Werte von Anfragen sehr kurzer Strecken (physikalischer Ansatz mit vs. ohne Höhen). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

b) Mittellange Strecken im Schwarzwald

Die durchschnittlichen relativen Differenzen von mittellangen Strecken im Schwarzwald sind, wie in Tabelle 4.17 zu sehen, bemerkenswert. So können bei einer Optimierung ausschließlich nach Energie durch eine explizite Berücksichtigung von Höheninformationen durchschnittlich knapp 3 % Kraftstoff und damit auch Kosten gespart werden. Dafür muss aber mehr Fahrtzeit investiert werden. Aufgrund von Steigungen und Gefällen werden häufig niedriger priorisierte Strecken mit langsameren Geschwindigkeiten bevorzugt, welche meist zu kürzeren Distanzen und längeren Fahrtzeiten führen.

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	6,6	2,959 (7,747)	1,662	-5,545	2,959
1	22,5	1,240 (3,737)	2,061	-2,724	2,784
5	62,4	0,199 (0,650)	1,270	-0,553	1,468
10	78,2	0,060 (0,134)	0,726	-0,149	0,784

Tabelle 4.17: Relative Differenzen von Anfragen, die mittellange Strecken im Schwarzwald repräsentieren (physikalischer Ansatz mit vs. ohne Höhen).

Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Bei dieser Anfrage im mittleren Teil des Schwarzwalds führt der optimale Weg ohne Berücksichtigung von Höhendaten ein großes Stück über die B 500, welche an dieser Stelle auch als Schwarzwaldhochstraße bekannt ist. Die optimale Route nach dem physikalischen Modell mit Höhen vermeidet Fahrten durch die Höhenlagen des Schwarzwalds soweit möglich. Dadurch kann bei einem Stundenlohn von 1€ knapp 14 % der Kosten und jeweils über 18 % Distanz und Energie eingespart werden. Die berechnete Fahrtzeit ist mit einer Differenz von gerade einmal 24 Sekunden nahezu identisch.



Abbildung 4.7: Durch die explizite Optimierung unter Berücksichtigung von Höheninformationen (blau) wird die Schwarzwaldhochstraße teilweise vermieden. Dadurch können immerhin 0,39€ gespart werden, was knapp 14 % der Gesamtkosten bei einem Stundenlohn von 1€ entspricht.

Auch die absoluten Werte dieses Vergleichs auf Basis mittellanger Strecken im Schwarzwald in Tabelle 4.18 belegen, dass Höheninformationen im physikalischen Modell einen beachtlichen Einfluss haben. So beträgt die Differenz der Durchschnittswerte für den Energieverbrauch mindestens 500 kJ und dies sogar bei einem Stundenlohn von 10€.

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,67	31,1	00:42	54,6
	1,72	31,7	00:40	56,3
1	2,36	31,1	00:40	55,1
	2,39	31,8	00:39	56,8
5	4,96	32,5	00:38	58,1
	4,97	33,0	00:37	59,0
10	8,12	33,3	00:37	59,6
	8,12	33,5	00:37	60,1

Tabelle 4.18: Absolute Werte von Anfragen mittellanger Strecken im Schwarzwald (physikalischer Ansatz mit vs. ohne Höhen). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

4.4.3 Mit vs. ohne Rekuperation

Neben den Höhendaten stellt die Berücksichtigung von Rekuperation eine weitere Variationsmöglichkeit des physikalischen Ansatzes dar. Die Frage, ob sich explizites Optimieren nach dem physikalischen Modell mit Rekuperation im Vergleich zum physikalischen Modell ohne Rekuperation lohnt, sollen die folgenden Daten beantworten.

Hierzu werden Langstrecken betrachtet. Dieser Testdatensatz ist neben zufälligen Anfragen, die in der Realität eher selten vorkommen, der mit den insgesamt größten durchschnittlichen relativen Differenzen in diesem Vergleich. Anhang A enthält die Ergebnisse zu den restlichen Testdatensätzen.

a) Langstrecken

Tabelle 4.19 enthält die absoluten Differenzen für Langstrecken. Es fällt auf, dass die durchschnittlichen Unterschiede bezüglich Energieverbrauch und Kosten deutlich unter einem Prozent liegen. Selbst das größte 90%-Quantil der Kostendifferenzen beträgt gerade einmal 0,162 %. Ferner ist der Anteil an identischen Routen, welcher selbst bei einer Optimierung ausschließlich nach Energieverbrauch 17,5 % beträgt, für Langstrecken sehr hoch.

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	17,5	0,054 (0,162)	-0,171	-1,800	0,054
1	51,5	0,029 (0,109)	0,151	-1,926	0,566
5	89,1	0,001 (0,000)	0,057	-0,056	0,068
10	95,7	0,000 (0,000)	0,012	-0,007	0,010

Tabelle 4.19: Relative Differenzen von Anfragen mit langen kürzesten Distanzen (physikalischer Ansatz mit vs. ohne Rekuperation).

Wie die vorangegangene Tabelle zeigt ergibt sich durch eine Berücksichtigung von Rekuperation während der Optimierung kein zusätzliches Einsparpotential. Tabelle 4.20 bestätigt diesen Eindruck. Die Mittelwerte der Größen Kosten, Distanz, Zeit sowie Energieverbrauch unterscheiden sich, obwohl Langstrecken mit einer kürzesten Distanz von 200 bis 400 Kilometern dem Vergleich zu Grunde liegen, kaum.

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	15,66	315,0	05:50	512,7
	15,67	314,4	05:43	513,0
1	20,62	313,0	04:16	535,3
	20,62	313,5	04:10	538,4
5	35,09	329,1	03:23	593,8
	35,10	329,3	03:23	594,3
10	51,83	335,4	03:19	609,3
	51,83	335,4	03:19	609,4

Tabelle 4.20: Absolute Werte von Anfragen mit langen kürzesten Distanzen (physikalischer Ansatz mit vs. ohne Rekuperation). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnittswerte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

Auch wenn im Allgemeinen die Berücksichtigung von Rekuperation bei der Optimierung keinen Einfluss auf die Ergebnisse zu haben scheint, gibt es interessante Beispiele, welche eine klare Differenz aufweisen. Abbildung 4.8 zeigt eine Anfrage im Schwarzwald, bei der aufgrund von Energierückgewinnung die Fahrt durch Höhenlagen des Schwarzwalds selbst bei einem Stundenlohn von 10 € am günstigsten ist. Ohne Berücksichtigung von Rekuperation führt die Route unterdessen über die A 5.

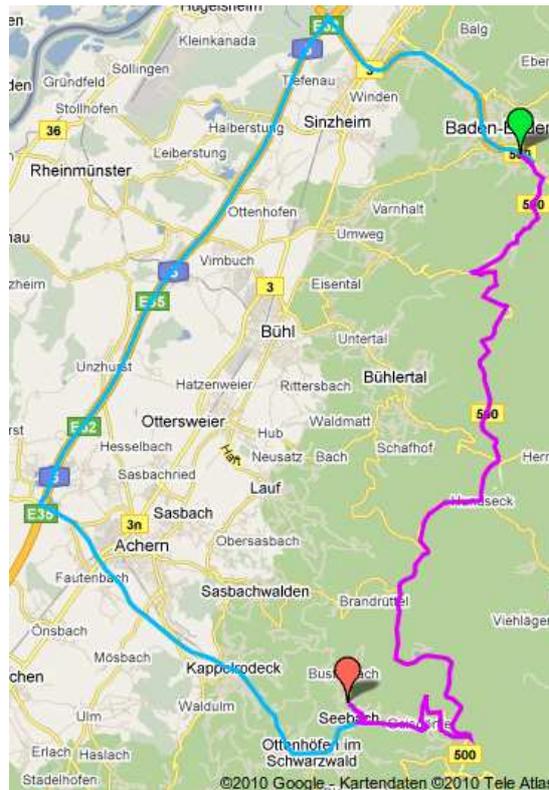


Abbildung 4.8: Wird bei dieser Anfrage im Schwarzwald Rekuperation bei der Optimierung mit berücksichtigt, so führt der Weg selbst bei einem Stundenlohn von 10 € über die Schwarzwaldhochstraße (magenta) und damit durch Höhenlagen des Schwarzwalds statt über die A 5 (blau). Die Energieeinsparung beträgt beachtliche 24 %.

Der Unterschied der beiden Routen in Abbildung 4.8 fällt bei den Kosten mit etwa 0,9 %, was etwa 0,10€ entspricht, marginal aus. Das Energieeinsparungspotential ist jedoch mit rund 24 % beachtlich. Durch einen zusätzlichen Zeitaufwand von dreieinhalb Minuten kann etwa ein halber Liter Diesel eingespart werden.

4.4.4 Fazit

Im Vergleich zum verbrauchsbasierten Modell wirkt sich die Berücksichtigung von Höheninformationen im physikalischen Modell (Paragraph 4.4.2) deutlicher aus. Sogar bei sehr kurzen Strecken sind die relativen Differenzen bemerkenswert auch wenn die von mittellangen Strecken im Schwarzwald höher ausfallen. Wenn Höhenunterschiede bei der Optimierung mit einfließen, können nach dem physikalischen Modell mit Höhen sowohl Kosten als auch Energie eingespart werden. So wird beispielsweise von einer Vermeidung der Höhenlagen des Schwarzwalds profitiert (vgl. Abbildung 4.7).

Eine explizite Optimierung nach dem physikalischen Modell mit Rekuperation (Paragraph 4.4.3) lohnt sich hingegen im Allgemeinen nicht. Die relativen Differenzen bezüglich Kosten und Energie liegen allesamt unabhängig vom gewählten Testdatensatz und betrachteten Stundenlohn sehr deutlich unterhalb von einem Prozent. Jedoch gibt es auch hier ein Beispiel im Schwarzwald, in dem die Höhenlagen nur aufgrund der Berücksichtigung von Rekuperation nicht umfahren werden (vgl. Abbildung 4.8).

Die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse hängen jedoch sehr stark von der gewählten Modellierung und den verwendeten Eingabedaten ab. So können schon marginale Änderungen beispielsweise im Bereich der Wirkungsgrade zu deutlich anderen Werten bezüglich des Energieverbrauchs führen. Des Weiteren spielt die gefahrene Geschwindigkeit eine entscheidende Rolle, so dass die rechnerische Geschwindigkeit aus den Kartendaten einen großen Einfluss auf den berechneten Energiebedarf hat. Diese ist aber so gewählt, dass vor allem die Fahrzeit der Routen mit der Realität übereinstimmt.

Wie nah das Modell an der Realität liegt, kann nur mithilfe von aufwendigen Testfahrten auf geeignet gewählten Strecken ermittelt werden. Diese können anschließend auch einer Kalibrierung und somit einer Verbesserung des Modells dienen.

4.5 Effekt von reduzierten Geschwindigkeiten im physikalischen Modell

Im Folgenden soll untersucht werden, wie sich eine Reduzierung der Geschwindigkeit auf den Routenverlauf und die benötigte Energie sowie die entstehenden Kosten auswirkt. Die Basis hierfür bildet das physikalische Modell ohne Berücksichtigung von Höheninformationen.

4.5.1 Optimale Geschwindigkeit

Zunächst wird abhängig vom Stundenlohn eine kostenoptimale Geschwindigkeit bestimmt. Dafür wird die Geschwindigkeit in 5-km/h-Schritten variiert und die Kosten für eine Fahrt in der Ebene über eine feste Distanz abhängig vom Stundenlohn berechnet. Dabei kommt Gleichung 4.1 zum Einsatz. Die Energiekosten ergeben sich aus dem Verbrauch nach Gleichung 3.7 (mit $\alpha = 0$) und dem verwendeten Kraftstoffpreis für einen Liter Diesel von 1,09€. Der Anteil der Lohnkosten ergibt sich aus der Fahrzeit und der Bezahlung des Fahrers. Die Länge der Fahrt geht linear in die Gesamtkosten ein und hat daher keinen Einfluss auf die resultierenden optimalen Geschwindigkeiten.

Das Ergebnis der Berechnung ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Bezüglich des Energieverbrauchs ist bei der hier verwendeten Modellierung eine Geschwindigkeit von 65 km/h optimal. Ferner wird deutlich, dass bei einem realistischen Stundenlohn ab 10€ relativ hohe Geschwindigkeiten am günstigsten sind. Bei einem Stundenlohn von 10€ sind beispielsweise 135 km/h optimal. Die

Höchstgeschwindigkeit von 215 km/h führt ab einem Stundenlohn von 71,61 € zu den geringsten Kosten.

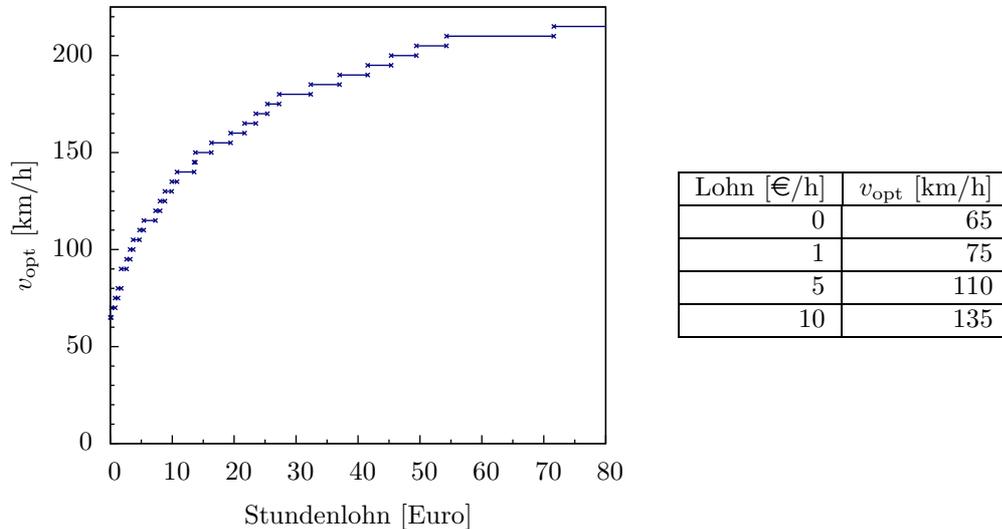


Abbildung 4.9: Optimale Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Stundenlohn

An dieser Stelle sei explizit darauf hingewiesen, dass die ermittelten Werte nur bezüglich der verwendeten Modellierung mit den gewählten Parametern optimal sind. Schon kleine Änderungen an den Eingabegrößen wie Motorwirkungsgrad oder Fahrzeugmasse können zu deutlich anderen Ergebnissen führen.

4.5.2 Methodik

Die Methodik ist sehr ähnlich zu der in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen. Da aber die Berechnung des Energieverbrauchs bei beiden Modellen auf Basis der gleichen Variante des physikalischen Ansatzes erfolgt, ergeben sich einige Änderungen, die im Folgenden beschrieben werden.

Für die Untersuchung, welchen Effekt beschränkte Geschwindigkeiten auf die Gesamtkosten haben, werden optimale Routen nach dem physikalischen Modell ohne Berücksichtigung von Höhen- und Daten für die Stundenlöhne 0, 1, 5 und 10 Euro bestimmt. Diese werden mit Routen verglichen, bei denen die Höchstgeschwindigkeit bereits während der Optimierung auf den jeweiligen Wert nach Abbildung 4.9 abhängig vom Stundenlohn beschränkt wird. Für einen Stundenlohn von 10 € besteht allerdings kein Unterschied, da die Maximalgeschwindigkeit, wie in Tabelle 2.2 angegeben, standardmäßig 135 km/h beträgt.

4.5.3 Semantik des Vergleichs sowie der Tabellen

Die in Paragraph 4.5.4 präsentierten Tabellen enthalten die Werte für die Betrachtung des physikalischen Modells in der Ebene mit versus ohne Geschwindigkeitsbegrenzung. Wie bei den vorangegangenen Vergleichen werden sowohl relative Differenzen als auch absolute Durchschnittswerte für Kosten, Distanz, Zeit und Energieverbrauch betrachtet. Die relativen Differenzen sind jedoch auf andere Art und Weise definiert. Definition 4 unterscheidet sich von Definition 3 darin, dass keine Bewertung des optimalen Pfades in Modell B nach Modell A erfolgt, sondern stattdessen die Werte von Modell B verwendet werden.

Definition 4 (Relative Differenz – mit versus ohne Geschwindigkeitsbegrenzung):

Gegeben sei eine s - t -Anfrage sowie die Zielfunktionen Kosten, Distanz, Zeit und Energieverbrauch. Seien A und B zwei Modelle für die Energieverbrauchsberechnung, welche sich in genau einem Aspekt unterscheiden. Modell A sei in diesem Punkt detaillierter als Modell B . P_A bzw. P_B bezeichne den Pfad, welcher die nach Modell A bzw. B optimale Route von s nach t , repräsentiert. Des Weiteren sei Z_A bzw. Z_B eine Zielfunktion nach Modell A bzw. B . Dann bezeichne

$$\Delta_{\text{relativ,Z,v}} = \begin{cases} 1 - \frac{Z_A(P_A)}{Z_B(P_B)} & , \text{ falls } Z_A(P_A) \leq Z_B(P_B) \\ \frac{Z_B(P_B)}{Z_A(P_A)} - 1 & , \text{ sonst} \end{cases}$$

die *relative Differenz* von Modell A und Modell B der s - t -Anfrage bezüglich der Zielfunktion Z .

Durch diese Definition wird nicht das Potential einer expliziten Optimierung mit begrenzten Geschwindigkeiten (Modell A) veranschaulicht, sondern das Potential der Routen selbst. Die Basis für die Berechnung des Energieverbrauchs ist mit dem physikalischen Ansatz ein einziges Modell. Damit stellt diese Definition kein Problem dar, da die Werte auf gleiche Art und Weise berechnet werden.

4.5.4 Ergebnisse

Basis für den folgenden Vergleich sind Strecken mittellanger sowie langer Distanz. Bei beiden Testdatensätzen ist ein sehr deutlicher Effekt der stundenlohnabhängigen Maximalgeschwindigkeiten zu erkennen, so dass eine nähere Betrachtung lohnenswert scheint. Die Resultate für die übrigen Testdatensätze sind in Anhang A zusammengestellt.

a) Mittellange Strecken

Die Tabellen 4.21 und 4.22 zeigen die Resultate des Vergleichs für Strecken, deren kürzesten Distanzen zwischen 20 und 40 km gleichverteilt sind. Die Werte für einen Stundenlohn von 10 € sind nicht in den Tabellen enthalten, da hier wie bereits erwähnt die optimale gleich der standardmäßigen maximalen Geschwindigkeit ist und daher keine Unterschiede auftreten.

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	71,3	4,483 (13,801)	-1,866	-5,242	4,483
1	81,6	2,555 (8,153)	-1,240	-4,527	4,575
5	98,8	0,173 (0,528)	-0,143	-1,285	1,962

Tabelle 4.21: Mittelwerte der relativen Differenzen nach Definition 4 von Anfragen, die mittellange Strecken repräsentieren (physikalischer Ansatz mit vs. ohne Geschwindigkeitsbeschränkung).

Auffällig ist der hohe Anteil an identischen Routen, welcher mindestens 71,3 % beträgt. Im Durchschnitt ist sowohl die Distanz als auch die Fahrtzeit der Routen mit Geschwindigkeitsbeschränkung größer. Der Unterschied in der Fahrtzeit erklärt sich in erster Linie durch die geringere Höchstgeschwindigkeit. Der negative Durchschnitt der relativen Differenzen bezüglich der Distanz ergibt sich dadurch, dass im Modell mit reduzierten Geschwindigkeiten Segmente mit der optimalen Geschwindigkeit bevorzugt werden. Streckenabschnitte mit geringerer rechnerischer Geschwindigkeit, die auf dem direkten Weg von Start zu Ziel liegen, werden hingegen vermieden und stattdessen Umwege auf kostengünstigeren Segmenten in Kauf genommen.

Das Potential zur Energieeinsparung ist sehr beachtlich. So liegen die durchschnittlichen relativen Differenzen zwischen knapp 2 und über 4,5 %. Auch wenn bei einem Stundenlohn von 5€ die meisten Routen identisch verlaufen und mit unter 0,2 % kaum Kosten eingespart werden können, lohnt sich aufgrund von durchschnittlich knapp 2 % Kraftstoffeinsparung eine Reduzierung der maximalen Geschwindigkeit auf 110 statt 135 km/h.

Der Verlauf der Routen und vor allem auch der Unterschied zwischen den Modellen hängt stark vom Stundenlohn ab. Dies zeigt das Beispiel, welches in Abbildung 4.10 illustriert ist.

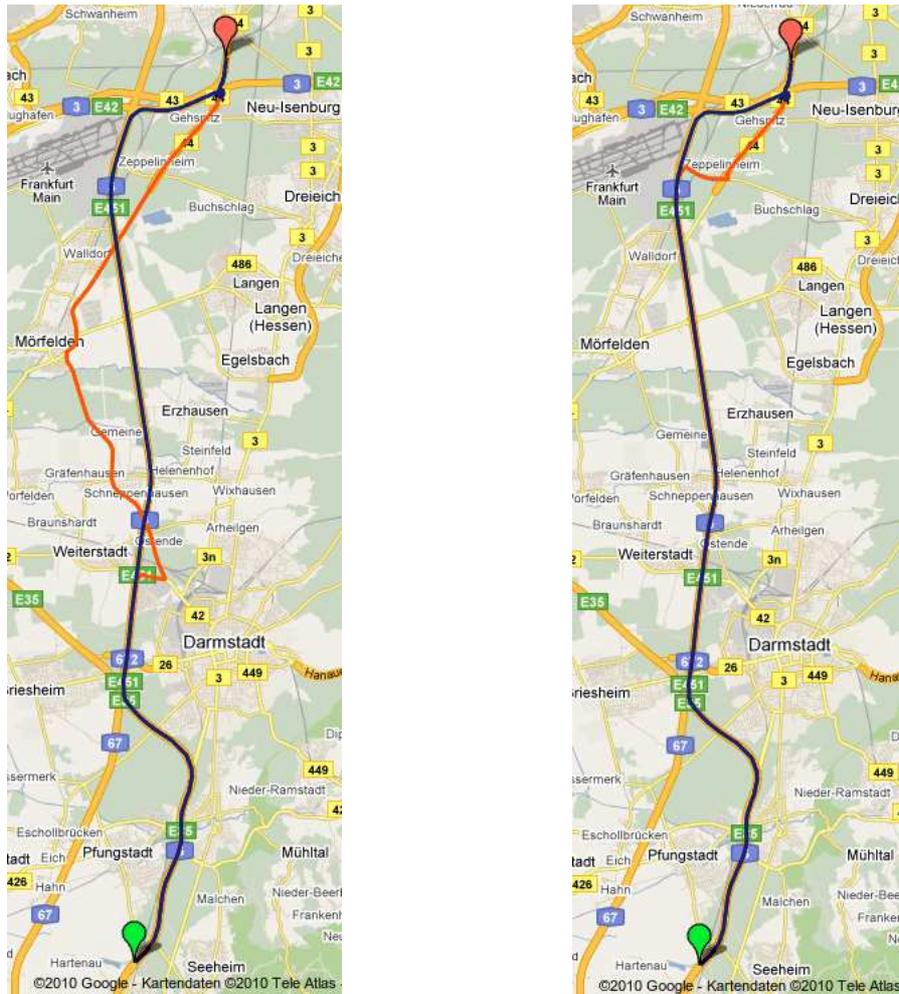


Abbildung 4.10: Bei dieser Anfrage rund um Darmstadt wird der Einfluss des Stundenlohns und der beschränkten Geschwindigkeiten auf den Routenverlauf deutlich. Die Route im Modell mit reduzierter Maximalgeschwindigkeit (blau) führt immer über die Bundesautobahn A 5. Wird nur nach Energieverbrauch optimiert (links), so weicht die optimale Route mit einer Maximalgeschwindigkeit von 135 km/h (orange) deutlich von der Autobahn ab. Bei einem Stundenlohn von 1€ (rechts) fällt der Unterschied deutlich geringer aus. Nicht abgebildet ist der Routenverlauf bei einem Stundenlohn von 5€, welcher identisch ausfällt.

Durch die Geschwindigkeitsreduzierung ist für alle Stundenlöhne bei der Anfrage in Abbildung 4.10 der Weg über die Autobahn am günstigsten. Bei einer Maximalgeschwindigkeit von 135 km/h wird teilweise die Autobahn verlassen. Die Route bei einem Stundenlohn von 0€ hat den größten Anteil neben der Autobahn. Bei einem Stundenlohn von 1€ reduziert sich dieser

Anteil und bei 5 € sind die Routen schließlich identisch. Je nach Stundenlohn kann zwischen 0,10 und 0,64 € durch den geringeren Energieverbrauch trotz größerem Zeitaufwand eingespart werden. Dies entspricht relativen Differenzen von 2,6 bis zu 28,9 %. Die relative Energieeinsparung beträgt etwa 29 % bei den Stundenlöhnen 0 und 1 € bzw. 14,5 % bei einem Stundenlohn von 5 €.

Tabelle 4.22 enthält die Durchschnittswerte der Größen Kosten, Distanz, Zeit und Energie der betrachteten Routen. Insgesamt fallen die Differenzen der Mittelwerte relativ gering aus. Der Unterschied bei den Zeiten beträgt maximal zwei Minuten. Der durchschnittliche Energieverbrauch weicht um bis zu 3 MJ zu Gunsten der Routen mit reduzierter Geschwindigkeit ab. Die Differenz der Durchschnittswerte beträgt in beiden Fällen etwa 5 %, was im einen Fall gegen und im anderen Fall für reduzierte Geschwindigkeiten spricht. Eine Beschränkung der Geschwindigkeit führt also zu deutlich niedrigeren Energieverbräuchen jedoch müssen auf der anderen Seite längere Fahrtzeiten in Kauf genommen werden.

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,83	32,8	00:40	59,9
	1,92	32,1	00:38	62,7
1	2,49	32,8	00:39	60,0
	2,55	32,4	00:37	63,0
5	5,00	33,4	00:36	63,1
	5,01	33,4	00:36	64,4

Tabelle 4.22: Absolute Werte von Anfragen, mittellanger Strecken (physikalischer Ansatz mit vs. ohne Geschwindigkeitsbeschränkung). Die obere Zeile enthält nach Definition 4 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_B(P_B)$ über alle Anfragen.

b) Langstrecken

Die Tabellen 4.23 und 4.24 zeigen, wie in Paragraph 4.5.3 beschrieben, die Ergebnisse des Vergleichs für Langstrecken.

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	0,9	15,824 (21,994)	-2,002	-6,484	15,824
1	3,5	10,439 (14,213)	-2,154	-16,191	17,101
5	89,1	0,822 (1,056)	-0,142	-6,872	8,183

Tabelle 4.23: Mittelwerte der relativen Differenzen nach Definition 4 von Anfragen, die für Langstrecken stehen (physikalischer Ansatz mit vs. ohne Geschwindigkeitsbeschränkung).

Im Vergleich zu mittellangen Strecken fällt der Anteil an identischen Routen deutlich geringer aus. So verlaufen noch nicht einmal 1 % der Routen identisch, wenn ausschließlich nach Energie optimiert wird. Dies ist darin begründet, dass es für Anfragen, deren kürzesten Distanzen zwischen Start und Ziel gleichverteilt zwischen 200 und 400 km betragen, einige mögliche Routenverläufe gibt. Bei einem Stundenlohn von 5 € wird jedoch deutlich, dass die Priorisierung der Zeit in den meisten Fällen den Routenverlauf bestimmt, so dass etwa 89 % identisch sind.

Wie schon bei den mittellangen Strecken ist der Durchschnitt der relativen Differenzen für Distanz und Zeit unabhängig vom Stundenlohn negativ. Dies ist wiederum in der Beschränkung der Geschwindigkeit begründet. Selbst bei gleicher Strecke verlängert sich dadurch die Fahrtzeit teilweise erheblich. Der Unterschied fällt bei einem Stundenlohn von 1 € größer aus als bei 0 €, da hier aufgrund der Berücksichtigung der Zeit im Modell ohne beschränkte Geschwindigkeiten mehr Segmente, die zu Autobahnen gehören, verwendet werden. Bei diesen ist die Zeitdifferenz besonders groß. Die Distanzen nehmen zu, da Segmente mit niedrigerer rechnerischer Geschwindigkeit

vermieden werden, was zu deutlichen Umwegen führen kann.

Bei Stundenlöhnen von 0 bzw. 1 € stechen die Durchschnittswerte der relativen Differenzen bezüglich Kosten und Energie ins Auge. Das Einsparungspotential an Gesamtkosten pro Fahrt ist mit gut 10 bzw. 15 % sehr hoch. Jedoch muss auch bedacht werden, dass die Geschwindigkeit auf 65 bzw. 75 km/h beschränkt ist. Aber selbst eine Maximalgeschwindigkeit von 110 km/h bei einem Stundenlohn von 5 € führt zu einer Energieeinsparung von über 8 %. Auch wenn an Kosten durchschnittlich noch nicht einmal ein Prozent eingespart werden kann, lohnt sich eine Geschwindigkeitsreduzierung aus Sicht des Energieverbrauchs und somit auch aus Sicht der Umwelt.

Die Werte in Tabelle 4.24 bestätigen das bisher beschriebene Bild vom Effekt reduzierter Geschwindigkeiten im physikalischen Modell ohne Höheninformationen. Das Einsparungspotential bei Langstrecken ist enorm. Die Differenz der Mittelwerte über den Energieverbrauch beträgt je nach Stundenlohn zwischen 50 und 97,3 MJ. Dies entspricht etwa 1,4 bzw. 2,74 Litern Diesel. Der Unterschied zwischen den Durchschnittswerten für die Kosten beträgt zwischen 0,29 und 2,68 €.

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	13,97	323,2	05:15	457,5
	16,65	316,7	04:56	545,2
1	18,81	324,0	04:44	460,8
	21,03	316,8	03:58	558,1
5	34,93	331,0	03:37	550,8
	35,22	330,5	03:22	600,5

Tabelle 4.24: Absolute Werte von Anfragen, die Langstrecken repräsentieren (physikalischer Ansatz mit vs. ohne Geschwindigkeitsbeschränkung). Die obere Zeile enthält nach Definition 4 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_B(P_B)$ über alle Anfragen.

4.5.5 Fazit

Im physikalischen Modell geht die Geschwindigkeit explizit in die Berechnung des Energieverbrauchs ein. Für den in dieser Arbeit simulierten Audi A3 liegt die optimale Geschwindigkeit bezüglich des Energieverbrauchs in der Ebene bei 65 km/h. Wenn darüber hinaus noch die Fahrtzeit in Form des Stundenlohns mitberücksichtigt wird, so lässt sich eine vom Stundenlohn abhängige kostenoptimale Geschwindigkeit bestimmen, welche für Löhne zwischen 0 und 10 € in einem Bereich von 65 bis 135 km/h liegt (Paragraph 4.5.1). Wenn die kostenoptimalen Geschwindigkeiten als Maximalgeschwindigkeiten abhängig vom betrachteten Stundenlohn angenommen werden, so ergeben sich deutliche relative Differenzen zu Routen mit einer standardmäßigen Maximalgeschwindigkeit von 135 km/h.

Wie die vorangegangenen Ergebnisse (Paragraph 4.5.4) zeigen, ist das Einsparungspotential durch reduzierte Geschwindigkeiten enorm. In der Praxis ist eine Maximalgeschwindigkeit von unter 100 km/h sicherlich nicht realistisch, aber auch durch eine Reduzierung auf 110 km/h bei einem Stundenlohn von 5 € kann einiges an Kosten sowie Energie eingespart werden. Es ist also durchaus eine Überlegung wert, in Zukunft besser mit 110 km/h statt mit der üblichen Reisegeschwindigkeit auf Deutschlands Autobahnen zu fahren. In sehr vielen Fällen muss hierbei noch nicht einmal von der gewohnten Reiseroute abgewichen werden.

Jedoch muss beachtet werden, dass die hier nachgewiesenen Effekte nicht in genau diesem Maß in der Praxis auftreten müssen. Die Ergebnisse zeigen zwar ein deutliches Potential, wie groß die Unterschiede in der Realität ausfallen, kann lediglich mit einer empirischen Studie untersucht werden.

4.6 Vergleich beider Ansätze

4.6.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die beiden Ansätze miteinander verglichen. Der erste Kandidat des Vergleichs ist der physikalische Ansatz, der in Abschnitt 3.2 beschrieben ist, also ohne Reduzierung der Geschwindigkeit. Auf der anderen Seite steht das in Abschnitt 3.1 vorgestellte verbrauchs-basierte Modell mit differenzierten Verbrauchswerten.

Wie in Abschnitt 3.3 ausgeführt, ist der grundlegende Ansatz der beiden Varianten identisch. Jedoch unterscheiden sich die Herangehensweisen stark voneinander. Das physikalische Modell wird von unten nach oben entwickelt. Das heißt, auf Basis konkreter Eigenschaften des Fahrzeugs und der Straße wird der Energieverbrauch bestimmt. Im Gegensatz dazu wird im verbrauchs-basierten Modell auf vorhandene Verbrauchswerte zurückgegriffen und diese konkretisiert bzw. Kombinationen von konkreten Eigenschaften des Fahrzeugs und der Straße zugeordnet.

Im verbrauchs-basierten Ansatz bilden drei Verbrauchswerte abhängig von der Straßenkategorie sowie Längsneigungskorrekturfaktoren die Basis der Berechnung. Die Ergebnisse des physikalischen Modells hängen in erster Linie von der Fahrzeugmasse sowie der gefahrenen Geschwindigkeit, also von den jeweils acht Network sowie Speed Classes (vgl. Abschnitt 2.1), und ebenfalls von der Längsneigung ab.

Jedes der beiden Modelle hat spezielle Eigenschaften, die zu bestimmten Routenverläufen führen. Im verbrauchs-basierten Modell mit differenzierten Werten werden, wie in Abschnitt 4.3 ausgeführt, bei niedrigen Stundenlöhnen Autobahnen und Kraftfahrstraßen vermieden, da diese den höchsten Energieverbrauch aufweisen. Im physikalischen Modell kommt es auf den Stundenlohn an, welche Geschwindigkeit am günstigsten ist. Erst ab einem Stundenlohn von 10€ ist die rechnerische Maximalgeschwindigkeit von 135 km/h optimal. Weitere Informationen zu den Routenverläufen im physikalischen Modell können Abschnitt 4.4 entnommen werden.

In diesem Abschnitt werden jeweils zwei Varianten der beiden Ansätze miteinander verglichen. Paragraph 4.6.2 beschäftigt sich mit dem Vergleich des physikalischen Ansatzes mit dem verbrauchs-basierten Modell unter Verwendung von differenzierten Verbrauchswerten ohne Berücksichtigung von Höheninformationen. Im darauf folgenden Paragraphen 4.6.3 wird der gleiche Vergleich aber mit Höheninformationen betrachtet.

Die Methodik des Vergleichs sowie die Semantik der präsentierten Tabellen ist in Abschnitt 4.2 beschrieben.

4.6.2 Ohne Höheninformationen

Im weiteren Verlauf dieses Paragraphen werden der physikalische sowie der verbrauchs-basierte Ansatz gegenüber gestellt. Höheninformationen bleiben bei beiden Modellen außen vor.

Als Basis für den Vergleich dienen Anfragen, die mittellange bzw. lange Strecken repräsentieren. Durch geringe Anteile an identischen Routen und große relative Differenzen heben sich diese beiden Testdatensätze in diesem Vergleich von den übrigen ab. Weitere Ergebnisse sind in Anhang A zu finden.

a) Mittellange Strecken

Tabelle 4.25 enthält Ergebnisse des Vergleichs für mittellange Strecken. Wie an den hohen Differenzen zwischen Durchschnitt und 90%-Quantil erkennbar ist, streuen die Werte relativ stark.

Unabhängig vom Stundenlohn ist der Mittelwert über die relativen Differenzen bezüglich der Distanz immer negativ und bezüglich der Zeit immer positiv. Der Grund hierfür ist die Vermeidung von Autobahnen und Schnellstraßen (NC 0 bzw. 1) im verbrauchs-basierten Modell mit differenzierten Verbrauchswerten. Dies führt einerseits zu direkteren Wegen, aber eben auch zu längeren Fahrtzeiten. Ferner gibt es viele Anfragen, bei denen der Weg im verbrauchs-basierten Modell parallel zur Autobahn, welche im physikalischen Modell genutzt wird, verläuft.

Da im verbrauchsbasierten Modell Autobahnen selbst bei einem Stundenlohn von mehr als 5 € vermieden werden, kommt es bei diesen Stundenlöhnen zu negativen relativen Differenzen bezüglich der Energie. Im physikalischen Modell werden teilweise große Umwege für eine Zeitersparnis in Kauf genommen. Die teilweise sehr viel längeren Distanzen und die höheren Geschwindigkeiten führen aber auch zu einem größeren Energieverbrauch, welcher aber durch die Zeitersparnis wieder ausgeglichen wird. Im nächsten Paragraphen zeigt Abbildung 4.12 ein Beispiel, das diese Aussage unterstreicht.

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	17,3	6,213 (16,474)	-3,856	11,613	6,213
1	27,1	4,134 (12,551)	-4,270	8,759	2,533
5	59,4	0,741 (2,589)	-3,163	1,997	-1,118
10	75,4	0,247 (0,753)	-2,135	0,723	-1,072

Tabelle 4.25: Relative Differenzen von mittellangen Strecken (physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz jeweils ohne Höhen).

Die Werte in Tabelle 4.26 zeigen ebenso, dass die Distanzen im physikalischen Modell durchschnittlich höher ausfallen als im verbrauchsbasierten Modell. Der Unterschied zwischen den Mittelwerten der Kosten fällt mit bis zu 0,12 € für Strecken einer Länge von 20 bis 40 km durchaus bemerkenswert aus.

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,92	32,1	00:38	62,7
	2,05	30,8	00:44	67,2
1	2,55	32,4	00:37	63,0
	2,67	30,9	00:41	64,7
5	5,01	33,4	00:36	64,4
	5,05	32,1	00:37	63,5
10	8,03	34,0	00:36	65,5
	8,05	33,1	00:36	64,5

Tabelle 4.26: Absolute Werte von Anfragen, welche mittellange Strecken repräsentieren (physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz jeweils ohne Höhen). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

Das in Abbildung 4.11 dargestellte Beispiel unterstreicht das Potential einer expliziten Optimierung nach dem physikalischen Modell im Vergleich zum verbrauchsbasierten Ansatz. So werden bei einer ausschließlichen Optimierung nach Energie knapp 0,90 € gespart und die Fahrtzeit um etwa 23 Minuten verkürzt. Selbst die zurückgelegte Distanz fällt in diesem Beispiel um gute 1,5 km geringer aus. Ein Pendler könnte also innerhalb einer Fünf-Tage-Woche etwa 9 € an Kosten und fast 4 Stunden an Fahrtzeit sparen. Bei 20 Arbeitstagen im Monat können die Fahrtkosten um 36 € und die Fahrtzeit um gut 15 Stunden pro Monat reduziert werden.

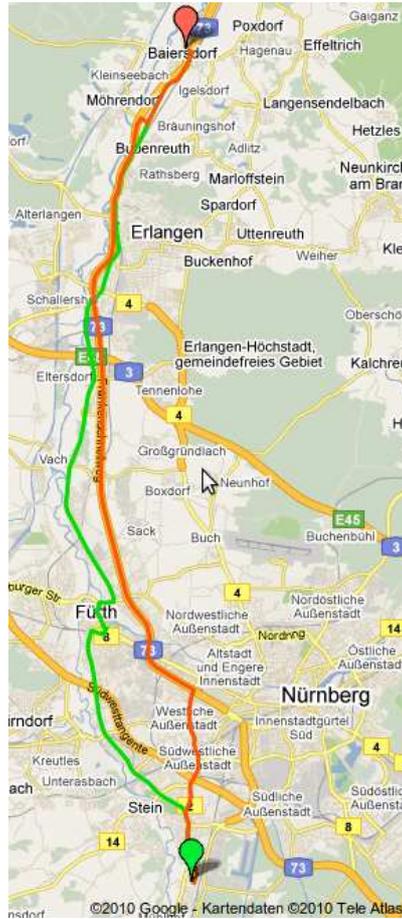


Abbildung 4.11: Die Route mit dem geringsten Energieverbrauch nach dem physikalischen Modell (orange) führt über die A 73, den sogenannten Frankenschnellweg. Im verbrauchs-basierten Modell wird aufgrund der differenzierten Verbrauchswerte parallel dazu gefahren (grün). Im physikalischen Modell würde dies Mehrkosten von 0,89 € und eine zusätzliche Fahrtzeit von knapp 23 Minuten bedeuten.

b) Langstrecken

Tabelle 4.27 zeigt die Ergebnisse des Vergleichs mit Langstrecken. Bei einem Stundenlohn von 0 oder 1 € sind fast alle Routen unterschiedlich. Bei 5 € ist ein Viertel gleich, bei 10 € ist über die Hälfte der Routen identisch.

Wie schon bei mittellangen Strecken zeigt sich, dass die Fahrtzeiten im physikalischen Modell meist geringer ausfallen. Die zurückgelegten Distanzen sind jedoch länger. Auch an dieser Stelle ist die Vermeidung von Segmenten der Network Class 0 bzw. 1 im verbrauchs-basierten Modell mit differenzierten Verbrauchswerten die Ursache für dieses Phänomen. Statt der Autobahn werden parallele Bundes- sowie Landstraßen genutzt. Die Auswirkung auf die Fahrtzeit ist bei Langstrecken jedoch noch größer als bei Strecken mittlerer Distanz.

Auch der Vorzeichenwechsel bei den relativen Differenzen bezüglich des Energieverbrauchs tritt wie bei Strecken mittlerer Distanz (vgl. Tabelle 4.25) auch bei den betrachteten Langstrecken auf. Der Grund hierfür sind die langen Umwege auf den schnelleren Autobahnen im physikalischen Modell. Aufgrund der größeren Distanzen ist der Energieverbrauch viel höher als auf dem direkteren Weg, welchen das verbrauchs-basierte Modell bevorzugt. Jedoch wirkt sich dies nicht auf die Gesamtkosten aus, da sehr viel Zeit eingespart wird.

Durch die extremen Zeiteinsparungen wird auch einiges an Kosten eingespart. So beträgt die durchschnittliche relative Kostendifferenz bei einem Stundenlohn von 1 € knapp 9,3 %. Bei höheren Stundenlöhnen ist, wie die 90%-Quantile zeigen, die Einsparung zumindest für ein Zehntel der Anfragen nicht zu verachten.

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	0,0	10,136 (15,228)	-2,522	25,490	10,136
1	0,0	9,280 (15,132)	-2,847	30,812	2,052
5	25,6	0,829 (2,538)	-2,498	4,017	-2,574
10	56,9	0,240 (0,854)	-1,339	1,027	-1,264

Tabelle 4.27: Relative Differenzen von Langstrecken (physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz jeweils ohne Höhen).

Wie Tabelle 4.28 zeigt, ist die Differenz der Kostenmittelwerte für niedrige Stundenlöhne mit knapp 2 € bzw. sogar noch mehr erheblich. Bei einer stärkeren Priorisierung der Zeit beträgt der Abstand der Mittelwerte immerhin noch 0,30 bzw. 0,14 €.

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	16,65	316,7	04:56	545,2
	18,57	308,7	06:40	608,1
1	21,03	316,8	03:58	558,1
	23,24	307,9	05:49	570,0
5	35,22	330,5	03:22	600,5
	35,52	322,0	03:32	584,4
10	51,91	336,0	03:19	613,1
	52,05	331,3	03:21	604,8

Tabelle 4.28: Absolute Werte von Anfragen, welche Langstrecken repräsentieren (physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz jeweils ohne Höhen). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

4.6.3 Mit Höheninformationen

Anhand von deutschlandweiten mittellangen Strecken sowie mittellangen Strecken im Schwarzwald sollen die Unterschiede der beiden Ansätze unter Berücksichtigung von Höheninformationen analysiert werden. Dabei treten bei ersteren im Vergleich zu letzteren kaum Höhenunterschiede auf, so dass an dieser Stelle auch beurteilt werden kann in welcher Art Steigungen und Gefälle auf den Routen die Differenzen zwischen den beiden Modellen beeinflussen. Weitere Ergebnisse sind in Anhang A zu finden.

a) Mittellange Strecken

Die Tabellen 4.29 und 4.30 enthalten die Ergebnisse des Vergleichs der beiden Ansätze unter Berücksichtigung von Höhendaten.

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	6,3	5,659 (13,532)	-2,312	6,615	5,659
1	18,8	3,654 (10,665)	-2,733	7,117	2,377
5	51,1	0,672 (2,256)	-2,452	1,829	-1,088
10	69,6	0,245 (0,707)	-1,666	0,695	-1,016

Tabelle 4.29: Relative Differenzen von mittellangen Strecken (physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz jeweils mit Höhen).

Es zeichnet sich das gleiche Bild wie in Paragraph 4.6.2 ohne Berücksichtigung von Höhendaten ab, auch wenn die relativen Differenzen betragsmäßig meist etwas geringer ausfallen.

Der Mittelwert über die relativen Differenzen bezüglich der Distanz ist unabhängig vom Stundenlohn immer negativ und bezüglich der Zeit immer positiv. Ab einem Stundenlohn von 5€ ist der Durchschnitt über die relativen Differenzen bezüglich des Energieverbrauchs negativ und zuvor positiv. All diese Beobachtungen liegen wie bereits oben detaillierter beschrieben in der Priorisierung der Network Classes aufgrund der differenzierten Verbrauchswerte im verbrauchsbasierten Modell begründet.

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,73	31,6	00:41	56,8
	1,85	30,8	00:44	60,4
1	2,39	31,8	00:38	57,3
	2,49	30,9	00:41	58,8
5	4,88	33,0	00:36	59,7
	4,91	32,0	00:37	58,8
10	7,91	33,7	00:36	61,1
	7,93	33,0	00:36	60,2

Tabelle 4.30: Absolute Werte von Anfragen, welche mittellange Strecken repräsentieren (physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz jeweils mit Höhen). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

Die Werte in Tabelle 4.30 zeigen ebenso, dass die durchschnittlichen Distanzen im physikalischen Modell immer länger als im verbrauchsbasierten Modell sind. Bei den durchschnittlichen Fahrtzeiten verhält es sich andersherum. Auch der Vorzeichenwechsel bei den relativen Differenzen bezüglich der Energie wird von den Mittelwerten bestätigt.

b) Mittellange Strecken im Schwarzwald

Tabelle 4.31 präsentiert die relativen Differenzen von mittellangen Strecken im Schwarzwald. Die Differenzen an sich fallen geringer als bei deutschlandweiten Mittelstrecken aus, was darauf hindeutet, dass die beiden Modelle unter Berücksichtigung von Höheninformationen näher beieinander liegen als ohne Höhen.

Wie bei den drei Betrachtungen zuvor ist der Durchschnitt der relativen Differenzen bezüglich der Distanz immer negativ und bezüglich der Zeit immer positiv. Bei dem Energieverbrauch wechselt das Vorzeichen. Gründe für diese Phänomene wurden bereits in den obigen Paragraphen erläutert.

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	3,4	3,683 (8,691)	-1,235	0,423	3,683
1	15,9	1,780 (5,011)	-1,020	2,120	1,714
5	54,9	0,485 (1,222)	-1,913	1,489	-1,079
10	69,6	0,225 (0,625)	-1,407	0,665	-1,044

Tabelle 4.31: Relative Differenzen von mittellangen Strecken im Schwarzwald (physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz jeweils mit Höhen).

Abbildung 4.12 zeigt, wie der zusätzliche Energieaufwand ab einem Stundenlohn von 5€ zu Stunde kommt. Zwar ist die Route nach dem physikalischen Modell etwa zwölf Minuten schneller sowie 0,94€ günstiger, jedoch ist die Distanz auch mehr als 26 km länger. Die relative Differenz bezüglich der Kosten beträgt 7,8 %, bezüglich der Zeit 22,1 % und bezüglich der Energie -45,7 %.

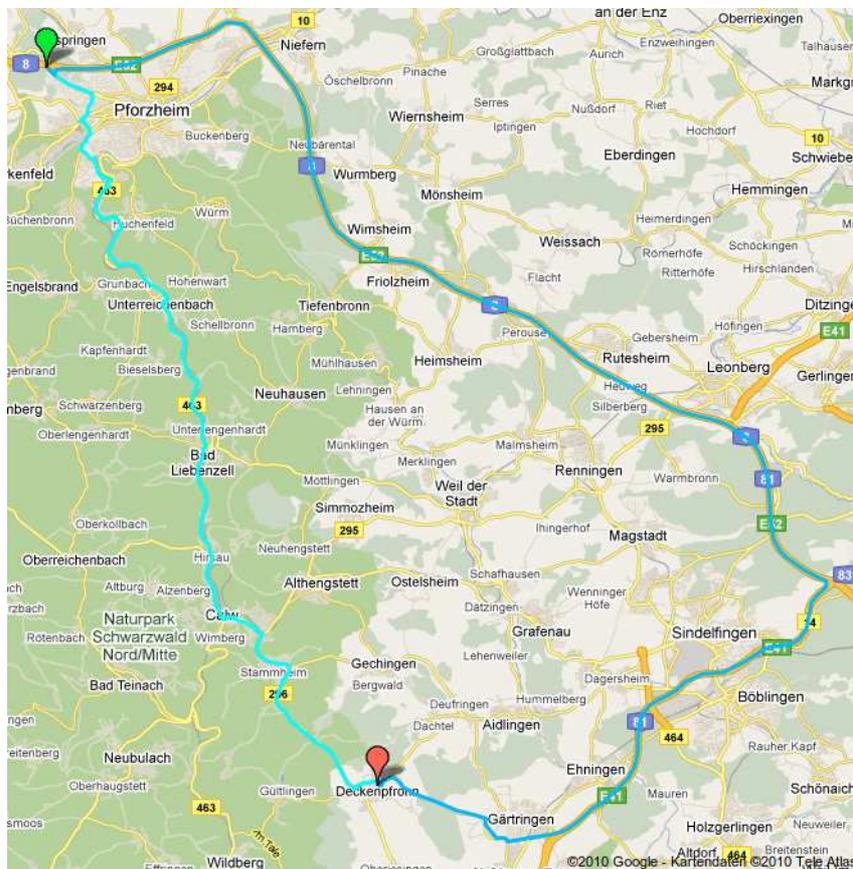


Abbildung 4.12: Bei einem Stundenlohn von 10€ führt die Route nach dem verbrauchsbasierten Modell (hellblau) meist über Bundesstraßen relativ direkt von Start zu Ziel. Die Route nach dem physikalischen Modell (blau) nützt hingegen die Autobahn.

Die Werte in Tabelle 4.32 belegen die bisher getätigten Aussagen. Auch hier ist die durchschnittliche Distanz im physikalischen Modell immer größer und die Fahrtzeit immer kleiner.

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,67	31,1	00:42	54,6
	1,74	30,7	00:42	56,8
1	2,36	31,1	00:40	55,1
	2,40	30,8	00:41	56,1
5	4,96	32,5	00:38	58,1
	4,98	31,8	00:38	57,2
10	8,12	33,3	00:37	59,6
	8,14	32,7	00:38	58,7

Tabelle 4.32: Absolute Werte von Anfragen, welche mittellange Strecken im Schwarzwald repräsentieren (physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz jeweils mit Höhen). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

4.6.4 Fazit

Wenn man die beiden Ansätze einander gegenüber stellt, so fällt auf, dass die Routen nach dem physikalischen Modell durchschnittlich länger sind, dafür aber die Fahrtzeit kürzer ausfällt (Paragraph 4.6.2). Dies ist unabhängig davon, ob Höheninformationen berücksichtigt werden oder nicht (Paragraph 4.6.3). Jedoch fallen die relativen Differenzen zwischen den beiden Ansätzen im ersten Fall etwas geringer aus. Die auftretenden Phänomene liegen in der Vermeidung der Autobahn im verbrauchsbasierten Modell mit differenzierten Verbrauchswerten begründet.

Welcher der beiden Ansätze die Realität besser beschreibt, kann nur durch aufwendige Testfahrten im Zusammenhang mit empirischen Studien ermittelt werden. Beide Modelle haben wie in Abschnitt 4.3 bzw. 4.4 erläutert Schwächen. Die Differenzierung des verbrauchsbasierten Ansatzes scheint noch verbesserungswürdig. Beim physikalischen Ansatz liegt das Problem in der starken Abhängigkeit des berechneten Energieverbrauchs von den modellierten Fahrzeugeigenschaften sowie von den Eingabegrößen.

4.7 Vergleich mit herkömmlicher Optimierung

4.7.1 Allgemeines

Herkömmliche Routenplanungsanwendungen berechnen optimale Routen bezüglich der Fahrtzeit sowie der Distanz. Die Standardeinstellung bei Produkten der PTV sieht dabei eine Gewichtung von 80 % nach Zeit und 20 % nach Distanz vor. Diese Priorisierung entspricht in etwa einem Stundenlohn von 10€ im verbrauchsbasierten Modell mit durchschnittlichem Verbrauchswert ohne Berücksichtigung von Höhendaten. Zusätzlich vorhandene Einstellungsmöglichkeiten des Routers wie Mali-Werte oder Leveling werden für diesen Vergleich nicht genutzt.

Im weiteren Verlauf dieses Abschnittes soll untersucht werden, ob und in welchem Maß sich Routen, die nach einem der in Kapitel 3 vorgestellten Modelle bei einem Stundenlohn von 10€ optimal sind, von denen nach der herkömmlichen Optimierung unterscheiden. Dabei wird der verbrauchsbasierte Ansatz mit einheitlichem Verbrauchswert sowie ohne Berücksichtigung von Höheninformationen mit den restlichen sechs Modellvarianten aus Abbildung 3.7 bei einem Lohn von 10 Euro verglichen. Durch den konstant gehaltenen Stundenlohn wird die Wichtigkeit der Zeit beibehalten.

Die verbrauchsbasierte sowie der physikalische Ansatz werden hierbei jeweils für sich betrachtet. Abschnitt 4.7.3 beinhaltet den Vergleich zwischen herkömmlicher Optimierung und dem verbrauchsbasierten Ansatz. Der physikalische Ansatz wird in Abschnitt 4.7.4 behandelt.

4.7.2 Semantik des Vergleichs sowie der Tabellen

Die dem Vergleich zugrunde liegende Methodik ist in Paragraph 4.2.2 beschrieben. Wie schon in vorherigen Vergleichen werden im Folgenden immer zwei Modelle miteinander verglichen.

Analog zu der in Paragraph 4.2.3 vorgestellten Semantik der Tabellen werden auch hier für jeden betrachteten Anfragedatensatz zwei unterschiedliche Tabellenarten präsentiert.

Die eine Art der Tabellen enthält Mittelwerte der relativen Differenzen von Kosten, Distanz, Zeit sowie Energieverbrauch über alle 1 000 Anfragen. Bei der Bestimmung der relativen Differenzen nach Definition 3 ist immer das verbrauchsbasierte Modell mit durchschnittlichem Verbrauchswert sowie ohne Berücksichtigung von Höheninformationen Modell B . Modell A steht für den damit zu vergleichenden Ansatz. Für die Kosten ist neben dem Durchschnittswert noch das 90%-Quantil in Klammern angegeben. Des Weiteren enthalten die Tabellen Angaben darüber wie viel Prozent der verglichenen Routen einen identischen Verlauf (d.h. gleiche Distanz und gleiche Energiekosten nach allen Modellen) vorweisen.

Darüber hinaus werden Tabellen angegeben, die Durchschnittswerte für Kosten, Distanz, Zeit und Energie der berechneten Routen des Anfragedatensatzes enthalten. Die Werte in der oberen Zeile sind dabei die Größen des Pfads P_A nach Modell A . Die untere Zeile enthält den Durchschnitt über die Ergebnisse der Bewertung des Pfads P_B wiederum nach Modell A .

Anders als bisher sind die Werte in den Tabellen nicht vom Stundenlohn sondern von dem variierenden Modell A abhängig.

4.7.3 Vergleich mit dem verbrauchsbasierten Ansatz

Die hier präsentierten Daten dienen dem Vergleich der herkömmlichen Optimierung mit dem verbrauchsbasierten Ansatz aus Abschnitt 3.1. Es wird sowohl die Variante mit einheitlichem Verbrauchswert unter Beachtung von Höheninformationen als auch die beiden Modellvarianten mit differenzierten Werten jeweils für mittellange Strecken sowie Langstrecken betrachtet.

Die Grundlage dieses Vergleichs sind Anfragen mittlerer sowie langer Distanz. Damit werden zwei sich stark unterscheidende Testdatensätze betrachtet, die mit die größten relativen Differenzen aufweisen. Anhang A enthält die Resultate für die restlichen Testdatensätze.

a) Mittellange Strecken

Die Tabellen 4.33 und 4.34 enthalten die Ergebnisse für mittellange Strecken.

Modell	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
∅, mit Höhen	90,3	0,014 (0,000)	0,141	-0,071	0,220
diff., ohne Höhen	81,2	0,114 (0,229)	0,255	-0,276	0,960
diff., mit Höhen	77,2	0,135 (0,380)	0,438	-0,405	1,271

Tabelle 4.33: Relative Differenzen von mittellangen Strecken (verbrauchsbasierter Ansatz vs. herkömmliche Optimierung).

Da bei einem Stundenlohn von 10 € die Fahrzeit eine große Rolle spielt, ist der Anteil identischer Routenverläufe mit mindestens 77 % sehr hoch. Jedoch zeigt sich, dass eine explizite Optimierung nach dem verbrauchsbasierten Modell mit differenzierten Verbrauchswerten sich durchaus lohnen kann. Zwar können kaum Kosten eingespart werden, die relative Differenz bezüglich des Energieverbrauchs beträgt aber immerhin etwa 1 %.

Modell	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
∅, ohne Höhen	8,30	33,2	00:36	73,4
∅, mit Höhen	8,45	33,2	00:36	78,0
	8,45	33,2	00:36	78,2
diff., ohne Höhen	8,22	33,1	00:36	69,9
	8,23	33,2	00:36	70,9
diff., mit Höhen	8,35	33,0	00:36	74,1
	8,37	33,2	00:36	75,4

Tabelle 4.34: Absolute Werte von Anfragen, welche mittellange Strecken repräsentieren (verbrauchsbasierter Ansatz vs. herkömmliche Optimierung). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

Die Mittelwerte in Tabelle 4.34 bestätigen das bisher beschriebene Bild. Die Werte unterscheiden sich kaum. Nur bezüglich des Energieverbrauchs bei Verwendung von differenzierten Verbrauchswerten ergeben sich erwähnenswerte Differenzen.

b) Langstrecken

Die Ergebnisse des Vergleichs auf Basis von Langstrecken sind in Tabelle 4.35 sowie 4.36 dargestellt.

Modell	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
∅, mit Höhen	85,9	0,012 (0,004)	0,062	-0,060	0,119
diff., ohne Höhen	64,2	0,117 (0,363)	1,053	-0,937	1,616
diff., mit Höhen	58,4	0,160 (0,485)	1,109	-1,014	1,723

Tabelle 4.35: Relative Differenzen von Langstrecken (verbrauchsbasierter Ansatz vs. herkömmliche Optimierung).

Insgesamt ergeben sich die gleichen Erkenntnisse wie schon bei mittellangen Strecken. Die Berücksichtigung von Höhendaten hat kaum Auswirkungen auf die Ergebnisse. So verlaufen über 85% der Routen identisch. Anders schaut es bei der Verwendung von differenzierten Verbrauchswerten aus. Hier betragen die Durchschnittswerte der relativen Differenzen bezüglich des Energieverbrauchs mehr als 1,6 %.

Das in Abbildung 4.13 dargestellte Beispiel zeigt, dass es durchaus Anfragen gibt, bei denen durch eine explizite Optimierung nach einem Modell mit differenzierten Verbrauchswerten deutlich Kosten eingespart werden können.

Die Route in dem Beispiel führt von der Mecklenburger Seenplatte in die Nähe von Braunschweig. Durch eine explizite Optimierung nach dem verbrauchsbasierten Modell mit differenzierten Verbrauchswerten werden knapp 3,2 % der Kosten im Vergleich zur optimalen Route mit einheitlichem Verbrauchswert gespart. Dies entspricht einem Betrag von 2,04 €. Werden darüber hinaus noch Höheninformationen berücksichtigt beträgt die Kostendifferenz sogar 2,33 €. Diese Gewinne kommen durch eine viel kürzere Strecke ohne Autobahnnutzung, welche zu einem viel niedrigeren Energieverbrauch führt, zu Stande. So können in beiden Fällen mehr als acht Liter Sprit eingespart werden. Jedoch fällt die Fahrtzeit auch etwa 40 Minuten länger aus.



Abbildung 4.13: Anfrage, die von der Mecklenburger Seenplatte zu einem Ort südlich von Braunschweig führt. Durch eine explizite Optimierung nach dem verbrauchsbasierten Modell mit differenzierten Verbrauchswerten (grün) werden 2,04€ gespart. Die zurückgelegte Distanz ist um 80 km kürzer als die der Route nach dem Modell mit einheitlichem Verbrauchswert (blau). Auf der anderen Seite müssen aber 40 Minuten mehr Fahrtzeit investiert werden.

Tabelle 4.36 enthält die Mittelwerte für Kosten, Distanz, Zeit und Energie für die unterschiedlichen Modelle des verbrauchsbasierten Ansatzes. Die Unterschiede fallen für Langstrecken relativ gering aus. Jedoch bleibt festzuhalten, dass der durchschnittliche Energieverbrauch bei den Modellen mit differenzierten Verbrauchswerten um etwa 15 MJ differiert. Dieser Wert entspricht in etwa 0,42 Litern Diesel.

Modell	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
∅, ohne Höhen	55,80	335,1	03:19	739,4
∅, mit Höhen	57,21	334,9	03:19	785,0
	57,22	335,1	03:19	786,0
diff., ohne Höhen	57,88	331,3	03:21	795,7
	57,95	335,1	03:19	809,8
diff., mit Höhen	59,40	331,0	03:21	844,5
	59,50	335,1	03:19	860,5

Tabelle 4.36: Absolute Werte von Anfragen, welche Langstrecken repräsentieren (verbrauchsbasierter Ansatz vs. herkömmliche Optimierung). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

4.7.4 Vergleich mit dem physikalischen Ansatz

Abschließend werden nun die Routen der herkömmlichen Optimierung mit den Ergebnissen nach den Modellen des physikalischen Ansatzes verglichen. Die Kosten fallen im Vergleich zum verbrauchsbasierten Ansatz geringer aus, da die Werte für den berechneten Energieverbrauch kleiner sind.

Für eine bessere Vergleichbarkeit der beiden Ansätze im Zusammenhang mit der herkömmlichen Optimierung werden im weiteren Verlauf wie schon in Paragraph 4.7.3 die Testdatensätze, welche mittellange bzw. lange Strecken repräsentieren betrachtet. Dabei zeichnen sich vor allem die Anfragen mittlerer Distanz durch verhältnismäßig große relative Differenzen aus. Die Ergebnisse zu den restlichen Testdatensätzen sind in Anhang A zusammengefasst.

a) Mittellange Strecken

Die folgenden Tabellen 4.37 sowie 4.38 enthalten die Werte des Vergleichs für mittellange Strecken.

Modell	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
ohne Höhen	70,8	0,238 (0,753)	-1,880	0,447	-0,354
mit Höhen	70,4	0,160 (0,420)	-1,227	0,291	-0,225
mit Rekuperation	70,4	0,160 (0,424)	-1,232	0,288	-0,220

Tabelle 4.37: Relative Differenzen von mittellangen Strecken (physikalischer Ansatz vs. herkömmliche Optimierung).

Aufgrund der Priorisierung der Zeit durch den verwendeten Stundenlohn von 10€ fallen die festzustellenden Differenzen sehr gering aus. Ein Grund hierfür ist sicherlich der mit etwa 70 % relativ hohe Anteil an identischen Routenverläufen. Selbst die Werte der 90%-Quantile sind mit maximal 0,75 % so niedrig, dass der Eindruck entsteht eine explizite Optimierung nach einem Modell des physikalischen Ansatzes ist nicht lohnenswert. Auffällig ist jedoch, dass die optimalen Routen nach den Varianten des physikalischen Modells durchschnittlich eine geringere Fahrtzeit und einen höheren Energieverbrauch aufweisen.

Modell	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
ohne Höhen	8,03	34,0	00:36	65,5
	8,05	33,2	00:36	65,1
mit Höhen	7,91	33,7	00:36	61,1
	7,92	33,2	00:36	60,9
mit Rekuperation	7,88	33,7	00:36	60,2
	7,90	33,2	00:36	60,0

Tabelle 4.38: Absolute Werte von Anfragen, welche mittellange Strecken repräsentieren (physikalischer Ansatz vs. herkömmliche Optimierung). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

Die Werte in Tabelle 4.38 stehen für die Mittelwerte der Größen der berechneten Routen. Die Durchschnittswerte bestätigen den bisher gewonnenen Eindruck, dass die herkömmliche Optimierung bei einem Stundenlohn von 10€ einer Optimierung nach einem der physikalischen Modelle ziemlich nahe kommt.

Abbildung 4.14 präsentiert ein Beispiel, das deutlich macht, dass sich auch eine explizite Optimierung nach dem physikalischen Ansatz im Vergleich zur herkömmlichen Routenberechnung lohnen kann. Bei dieser Anfrage östlich von Berlin können dadurch bis zu 0,52€ gespart werden. Falls ein Pendler diese Strecke täglich zur Arbeit zurücklegt, so kann er bei einem Stundenlohn

von 10 € innerhalb eines Monats mehr als 20 € einsparen. Die Einsparung kommt einzig und allein durch eine Fahrzeitreduzierung von zehn Minuten zu Stande. Der Energieverbrauch fällt nämlich aufgrund der 30 km längeren Distanz um einiges höher aus.

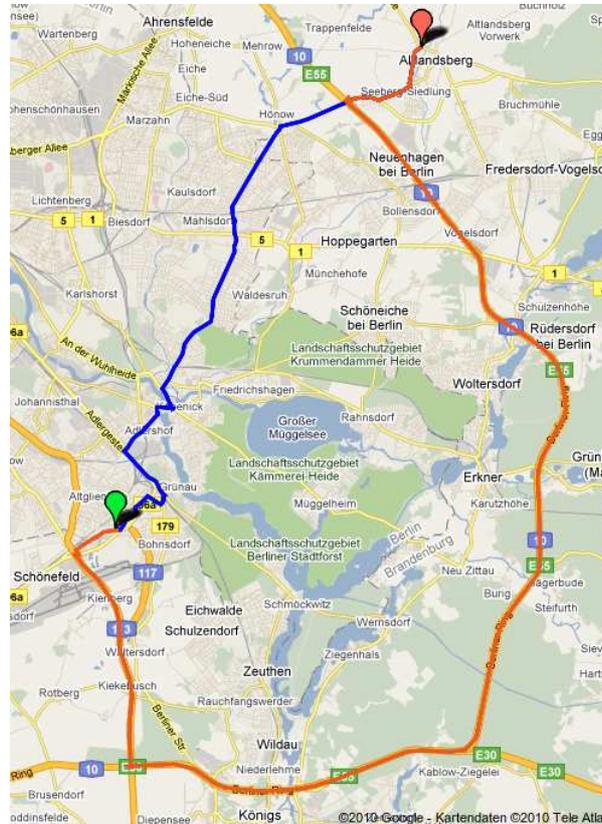


Abbildung 4.14: Bei dieser Anfrage östlich von Berlin führt die Route nach dem verbrauchsba-
sierten Modell mit einheitlichem Verbrauchswert relativ direkt von Start zu Ziel
(blau). Die Route nach dem physikalischen Ansatz führt unabhängig von der be-
trachteten Variante über den Berliner Ring (orange). Es werden dadurch bis zu
0,52 € an Kosten und zehn Minuten Fahrzeit gespart. Der Energiebedarf fällt
jedoch deutlich höher aus.

b) Langstrecken

Wie die Tabellen 4.39 und 4.40 zeigen, fallen die Differenzen des Vergleichs für Langstrecken noch
geringer als für mittellange Strecken aus.

Modell	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
ohne Höhen	60,6	0,069 (0,241)	-0,288	0,091	0,024
mit Höhen	56,5	0,052 (0,173)	-0,118	-0,000	0,150
mit Rekuperation	57,4	0,051 (0,166)	-0,106	-0,007	0,158

Tabelle 4.39: Relative Differenzen von Langstrecken (physikalischer Ansatz vs. herkömmliche Op-
timierung).

Bei mindestens 56 % identischen Routen belaufen sich die Durchschnittswerte der relativen
Differenzen bezüglich der Kosten auf deutlich unter 0,1 Prozent. Selbst die 90%-Quantile betragen

noch nicht einmal 0,25 Prozent. Auch bezüglich Distanz, Fahrtzeit und Energieverbrauch fallen die Unterschiede marginal aus.

Modell	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
ohne Höhen	51,91	336,0	03:19	613,1
	51,95	335,1	03:19	613,3
mit Höhen	51,95	335,4	03:19	613,4
	51,98	335,1	03:19	614,4
mit Rekuperation	51,83	335,4	03:19	609,3
	51,86	335,1	03:19	610,4

Tabelle 4.40: Absolute Werte von Anfragen, welche Langstrecken repräsentieren (physikalischer Ansatz vs. herkömmliche Optimierung). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

Die mittleren Kosten, die mittlere Distanz, Fahrtzeit sowie Energie unterscheiden sich dafür, dass Langstrecken betrachtet werden, wie Tabelle 4.40 zeigt, kaum. Für einen Großteil der Anfragen scheint sich also eine explizite Optimierung nach einem Modell des physikalischen Ansatzes nicht zu lohnen. Jedoch gibt es auch hier Beispiele, die deutliche Unterschiede bezüglich der Routenverläufe aufweisen, auch wenn die Differenzen nicht erwähnenswert sind.

4.7.5 Fazit

Im Vergleich der nach Energieverbrauch und Fahrtzeit optimierten Routen mit der herkömmlichen Optimierung wird deutlich, dass aus rein betriebswirtschaftlicher Sicht bei der gleichen Priorisierung der Fahrtzeit kaum etwas eingespart werden kann.

Die geringen Unterschiede zum verbrauchsbasierten Modell kommen vor allem durch die Verwendung der differenzierten Verbrauchswerte zu Stande (Paragraph 4.7.3). Die Durchschnittswerte über die relativen Differenzen bezüglich der Kosten liegen allesamt unabhängig vom betrachteten Testdatensatz nur knapp über 0 %. Die durchschnittlichen relativen Differenzen im physikalischen Modell fallen etwas höher aus (Paragraph 4.7.4). Bei den Kosten betragen die Mittelwerte aber ebenfalls deutlich weniger als 0,5 %.

Jedoch muss man auch ganz klar sagen, dass die Routen, welche 80 % nach Fahrtzeit sowie 20 % nach Distanz optimiert sind, im Allgemeinen nicht die energieeffizienteste Alternative darstellen. Für die Berechnung energieeffizienter Routen ist es unerlässlich den Energieverbrauch explizit zu modellieren und in der Optimierung zu berücksichtigen. Die in Kapitel 3 vorgestellten Ansätze sind hierbei ein erster wichtiger Schritt in diese Richtung. Die in diesem Kapitel präsentierten Ergebnisse machen deutlich, dass alle untersuchten Ansätze bei einer ausreichenden Priorisierung des Energieverbrauchs großes Potential haben.

5 Innerstädtischer Verkehr

Zunächst wird dargelegt, wieso innerstädtischer Verkehr gesondert betrachtet werden sollte und die Komplexität dieses Problems aufgezeigt (Abschnitt 5.1). Anschließend wird das zur Bestimmung von Abbiegekosten eingesetzte Werkzeug VISSIM vorgestellt (Abschnitt 5.2). Der darauf folgende Abschnitt 5.3 präsentiert für zwei Kreuzungen erste Ergebnisse. Zu guter Letzt beschäftigt sich Abschnitt 5.4 mit der Einbettung von Abbiegekosten in der Routenplanung.

5.1 Vielschichtigkeit des Problems

Eine Schwäche des physikalischen Modells, das in Abschnitt 3.2 beschrieben ist, besteht darin, dass der innerstädtische Verkehr nicht gesondert behandelt wird. So macht es keinen Unterschied, ob mit einer bestimmten Geschwindigkeit in der Stadt bei dichtem Verkehr oft abgebogen oder Überland ohne Hindernisse immer nur geradeaus gefahren wird. Ziel ist es eine Möglichkeit aufzuzeigen, wie dieses Manko behoben werden kann.

Eine detailgetreue Modellierung von innerstädtischem Verkehr ist sehr komplex. So gibt es viele Gegebenheiten, die entscheidenden Einfluss auf den Ablauf des Verkehrs haben. Ein wichtiger Punkt hierbei ist die Vorfahrtsregelung. So macht es einen Unterschied, ob eine Kreuzung ungeregelt, mit Schildern oder einer Lichtsignalanlage geregelt ist. Des Weiteren spielt die Priorisierung der an einem Verkehrsknoten beteiligten Strecken eine Rolle.

Bei Kreuzungen mit Lichtsignalanlagen ist außerdem die Kenntnis über deren Koordination für eine korrekte Modellierung unerlässlich. Bei einer grünen Welle kann die Geschwindigkeit im Optimalfall konstant gehalten werden. Es gibt aber auch Fälle, in denen man sich bewusst dafür entschieden hat, bestimmte Streckenabschnitte mit einer roten Welle zu versehen. Darüber hinaus wird in vielen Fällen der öffentliche Personennahverkehr bevorzugt behandelt. So erhalten Straßenbahnen bedarfsgesteuert freie Fahrt oder Linienbusse haben eine eigene Spur und dürfen vor den anderen Verkehrsteilnehmern abbiegen. Ferner dürfen Fußgänger sowie Radfahrer und deren Routen nicht unberücksichtigt bleiben.

Außer der Auslastung der Strecke selbst ist auch die Nutzungsdichte neben der Straße zu beachten. Gibt es am Straßenrand beispielsweise eine Taxi- oder Ladezone, so ist mit einer zusätzlichen Störung des Verkehrsflusses zu rechnen. Auch Parkplätze und Tiefgaragenzufahrten beeinflussen den Ablauf des Verkehrs, da Verkehrsteilnehmer ihre Geschwindigkeit vor dem Einfahren deutlich verringern beziehungsweise mit geringerer Geschwindigkeit wieder auf die Straße zurückkehren.

Der hier gegebene Einblick in die Komplexität des Problems ist bei weitem nicht vollständig. Er zeigt aber auf, dass in der Modellierung für die Routenplanung Abstriche bezüglich Genauigkeit von Nöten sind, da für ein Netz der Größe von Deutschland oder Europa nicht alle nötigen Informationen vorliegen.

5.2 VISSIM – Multimodale Verkehrssimulation

Das PTV Vision Modul VISSIM [VI09, FV01] ist ein Programm, welches der mikroskopischen, zeitschrittorientierten und verhaltensbasierten Simulation von Stadt- und Außerortsverkehr dient. In dieser Arbeit wird VISSIM dazu verwendet motorisierten Individualverkehr an zwei geometrisch relativ einfachen Kreuzungen zu untersuchen. Zu Gunsten der Einfachheit wird dabei teilweise relativ stark von der Realität abstrahiert. VISSIM ermöglicht durch seinen großen Funktionsumfang aber durchaus die detaillierte Modellierung sehr komplexer Verkehrsknoten.

5.2.1 Modellierung

Die verwendeten, symmetrischen Kreuzungen werden jeweils durch vier Strecken und diverse Verbindungen zwischen den Strecken für die Abbiegewege modelliert. Am Beginn jeder Strecke ist ein Zufluss, welcher dafür zuständig ist die gewünschte Anzahl Fahrzeuge poissonverteilt im simulierten Zeitraum einzusetzen. Bei den Fahrzeugen handelt es sich hierbei ausschließlich um Pkws.

Auf den geraden Strecken wird die Geschwindigkeit mittels unterschiedlicher Wunschgeschwindigkeiten der Fahrzeuge variiert. Das Reduzieren der Geschwindigkeit für den Abbiegevorgang wird mit Langsamfahrbereichen modelliert. Fahrzeuge, die in einen solchen Abschnitt kommen, haben bereits vor dem Einfahrzeitpunkt bis zum vorgeschriebenen Wert abgebremst. Analog zu den mit VISSIM mitgelieferten Beispielen liegen die Geschwindigkeiten der Langsamfahrbereiche für Rechts- bzw. Linksabbieger bei 15–20 bzw. 20–25 km/h. Die bisher erwähnten Eigenschaften der modellierten Kreuzung sind in Abbildung 5.1 dargestellt.

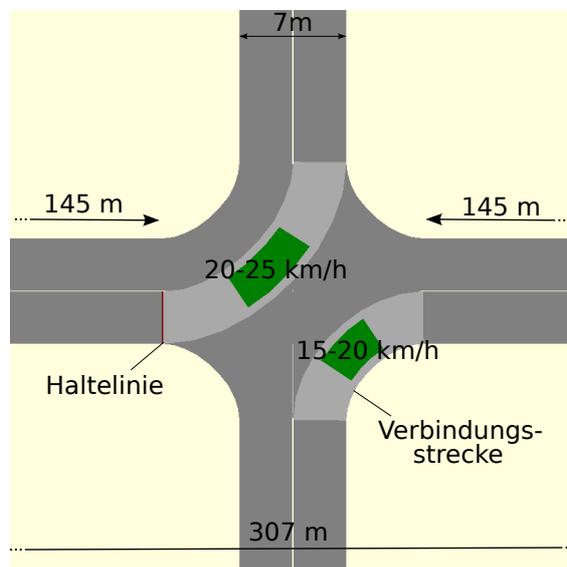


Abbildung 5.1: Aufbau der betrachteten Kreuzung. Die Strecken sind jeweils 307 m lang, wobei nach 145 m der Kreuzungsbereich mit den Verbindungsstrecken beginnt. Die Langsamfahrzonen erstrecken sich jeweils über das mittlere Drittel der Verbindungsstrecke. Insgesamt ist die Kreuzung komplett symmetrisch aufgebaut.

Für die Modellierung von Vorfahrtsregelungen existieren in VISSIM diverse Konzepte. So kann für Streckenüberlappungen, sogenannte Konfliktflächen, spezifiziert werden, auf welcher der beiden betroffenen Strecken Fahrzeuge wartepflichtig bzw. vorfahrtsberechtigt sind. Eine andere Möglichkeit ist das Definieren von Querverkehrsstörungen, welche Haltelinien generieren, an denen ein Fahrzeug auf Fahrzeuge einer anderen Strecke warten soll. Des Weiteren können diverse Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen verwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird hierfür die Beschreibungssprache VAP (VerkehrsAbhängige Programmierung) eingesetzt.

5.2.2 Simulation

Während der Simulation werden in VISSIM sogenannte Fahrer-Fahrzeug-Einheiten durch das Netz bewegt. Dabei werden die Positionen, Geschwindigkeiten und sonstige veränderliche Eigenschaften der Fahrzeuge in einer bestimmten Frequenz neu berechnet. Die Ergebnisse werden dabei online für die Animation des Verkehrsflusses genutzt sowie für spätere Auswertungen protokolliert. Abbildung 5.2 gibt einen Eindruck der 3D-Ansicht während der Simulation.



Abbildung 5.2: Simulation einer Kreuzung mit Grundsatz „Rechts vor Links“ in VISSIM

Der Verkehrsfluss wird mithilfe eines Bewegungsmodells simuliert, welches auf dem psychophysischen Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann, dessen erste Version 1974 veröffentlicht wurde, basiert [Wie74]. Die Grundidee des Modells besteht darin, dass jeder Fahrer eine individuelle Wahrnehmungsschwelle hat, ab welcher er aufgrund eines langsamer fahrenden Fahrzeugs oder eines anderen Hindernisses beginnt abzubremsen. Da er die Entfernungen und Geschwindigkeiten jedoch nicht exakt bestimmen kann, muss er anschließend eventuell wieder leicht beschleunigen um beispielsweise dem Fahrzeug im gewünschten Abstand zu folgen. Außerdem gelingt es einem Fahrer in der Realität eher selten die Gaspedalstellung und damit seine Geschwindigkeit exakt zu halten. Dadurch kommt es zu einem ständigen leichten Beschleunigen und Verzögern (physischer Anteil). Darüber hinaus hat jeder Fahrer ein individuelles Sicherheitsbedürfnis, welches den gewünschten Sicherheitsabstand beeinflusst (psychologischer Anteil). Das Bewegungsmodell wird in VISSIM mithilfe diverser Verteilungsfunktionen über Geschwindigkeits-, Beschleunigungs- und Abstandsverhalten umgesetzt.

5.3 Bestimmung der Abbiegekosten

Im weiteren Verlauf soll untersucht werden wie viel länger ein Abbiegevorgang im Vergleich zur konstanten Fahrt dauert und welche Energie dafür zusätzlich benötigt wird. Zunächst wird untersucht wie viel Energie und Zeit für eine Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit in dem zugrunde liegenden Netz benötigt wird. Anschließend wird eine unregelmäßige sowie eine signalisierte Kreuzung betrachtet und der zusätzliche Aufwand bestimmt.

5.3.1 Erwartungswerte für Zeit- sowie Energiebedarf

Im Folgenden werden Erwartungswerte ermittelt, dafür wie lange ein Fahrzeug für die simulierte Distanz benötigt und wie viel Energie dabei verbraucht wird. Der Erwartungswert soll dabei die bisherige Modellierung in der Routenplanung nach dem physikalischen Ansatz (Abschnitt 3.2) approximieren. Daher werden Fahrzeuge betrachtet, die mit möglichst konstanter Geschwindigkeit fahren, da bei der Energieberechnung im physikalischen Modell keine Beschleunigungs- sowie Verzögerungsvorgänge berücksichtigt werden.

Hierfür wird eine Simulation durchgeführt bei der weder ein Fahrzeug mit einem anderen Fahrzeug interagiert noch seine Geschwindigkeit für den Abbiegevorgang reduziert. Um dies zu erreichen werden zum einen die Langsamfahrbereiche deaktiviert und zum anderen der Zufluss pro Strecke auf exakt ein Fahrzeug pro Stunde gesetzt.

Auch wenn keine Interaktion zwischen den Fahrzeugen stattfindet, kommt es aufgrund des Bewegungsmodells zu Geschwindigkeitsänderungen. Um dabei den Einfluss des individuellen Verhaltens pro Fahrzeug-Fahrer-Kombination auf die Erwartungswerte so gering wie möglich zu halten, wird jede Abbiegerichtung für sich simuliert. Dies ist gleichbedeutend damit, dass jede Fahrzeug-Fahrer-Kombination drei Wege zurücklegt und dabei einmal rechts bzw. links abbiegt sowie einmal geradeaus fährt. Das Verhalten jeder Fahrzeug-Fahrer-Kombination ändert sich während der drei Fahrten nicht.

a) Zeit pro Fahrt

Mithilfe der entstehenden Fahrzeugprotokolle wird die Zeit ermittelt, die jedes Fahrzeug im Netz verbringt. Aufgrund des individuellen Fahrverhaltens, d.h. den etwas variierenden Grundgeschwindigkeiten sowie den leichten Brems- und Beschleunigungsvorgängen, kommt es dabei auch unter Fahrzeugen, die die gleiche Strecke zurücklegen, zu Schwankungen.

Tabelle 5.1 enthält die Werte gruppiert nach Abbiegevorgang für verschiedene Geschwindigkeiten. Dabei ist das 10%-Quantil Q_1 , das 90%-Quantil Q_9 sowie der Durchschnitt der Werte zwischen Q_1 und Q_9 aufgeführt. Der bereinigte Durchschnitt \emptyset wird im Folgenden als Erwartungswert für die Fahrtzeit abhängig von der Grundgeschwindigkeit und der Art des Abbiegevorgangs verwendet.

Die Zeiten variieren abhängig von der Richtung. Die Differenzen spiegeln dabei die unterschiedlich langen zurückgelegten Distanzen wieder. Geradeaus-Fahrer legen 307 m zurück wohingegen Rechts- bzw. Linksabbieger nur 300,4 m bzw. 305,8 m fahren müssen. Alle Fahrzeuge „fliegen“ um die Kurve, d.h. die Geschwindigkeit wird für den Abbiegevorgang nicht verringert.

Zeit [s]		30 km/h	50 km/h	70 km/h
rechts	Q_1	35,70	21,50	15,40
	\emptyset	35,96	21,63	15,49
	Q_9	36,10	21,70	15,60
gerade	Q_1	36,50	22,00	15,70
	\emptyset	36,76	22,11	15,83
	Q_9	36,90	22,20	15,90
links	Q_1	36,40	21,90	15,70
	\emptyset	36,60	22,02	15,77
	Q_9	36,70	22,10	15,80

Tabelle 5.1: Erwartungswert für die Fahrtzeiten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten – Erwartungswert \emptyset , sowie 10%-Quantil Q_1 und 90%-Quantil Q_9 . Beim Erwartungswert handelt es sich um den Durchschnitt der Werte zwischen den beiden Quantilen.

b) Energieverbrauch pro Fahrt

Während der Simulation wird für jeden Zeitschritt die Geschwindigkeit und die Beschleunigung der Fahrzeuge protokolliert. Mithilfe dieser Werte kann der Energieverbrauch nach Gleichung 5.1 bestimmt werden. Hierbei wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug eine perfekte Start-Stopp-Automatik besitzt, also im Leerlauf keine Energie verbraucht.

$$\begin{aligned}
E &= \int_0^T \frac{1}{\eta_M \eta_A} P dt \\
&= \int_0^T \frac{1}{\eta_M \eta_A} \left(f_R mg \cdot (v_0 + at) + \frac{1}{2} \rho_{LCw} A \cdot (v_0 + at)^3 + \lambda ma \cdot (v_0 + at) \right) dt \\
&= \frac{1}{\eta_M \eta_A} \left(f_r mg \cdot (v_0 T + \frac{1}{2} a T^2) \right. \\
&\quad + \frac{1}{2} \rho_{LCw} A \cdot (v_0^3 T + \frac{3}{2} v_0^2 a T^2 + v_0 a^2 T^3 + \frac{1}{4} a^3 T^4) \\
&\quad \left. + \lambda ma \cdot (v_0 T + \frac{1}{2} a T^2) \right) \tag{5.1}
\end{aligned}$$

Die Bedeutung der Abkürzungen ist wie in Kapitel 3.2. Auch die Werte für die fahrzeugspezifischen Daten sowie physikalischen Konstanten sind identisch und können Tabelle 3.3 entnommen werden. Zusätzlich dazu werden folgende Größen benötigt: Fahrzeit T , Anfangsgeschwindigkeit v_0 , konstante Beschleunigung a sowie Drehmassenzuschlagsfaktor $\lambda = 1,1$.

Die maximale Berechnungsfrequenz in VISSIM beträgt 10 Hz, d.h. jede Zehntelsekunde werden die Positionen, sowie Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Fahrzeuge berechnet. Analog dazu wird der Energieverbrauch auch für jedes Intervall der Länge 0,1 s nach Gleichung 5.1 bestimmt und die Resultate anschließend aggregiert.

Tabelle 5.2 enthält die ermittelten Werte für den berechneten Energieverbrauch pro Fahrt gruppiert nach Abbiegevorgang. Wie schon bei Tabelle 5.1 ist das 10%-Quantil, das 90%-Quantil sowie der Durchschnitt der Werte zwischen den Quantilen angegeben. Auch hier wird der bereinigte Durchschnitt \emptyset im Folgenden als Erwartungswert für den Energieverbrauch pro Fahrt abhängig von der Geschwindigkeit und der Richtung verwendet.

Die Unterschiede zwischen Geradeausfahrern und Rechts- bzw. Linksabbieger erklären sich wiederum einzig und allein durch die unterschiedlichen Streckenlängen, da in der Simulation die Geschwindigkeit wie bereits oben beschrieben für den Abbiegevorgang nicht reduziert wird. Damit soll der aktuelle Stand der Routenplanung, d.h. keine explizite Modellierung, approximiert werden.

Energie [kJ]	30 km/h	50 km/h	70 km/h
rechts Q_1	401,45	299,99	325,74
rechts \emptyset	440,35	368,59	407,23
rechts Q_9	484,41	519,80	488,24
gerade Q_1	415,70	305,15	328,08
gerade \emptyset	450,00	376,02	416,28
gerade Q_9	495,45	530,76	500,51
links Q_1	413,32	303,14	328,04
links \emptyset	448,21	374,65	414,70
links Q_9	492,24	528,35	499,00

Tabelle 5.2: Erwartungswert für den Energieverbrauch pro Fahrt gruppiert nach Abbiegevorgang bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten – Erwartungswert \emptyset , sowie 10%-Quantil Q_1 und 90%-Quantil Q_9 . Beim Erwartungswert handelt es sich um den Durchschnitt der Werte zwischen den beiden Quantilen.

5.3.2 Ungeregelte Kreuzung mit Grundsatz „Rechts-vor-Links“

Bei der ersten betrachteten Kreuzung handelt es sich um eine unregelmäßige Kreuzung, an welcher der Grundsatz „Rechts-vor-Links“ gilt. Die Vorfahrtsregelung wird durch Querverkehrsstörungen

und Konfliktflächen modelliert. Falls vier Fahrzeuge gleichzeitig an der Kreuzung sind und es so zu einer Verklemmung kommt, fährt das Fahrzeug als nächstes, das schon am längsten darauf wartet.

Im Unterschied zu Paragraph 5.3.1 soll die Kreuzung nun mit Abstrichen so real wie möglich modelliert werden. Dies bedeutet, dass die Langsamfahrbereiche aktiviert sind und so die Abbiegeschwindigkeiten reduziert werden. Ferner werden Interaktionen zwischen den Fahrzeugen nicht mehr vermieden, sondern sind erwünscht.

Da es eine Rolle spielt, wie hoch die Verkehrsbelastung ist, werden im Folgenden drei Fälle unterschieden. Zum einen wird davon ausgegangen, dass gegen Mitternacht kaum jemand unterwegs ist. Um dies zu simulieren wird der Zufluss pro Strecke auf exakt ein Fahrzeug pro Stunde gesetzt. In der Verkehrssituation „Normal“ bzw. „Stoßzeit“ wird der Zufluss an allen Streckenanfängen auf 120 bzw. 240 Fahrzeuge pro Stunde gesetzt. Die Anzahlen sind in diesem Fall nicht als exakte Werte definiert, so dass es zu stochastischen Schwankungen kommen kann. Im Durchschnitt wird alle 30 bzw. 15 Sekunden ein Fahrzeug pro Strecke eingesetzt. Die Verkehrsbelastungen sind dabei so gewählt, dass es zu keinen Staus kommt, jedoch durchaus mehrmals vor dem Überqueren der Kreuzung angehalten werden muss.

Des Weiteren wird die Kreuzung mit zwei verschiedenen Grundgeschwindigkeiten betrachtet. Das heißt, die Wunschgeschwindigkeit der Fahrzeuge wird in einem Fall auf 30 km/h und im anderen Fall auf 50 km/h gesetzt.

a) Zeit pro Abbiegevorgang

In Abbildung 5.3 sind die aus der Simulation resultierenden Abbiegezeiten gruppiert nach Abbiegevorgang für die drei beschriebenen Verkehrssituationen und zwei Grundgeschwindigkeiten dargestellt. Dabei wird für jedes Fahrzeug mithilfe der Fahrzeugprotokolle ermittelt, wie viel Zeit es im Netz verbringt. Von dem resultierenden Wert wird in Form des Erwartungswertes aus Tabelle 5.1 die Zeit abgezogen, welche nicht vom Abbiegevorgang und der Verkehrssituation abhängig ist sondern grundsätzlich zum Zurücklegen der Distanz benötigt wird. Die Ergebnisse in Tabellenform sind in Anhang B zu finden.

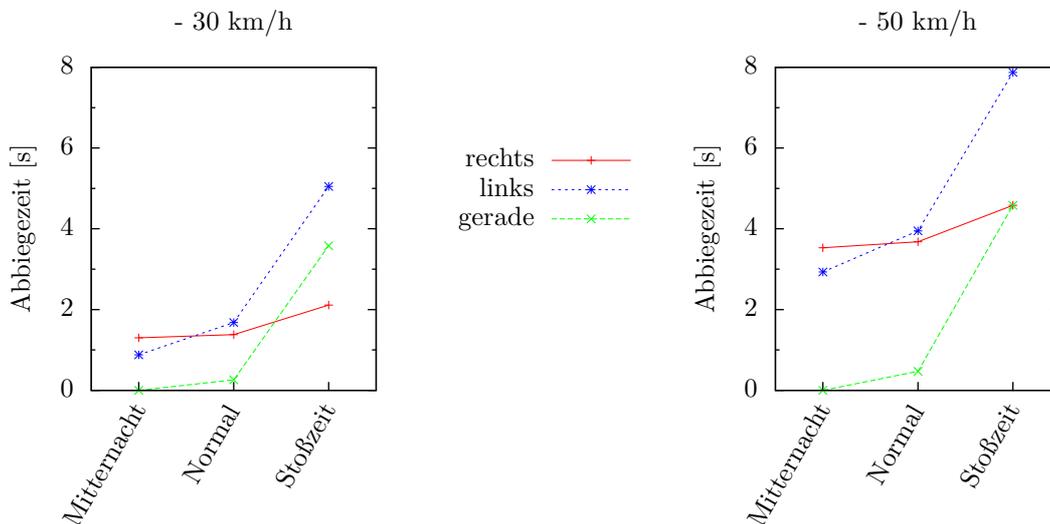


Abbildung 5.3: Durchschnittliche Abbiegezeiten an einer Kreuzung mit Vorfahrtsregelung „Rechts-vor-Links“ in verschiedenen Verkehrssituationen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Wenn kein Verkehr ist, gibt es für Geradeausfahrer im Durchschnitt keinen Unterschied, da diese im Gegensatz zu den Abbiegern nicht aufgrund von Langsamfahrbereichen ihre Geschwindigkeit

reduzieren müssen. Des Weiteren fällt der Zusatzaufwand für Rechtsabbieger größer aus als für Linksabbieger. Dies ist darin begründet, dass die Abbiegegeschwindigkeit aufgrund des geringeren Kurvenradius niedriger gewählt wird. Rechtsabbieger bremsen auf eine Geschwindigkeit von 15–20 km/h ab, wohingegen Linksabbieger mit 20–25 km/h um die Kurve fahren.

Bei größerer Verkehrsbelastung wird deutlich, dass Linksabbieger bei einer Rechts-vor-Links-geregelten Kreuzung auf die meisten Verkehrsteilnehmer warten müssen. Dies führt dazu, dass in der Stoßzeit und einer Grundgeschwindigkeit von 30 bzw. 50 km/h sich für Linksabbieger im Mittel ein Umweg von 42 bzw. 109 m lohnen würde, wenn sie dort mit konstanter Geschwindigkeit fahren könnten.

b) Energieverbrauch pro Abbiegevorgang

Abbildung 5.4 illustriert den Energieverbrauch pro Abbiegevorgang. Hierfür wurde die für die Fahrt benötigte Energie nach Gleichung 5.1 bestimmt und davon der Erwartungswert aus Tabelle 5.2 abgezogen, um nur die Energie zu erhalten, die für den Abbiegevorgang selbst notwendig ist. Anhang B enthält konkrete Zahlenwerte in Tabellenform.

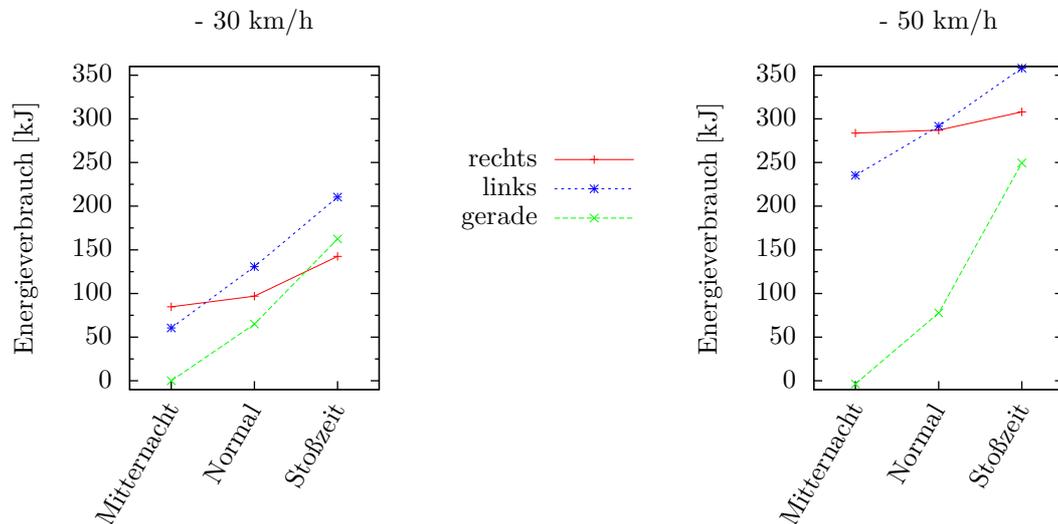


Abbildung 5.4: Durchschnittlicher Energieverbrauch pro Abbiegevorgang an einer Kreuzung mit Vorfahrtsregelung „Rechts-vor-Links“ in verschiedenen Verkehrssituationen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Der geringe Unterschied für Geradeausfahrer im Vergleich zu den Werten aus Abschnitt 5.3.1 in der Verkehrssituation Mitternacht ist durch das individuelle Fahrverhalten der simulierten Fahrzeuge bedingt. Bei einer Grundgeschwindigkeit von 30 km/h fällt die Differenz für Rechts- und Linksabbieger relativ gering aus, wobei der zusätzliche Energiebedarf von Rechtsabbiegern größer als der von Linksabbiegern ist. Dies hängt wiederum mit den unterschiedlichen Abbiegegeschwindigkeiten zusammen.

Bei einer Belastung von 120 Fahrzeugen pro Stunde und Strecke entspricht der zusätzliche Energieverbrauch von Linksabbiegern bei einer Grundgeschwindigkeit von 30 bzw. 50 km/h einer Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit über die Distanz von 45 bzw. 102 m. Der Zusatzaufwand von Rechtsabbiegern fällt geringer aus, da diese öfters ohne anzuhalten abbiegen können als Linksabbieger, jedoch zum Abbiegen auch abbremesen müssen.

Bei größerer Verkehrsbelastung und einer Grundgeschwindigkeit von 30 bzw. 50 km/h haben Linksabbieger einen zusätzlichen Energieverbrauch von 210 bzw. 358 kJ. Dies bedeutet, dass sich

ein Umweg von knapp 74 bzw. 209 m lohnen würde, wenn auf diesem keinerlei Geschwindigkeitsveränderungen notwendig wären.

5.3.3 Signalisierte Kreuzung

Als zweite Kreuzung wird eine Kreuzung mit bedarfsgesteuerter Signalisierung und zwei Signalgruppen betrachtet. Jeweils die gegenüberliegenden Verkehrsteilnehmer gehören dabei einer Signalgruppe an und haben daher gleichzeitig rot bzw. grün. Dabei findet keine Unterscheidung zwischen Links-, Rechtsabbiegern und Geradeausfahrern statt. Dies bedeutet, dass alle Richtungen zur gleichen Zeit fahren dürfen und auf die anderen Verkehrsteilnehmer Rücksicht nehmen müssen. Speziell Linksabbieger müssen den Gegenverkehr passieren lassen.

Die Ampel schaltet, wenn einerseits Bedarf für die wartepflichtige Signalgruppe besteht und andererseits entweder für die aktuell vorfahrtsberechtigzte Signalgruppe kein Bedarf mehr besteht oder die Grünzeit schon 60 Sekunden andauert.

Wie schon in Abschnitt 5.3.2 werden im Folgenden die Verkehrssituationen Mitternacht (je Zufluss 1 Fzg/h), Normal (je Zufluss 120 Fzg/h) und Stoßzeit (je Zufluss 240 Fzg/h) betrachtet. Die Belastungen pro Strecke sind dabei so gewählt, dass es zu keinen Staus kommt und jeder Verkehrsteilnehmer bei der ersten für ihn geltenden Grünphase die Kreuzung überqueren kann. Darüber hinaus betragen die gewählten Grundgeschwindigkeiten 50 bzw. 70 km/h.

a) Zeit pro Abbiegevorgang

Abbildung 5.5 stellt die aus der Simulation resultierenden Werte für die Abbiegezeiten gruppiert nach Abbiegevorgang dar. Wie schon in Abschnitt 5.3.2 werden von den aus dem Fahrzeugprotokoll ermittelten Werten der Erwartungswert nach Tabelle 5.1 abgezogen. Anhang B enthält das Ergebnis in tabellarischer Form.

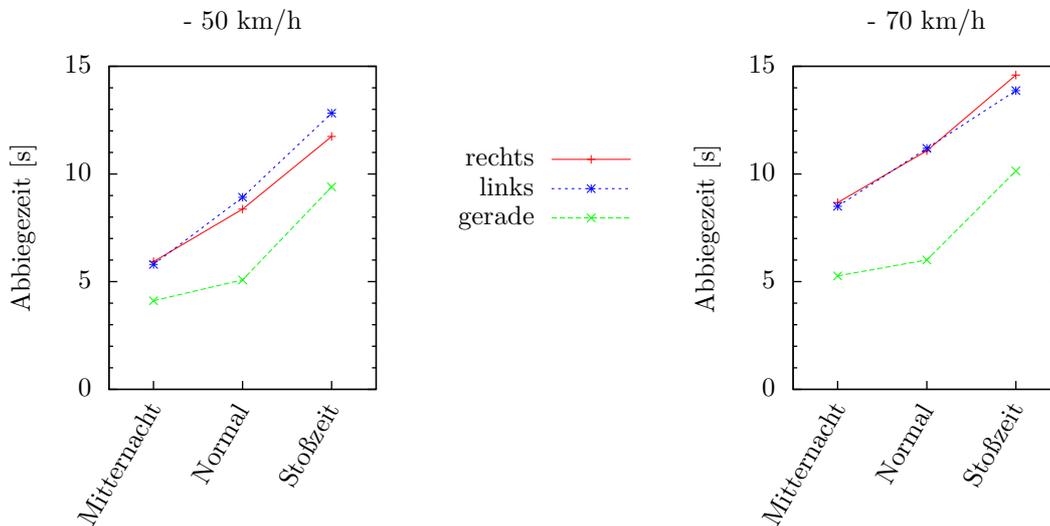


Abbildung 5.5: Abbiegezeiten an einer bedarfsgesteuert signalisierten Kreuzung mit zwei Signalgruppen in verschiedenen Verkehrssituationen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Generell ergibt sich für alle Abbiegevorgänge und alle Verkehrssituationen durchschnittlich ein zusätzlicher Zeitbedarf durch die Signalisierung. In der Verkehrssituation Mitternacht ist dieser für Rechts- und Linksabbieger annähernd gleich. Bei Geradeausfahrern fällt die Differenz deutlich geringer aus, da diese im Optimalfall ihre Geschwindigkeit nicht reduzieren müssen.

Vor allem zu Stoßzeiten würden sich Umwege lohnen, wenn man dadurch seine Geschwindigkeit konstant beibehalten könnte. So könnten Linksabbieger beispielsweise im Mittel 178 bzw. knapp 270 m bei einer konstanten Geschwindigkeit von 50 bzw. 70 km/h in der Zeit, die sie durch das Überqueren der Kreuzung länger benötigen, zurücklegen. In der Verkehrssituation Normal sind durchschnittliche Umwege von knapp 124 bzw. 218 m möglich. Auch für Rechtsabbieger ist bei größerer Verkehrsbelastung der zusätzliche Zeitbedarf so hoch, dass sich als Alternative zum Durchfahren der Kreuzung Umwege mit konstanter Geschwindigkeit von bis zu 163 bzw. 283 m ergeben.

b) Energieverbrauch pro Abbiegevorgang

Abbildung 5.6 präsentiert die Ergebnisse aus der Simulation für den Energieverbrauch gruppiert nach Abbiegevorgang für die drei Verkehrssituationen und zwei Grundgeschwindigkeiten. Der Energieverbrauch wird dabei nach Gleichung 5.1 berechnet und die Differenz zum Erwartungswert aus Tabelle 5.2 gebildet. Konkrete Zahlenwerte hierzu sind wiederum in Anhang B enthalten.

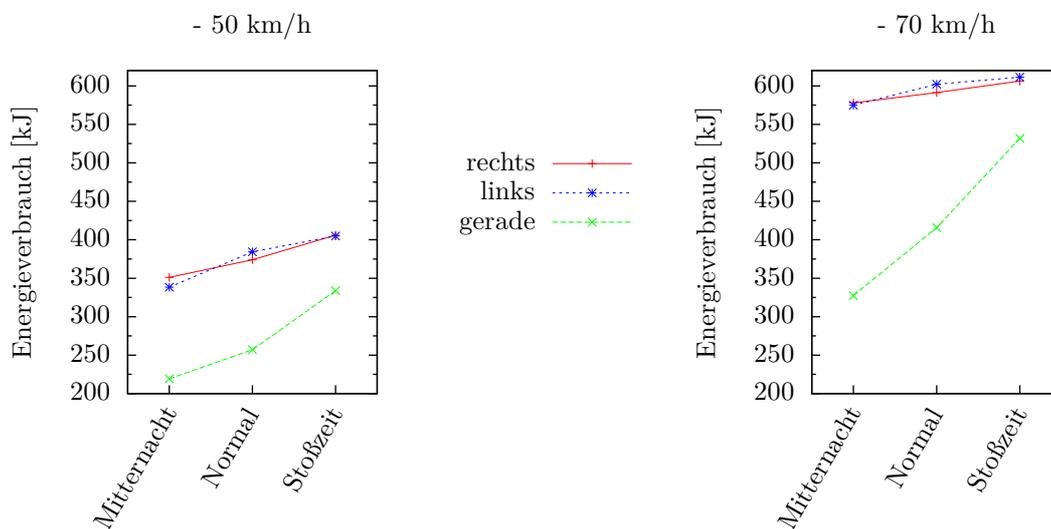


Abbildung 5.6: Energieverbrauch pro Abbiegevorgang an einer bedarfsgesteuert signalisierten Kreuzung mit zwei Signalgruppen in verschiedenen Verkehrssituationen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

An einer signalisierten Kreuzung entstehen für alle Verkehrsteilnehmer unabhängig vom Abbiegevorgang und der Grundgeschwindigkeit deutliche Zusatzaufwände. So müssen Geradeausfahrer mindestens 219 kJ mehr Energie aufbringen. Bei Rechts- bzw. Linksabbiegern beträgt die Differenz sogar mindestens 338 bzw. 351 kJ.

Die Differenzen für Geradeausfahrer fallen wie schon bei den Abbiegezeiten am geringsten aus. Dies liegt daran, dass diese im Optimalfall ihre Geschwindigkeit nicht verringern müssen, sondern die Kreuzung mit konstanter Geschwindigkeit überqueren können.

Des Weiteren wird deutlich, dass der Einfluss der Belastung bei einer signalisierten Kreuzung auf den Energieverbrauch eher gering ist, wenn der Verbrauch im Leerlauf gleich Null ist. So liegen die durchschnittlichen Werte für den Energieverbrauch von Rechts- und Linksabbiegern in den Verkehrssituationen Normal und Stoßzeit nicht weit auseinander.

Abbieger können bei mittlerer bis starker Verkehrsbelastung einen Umweg von etwa 234 bzw. 454 m (entspricht 400 bzw. 600 kJ) als Alternative zum Überqueren der signalgesteuerten Kreuzung in Erwägung ziehen, wenn sie auf diesem Umweg konstant 50 bzw. 70 km/h fahren können. Selbst für Geradeaus-Fahrer würde sich bei der Verkehrssituation Normal ein Umweg von 150 bzw. 315 m

bei konstanter Geschwindigkeit bezüglich des Energieverbrauchs rechnen. Selbst der zusätzliche durchschnittliche Energieverbrauch, wenn kein Verkehr ist, beläuft sich wie bereits erwähnt auf knapp 219 kJ. Dieser Wert entspricht dem Energieverbrauch einer Fahrt von etwa 128 m Distanz mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 km/h.

5.3.4 Signalisierte vs. unregelte Kreuzung

Sowohl die unregelte Kreuzung in Paragraph 5.3.2 als auch die signalisierte Kreuzung in Paragraph 5.3.3 wird mit einer Grundgeschwindigkeit von 50 km/h simuliert. Folglich lassen sich die Ergebnisse gut vergleichen.

Abbildung 5.7 illustriert die Differenzen zwischen einer signalisierten Kreuzung und einer unregelmäßigten Kreuzung mit Grundsatz „Rechts-vor-Links“. Dabei werden sowohl die Abbiegezeiten als auch der Energiebedarf für den Abbiegevorgang betrachtet.

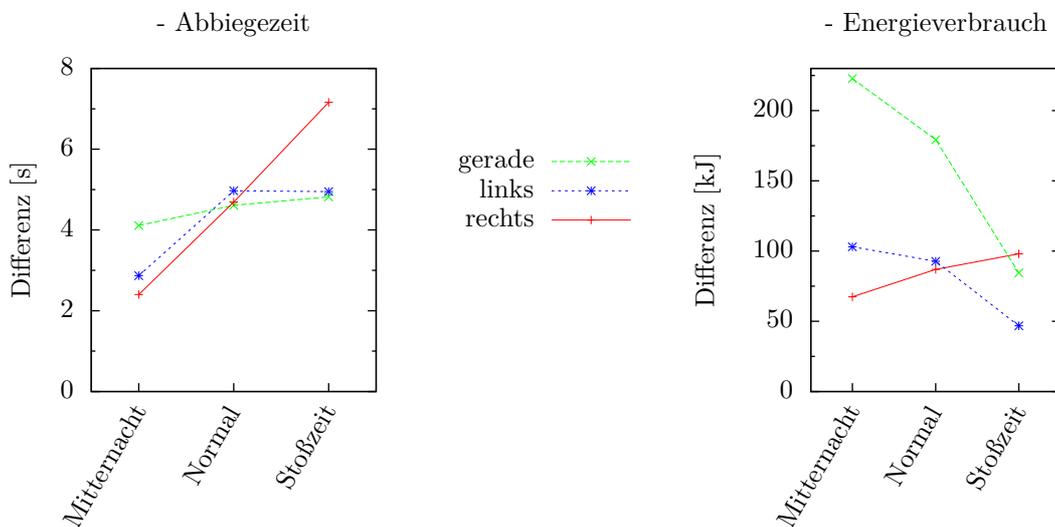


Abbildung 5.7: Vergleich in verschiedenen Verkehrssituationen bei einer Grundgeschwindigkeit von 50 km/h

Unabhängig von der Verkehrssituation und dem Abbiegevorgang ergeben sich für Autofahrer an einer signalisierten Kreuzung durchschnittlich höhere Aufwände als an einer unregelmäßigten Kreuzung.

Die Zeitdifferenz bei Rechtsabbiegern zeigt, dass diese bei einer signalisierten Kreuzung deutlich häufiger anhalten müssen als bei einer unregelmäßigten Kreuzung, an der sie in der Regel ungehindert abbiegen können. Auch die Wahrscheinlichkeit für Geradeausfahrer die Kreuzung mit konstanter Geschwindigkeit überqueren zu können, fällt bei einer signalisierten geringer als bei einer unregelmäßigten Kreuzung aus. Dies schlägt sich in längere Abbiegezeiten und einen höheren Energieverbrauch nieder.

Der Unterschied zwischen den Kreuzungen bezüglich Energieverbrauch fällt bei den Abbiegern deutlich geringer aus als bei den Geradeausfahrern, da diese für den Abbiegevorgang ihre Geschwindigkeit grundsätzlich verringern. Dennoch macht es offensichtlich einen Unterschied, ob bis zum Stillstand oder bis zum Erreichen einer bestimmten Geschwindigkeit abgebremst wird. Auch an dieser Stelle wirkt sich aus, dass an einer Kreuzung mit Signalanlage mit höherer Wahrscheinlichkeit angehalten werden muss.

Obwohl signalisierte Kreuzungen für Autofahrer mehr Aufwand bedeuten, gibt es in Städten viele Knotenpunkte, die mit Lichtsignalanlagen geregelt sind. Diese müssen also auch Vorteile

bieten. Nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung [VwV98] sind Ampeln für den Fahrverkehr an Kreuzungen und Einmündungen erforderlich,

- wenn es aufgrund mangelnder Übersicht immer wieder zu Unfällen kommt und es nicht möglich ist die Situation beispielsweise durch das Schneiden von Bäumen zu verbessern oder den kreuzenden bzw. einmündenden Verkehr zu verbieten oder
- wenn es wiederholt zu Vorfahrtsverletzungen kommt, ohne dass dies auf schlechte Erkennbarkeit der Kreuzung oder mangelnde Verständlichkeit der Vorfahrtsregelung zurückzuführen ist oder
- wenn auf einer der betroffenen Straßen, der Verkehr zeitweise so stark ist, dass sich in den wartepflichtigen Kreuzungszufahrten ein großer Rückstau bildet oder zumindest einzelne Wartepflichtige unzumutbar lange warten müssen.

Lichtsignalanlagen sollen also einerseits der Sicherheit dienen und andererseits zu hohe Wartezeiten an Kreuzungen vermeiden. Diese Aussage wird von den in [Bos07] genannten Vor- und Nachteilen der unterschiedlichen Kreuzungstypen bestätigt. Demnach hat eine unregelmäßige Kreuzung mit Grundsatz „Rechts-vor-Links“ unter anderem den Nachteil, dass Unfälle wegen zu hoher Geschwindigkeiten oder falschem Eindruck der Vorfahrtregelung entstehen können. Des Weiteren entstehen Zeitverluste für den ÖPNV, für welchen keine Bevorrechtigung möglich ist. Ferner sind Fußgänger beim Überqueren der Fahrbahn nicht gesichert. Im Gegensatz dazu hat eine signalisierte Kreuzung folgende Vorteile: gesicherte Führung von Fußgängern, Möglichkeit den öffentlichen Personennahverkehr zu bevorzugen und Grüne Wellen einzurichten sowie eine hohe Kapazität. Darüber hinaus ermöglichen Lichtsignalanlagen eine Optimierung des Verkehrsablaufs sowie der Sicherheit. Auf der anderen Seite haben sie aber auch Nachteile, wie beispielsweise die Tatsache, dass Grünsignale zu überhöhten Geschwindigkeiten führen und somit die Sicherheit verringern können.

5.4 Abbiegekosten in der Routenplanung

Der vorangegangene Abschnitt zeigt, dass die Mehrkosten bezüglich Zeit und Energie pro Kreuzung je nach Verkehrssituation und Vorfahrtsregelung erheblich sind. Dadurch, dass im Normalfall nicht nur eine Kreuzung, sondern eine Reihe von Kreuzungen auf einer Route durch die Stadt liegen, ist es durchaus realistisch anzunehmen, dass die Berücksichtigung von Abbiegekosten in der Routenplanung einen Effekt auf die entstehenden Routen hat.

Durch den zusätzlichen Aufwand, der durch das Überqueren einer Kreuzung entsteht, rechnen sich pro Kreuzung Umwege von bis zu 450 m als Alternative. Angenommen man durchfährt bei normaler Verkehrsbelastung eine 30er-Zone, da dies der kürzeste Weg ist, und überquert dabei jede Kreuzung in gerader Richtung, so ergibt sich pro Kreuzung ein zusätzlicher Energieverbrauch von 65 kJ, welcher einen Umweg von knapp 23 bzw. 38 m bei einer konstanten Geschwindigkeit von 30 bzw. 50 km/h rechtfertigt. Anstatt fünf Kreuzungen auf diese Art und Weise zu passieren, könnte man bezüglich des Energieverbrauchs eine Distanz von etwa 114 bzw. 190 m bei gleichbleibender Geschwindigkeit zurücklegen. Diese Rechnung zeigt, dass der kürzeste Weg bei Berücksichtigung von Abbiegekosten nicht die energieeffizienteste Alternative darstellt.

In der Routenplanung können Abbiegekosten mithilfe einer Klassifizierung der Knoten des Graphs eingesetzt werden. Durch die Zuordnung jedes Knotens zu einer Klasse von Verkehrsknoten unter Beachtung der vom Knoten ein- oder ausgehenden Segmente ist es möglich sowohl den zusätzlichen Zeitbedarf als auch Energieverbrauch während des Routings zu berücksichtigen. Hierfür muss von jeder Klasse ein Repräsentant in VISSIM modelliert und simuliert werden, um die Kosten wie in Abschnitt 5.3 zu bestimmen.

Die Anzahl der Klassen hängt dabei vom gewünschten Genauigkeitsgrad ab und wäre bei einer exakten Modellierung gleich der Anzahl von Knoten im Graph. Je nach Abstraktionsgrad findet beispielsweise eine Unterscheidung zwischen Kreuzungen mit ÖPNV-Beteiligung und solchen ohne statt. Des Weiteren ist es denkbar bei entsprechender Datenlage auch den Einfluss von

Fußgängern und Radfahrern zu simulieren. Auf jeden Fall muss die Anzahl beteiligter Strecken an einem Verkehrsknoten beachtet werden. So wurde bei beiden betrachteten Beispielen davon ausgegangen, dass vier Strecken an einem Punkt zusammentreffen. Dies trifft in der Realität aber nur auf einen Teil der Kreuzungen zu. Wie die Ergebnisse in Paragraph 5.3.4 deutlich machen bestehen zwischen unregelten und signalisierten Kreuzungen teilweise erhebliche Unterschiede. Es ist also unerlässlich die Vorfahrtsregelung so realistisch wie möglich umzusetzen. Ferner spielt auch die Verkehrsbelastung eine große Rolle. In Abschnitt 5.1 sind weitere Aspekte aufgeführt, deren Berücksichtigung zu genaueren Ergebnissen führt.

Die Kosten können jedoch nicht wie bisher einem Segment zugewiesen werden, da sie immer von Segmentfolgen der Mindestlänge zwei abhängen. Dies kann mit der aktuellen Graphstruktur und dem verwendeten Algorithmus nicht umgesetzt werden. [Vol08] beschreibt wie das entstandene Problem algorithmisch gelöst werden kann. Dabei wird die Definition der Kosten offen gehalten, so dass Werte, die analog zu Abschnitt 5.3 ermittelt werden, verwendet werden können.

6 Schlussbemerkungen

Neben einem kurzen Überblick über die Inhalte und Ergebnisse dieser Arbeit (Abschnitt 6.1) enthält dieses Kapitel einen Ausblick, in welche Richtung Arbeiten im Bereich energieeffizienter Routen gehen können und an welchen Stellen noch Schwächen zu beheben sind (Abschnitt 6.2).

6.1 Überblick

Diese Arbeit stellt einen ersten wichtigen Schritt im Bereich der Planung energieeffizienter Routen in Straßennetzwerken dar. Energieeffiziente Routen können sowohl zu Kraftstoff- als auch zu Kosteneinsparungen beitragen.

Modelle zur Energieverbrauchsberechnung

In Kapitel 3 wurden mit dem verbrauchsbasierten Ansatz auf der einen und dem physikalischen Ansatz auf der anderen Seite zwei Modelle definiert, welche der Berechnung des Energieverbrauchs für das Befahren eines Straßensegments durch ein Fahrzeug dienen. Die Frage, ob man sich zukünftig auf den verbrauchsbasierten oder den physikalischen Ansatz konzentrieren sollte, hängt von der jeweiligen Anwendung ab. Beide Ansätze haben sowohl Vor- als auch Nachteile.

Das verbrauchsbasierte Modell basiert auf Daten aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [HBEFA]. In dieser Arbeit werden relativ wenige Werte aus der Datenbank verwendet, so dass sich noch Möglichkeiten zur Verfeinerung des Modells bieten. Darüber hinaus ist der Ansatz relativ einfach auf andere Fahrzeugtypen anwendbar.

Im physikalischen Modell wird der Energieverbrauch über den zu überwindenden Fahrzeugwiderstand bestimmt. Dafür müssen die Wirkungsgrade explizit bekannt sein, was dazu führt, dass der Ansatz nur schwer auf andere Fahrzeugtypen verallgemeinerbar ist. Dafür sind beim physikalischen Ansatz alle Eingangsgrößen explizit bekannt, so dass eventuell eine höhere Genauigkeit erreicht werden kann.

Evaluierung der Modelle

Die Ergebnisse dieser Arbeit in Kapitel 4 zeigen, dass es durchaus lohnenswert ist sich mit dem Thema „Planung energieeffizienter Routen in Straßennetzwerken“ zu beschäftigen. Die Evaluierung der Modelle erfolgte anhand von verschiedenen Testdatensätzen und unterschiedlichen Priorisierungen zwischen Fahrtzeit und Energieverbrauch durch einen variierenden Stundenlohn. Im Mittel fallen die Differenzen in den meisten durchgeführten Vergleichen eher gering aus. Es hat daher häufig den Anschein, als ob sich eine explizite Optimierung nach dem betrachteten Modell nicht lohnen würde. Jedoch lassen sich immer sehr interessante Beispiele finden, die ein großes Energie- und Kosteneinsparungspotential aufzeigen.

Eine allgemeingültige Beschreibung für den Verlauf energieeffizienter Routen konnte in dieser Arbeit nicht gefunden werden. Tipps wie „Fahre besser Autobahn als Bundesstraße“ oder „Nutze grundsätzlich vorhandene Umgehungsstraßen“ konnten nicht belegt werden. Der Routenverlauf hängt einerseits vom gewählten Modell zur Energieverbrauchsberechnung und andererseits vom angesetzten Stundenlohn, also der Gewichtung Fahrtzeit zu Energieverbrauch, ab.

Bei der Analyse des verbrauchsbasierten Modells wird deutlich, dass die Verwendung von differenzierten Verbrauchswerten zu einer starken Vermeidung von Autobahnen sowie Schnellstraßen führt. Die Differenzierung scheint noch zu ungenau. Dieses Problem kann jedoch durch die Verwendung weiterer Werte aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [HBEFA]

behoben oder zumindest abgeschwächt werden. Bei der Untersuchung, welchen Einfluss Höheninformationen im verbrauchsbasierten Ansatz haben, wird das Beispiel aus der Einleitung (Kapitel 1) wieder aufgegriffen. Die Routenverläufe in Abbildung 4.6 zeigen, dass die Berücksichtigung von Höhendaten dazu führen kann, dass Mittelgebirge wie der Schwarzwald umfahren werden.

Fahrten in der Gegend um die Schwarzwaldhochstraße sind ein gutes Beispiel, welche einerseits den Effekt von Höhendaten sowie den Einfluss von Rekuperation im physikalischen Modell auf den Routenverlauf zeigen. Ohne Berücksichtigung von Höheninformationen spricht nichts dagegen die B 500 an dieser Stelle zu nutzen und die Höhenmeter zur Schwarzwaldhochstraße zu überwinden. Wenn jedoch Gefälle sowie Steigungen in die Berechnung des Energieverbrauchs mit einfließen wird die Schwarzwaldhochstraße soweit möglich vermieden (Abbildung 4.7). Wenn man hingegen annimmt, dass das zugrunde liegende Fahrzeug alle Voraussetzungen für Rekuperation erfüllt, führt die Route trotz der auftretenden Höhenunterschiede wieder durch die Höhenlagen des Schwarzwalds (Abbildung 4.8).

Da im physikalischen Ansatz die Geschwindigkeit explizit in die Berechnung des Energieverbrauchs mit eingeht, lässt sich mit diesem Modell der Effekt von reduzierten Geschwindigkeiten evaluieren. Die Ergebnisse in Abschnitt 4.5 zeigen, dass es sich vor allem aus Sicht des Energieverbrauchs aber auch aus betriebswirtschaftlichen Gründen lohnt langsamer zu fahren. Wenn die maximale Geschwindigkeit auf 110 km/h beschränkt wird, was der kostenoptimalen Geschwindigkeit bei einem Stundenlohn von 5€ entspricht, so können bei Langstrecken im Schnitt knapp 8,2 % Energie eingespart werden. Die Kosteneinsparung liegt bei immerhin 0,8 %. Ob die Einsparungen in der Realität auch in dieser Größenordnung liegen, müsste noch durch Testfahrten bestätigt werden. Jedoch zeigt die Reduzierung der Reisegeschwindigkeit auf jeden Fall ein großes Einsparungspotential.

Der Vergleich mit herkömmlichen Routen, welche 20 % nach Distanz und 80 % nach Fahrtzeit optimiert sind, zeigt, dass diese im Allgemeinen nicht die energieeffizienteste Alternative darstellen. Im Mittel fallen die relativen Differenzen jedoch sehr gering aus, da die Priorisierung der Fahrtzeit den Routenverlauf entscheidend bestimmt. Aber auch hier existieren interessante Anfragen, die sich beispielsweise mit einer Einsparung von über 2€ deutlich von der Masse abheben (Abbildung 4.13).

Auch wenn sich für einen Großteil der Anfragen in der Praxis aufgrund der Zeitpriorisierung eine explizite Optimierung nach Energieverbrauch nicht zu lohnen scheint, ist eine Umsetzung der in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze durchaus erstrebenswert. Erstens kann man nur von energieeffizienten Routen sprechen, wenn man diese auch explizit berechnet und das Interesse am Thema „grüne“ Logistik ist aktuell größer denn je zuvor. In Zukunft werden Aspekte wie CO₂-neutrale Transporte, emissionsabhängige Abgaben und Energieverbrauch eine immer größere Rolle spielen. Folglich sind energieeffiziente Routen nicht nur aus umweltpolitischer sondern auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht interessant. So kann nicht nur die Umweltbelastung sowie der Energieverbrauch gesenkt werden, sondern gleichzeitig können zusätzlich dazu auch Kosten eingespart werden.

Innerstädtischer Verkehr

In Kapitel 5 wurde beschrieben wie innerstädtischer Verkehr im physikalischen Modell mithilfe von Abbiegekosten explizit modelliert werden und somit ein Manko des physikalischen Ansatzes behoben werden kann. Die ermittelten Mehrkosten bezüglich Zeit und Energie pro Kreuzung fallen je nach Verkehrssituation und Vorfahrtsregelung deutlich aus. Beispielsweise kann man statt fünf unregelmäßige Kreuzungen in gerader Richtung bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h zu überqueren, bei normaler Verkehrsbelastung einen Umweg von 114 m bei einer konstanten Geschwindigkeit von 30 km/h bzw. sogar 190 m bei 50 km/h zurücklegen. Das Vermeiden von Brems- und Beschleunigungsvorgängen wirkt sich also deutlich auf den Energieverbrauch aus.

6.2 Zukünftige Aufgaben

Der grundsätzliche Ansatz der Energieverbrauchsberechnung weist an sich keine Schwächen auf. Jedoch haben beide in Kapitel 3 vorgestellten Modelle einige Schwachstellen und Mankos.

Im verbrauchsbasierten Ansatz wird nur ein Bruchteil der Daten des Handbuchs für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [HBEFA] genutzt. Die Evaluierung der Modelle lässt vermuten, dass die Differenzierung zu wenig detailliert ausfällt. Durch die Verwendung verschiedener Verkehrssituationen pro Straßenkategorie abhängig von der Geschwindigkeit statt eines Durchschnittswertes könnte die Modellierung um einiges verfeinert werden. Darüber hinaus gibt es noch weitere Werte, die aktuell nicht berücksichtigt werden und zu genaueren Ergebnissen führen könnten.

Eines der größten Mankos des physikalischen Ansatzes ist die Nichtberücksichtigung von Beschleunigung sowie Verzögerung, welche ins verbrauchsbasierte Modell immerhin implizit eingehen. So wird davon ausgegangen, dass jedes Segment mit konstanter Geschwindigkeit befahren wird. Des Weiteren werden Geschwindigkeitswechsel zwischen Segmenten außer Acht gelassen. Diese sollten auf jeden Fall in naher Zukunft in die Energieverbrauchsberechnung mit eingehen. Darüber hinaus muss untersucht werden, ob die rechnerische Geschwindigkeit aus den Daten, die zuvor ausschließlich der Bestimmung der Fahrzeit diene, auch für die Berechnung des Energieverbrauchs geeignet ist oder ob sich bessere Alternativen bieten, die die Qualität des Modells verbessern könnten.

Ferner wird der innerstädtische Verkehr im verbrauchsbasierten Modell nur implizit und im physikalischen Modell überhaupt nicht modelliert. In Kapitel 5 wurde aufgezeigt, dass dies eine Schwachstelle darstellt. Dort wurde auch ein Konzept vorgestellt, dessen Umsetzung das Manko im physikalischen Modell beheben wird. Dieses muss zunächst weiter verfeinert werden, bevor es in der Praxis Anwendung finden kann.

Ein Problem beider Modelle ist die Festlegung auf ein bestimmtes Fahrzeug in dieser Arbeit. So wurde jeweils ein Audi A3 2.0 TDI simuliert. In Anwendungen ist es jedoch unerlässlich auch andere Fahrzeugtypen zu betrachten. Dafür müssen bei dem verbrauchsbasierten Ansatz weitere Werte aus [HBEFA] verwendet sowie für den physikalischen Ansatz die Wirkungsgrade entsprechend modelliert werden. Anschließend können die Ergebnisse dieser Arbeit auch im Logistikbereich eingesetzt werden, welcher mit Sicherheit ein großes Energie- und Kosteneinsparungspotential aufweist.

Außerdem wird in beiden Modellen das individuelle Fahrverhalten nicht berücksichtigt. Jedoch hängt der Energieverbrauch, welcher von frühen Schaltvorgängen sowie einer konstanten Fahrweise positiv beeinflusst wird, davon sehr stark ab. Auf den Kraftstoffverbrauch wird in der Realität unter Umständen nicht in ausreichendem Maß geachtet, so dass hier Differenzen zur Modellierung auftreten. Anstatt von einer energieeffizienten Fahrweise auszugehen, wäre es denkbar verschiedene Fahrerprofile zu betrachten.

Als letzter Punkt seien noch Testfahrten genannt. Diese sind angebracht, um die Korrektheit der hier vorgestellten Modelle zu unterstreichen. Auch wenn es unrealistisch ist die theoretischen Energieverbräuche exakt nachstellen zu können, so sollten doch die energieeffizientesten Routen einen ähnlichen Verlauf wie die berechneten Routen haben.

Literaturverzeichnis

- [AGE09] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. *Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2008 - Berechnungen auf Basis des Wirkungsgradansatzes* [Sept. 2009].
- [BAG09] Bundesamt für Güterverkehr. *Marktbeobachtung Güterverkehr – Monitoring der Arbeitsbedingungen in Güterverkehr und Logistik 2009-I* [Sept. 2009].
- [BAY⁺99] Barth, M.; An, F.; Younglove, T.; Scora, G.; Levine, C.; Ross, M. und Wenzel, T. *The development of a comprehensive modal emissions model*. Final report to the National Cooperative Highway Research Program [Nov. 1999].
- [BBV07] Barth, M.; Boriboonsomsin, K. und Vu, A. *Environmentally-Friendly Navigation*. In *Intelligent Transportation Systems Conference, 2007. ITSC 2007. IEEE*, 684–689 [Okt. 2007].
- [BE05] Brundell-Freij, K. und Ericsson, E. *Influence of street characteristics, driver category and car performance on urban driving patterns*. In *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 10[2005](3):213–229.
- [Bel58] Bellman, R. *On a Routing Problem*. In *Quarterly of Applied Mathematics*, Bd. 16[1958]:87–90.
- [BFSS07] Bast, H.; Funke, S.; Sanders, P. und Schultes, D. *Fast Routing in Road Networks using Transit Nodes*. In *Science*, Bd. 316[2007](5824):566.
- [Bos07] Bosserhoff, D. *Handbuch für Verkehrssicherheit und Verkehrstechnik*, Kap. 4.1. Schriftenreihe der Hessischen Straßen- und Verkehrsverwaltung ; 53,2. Hessisches Landesamt für Straßen- u. Verkehrswesen, Wiesbaden [2007].
- [Dan63] Dantzig, G. B. *Linear Programming and Extensions*. Princeton University Press, Princeton, N.J. [Aug. 1963].
- [Dij59] Dijkstra, E. W. *A Note on Two Problems in Connexion with Graphs*. In *Numerische Mathematik*, Bd. 1[1959]:269–271.
- [DSSW09] Delling, D.; Sanders, P.; Schultes, D. und Wagner, D. *Engineering Route Planning Algorithms*. In *Algorithmics of Large and Complex Networks: Design, Analysis, and Simulation*, 117–139. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg [2009].
- [ELB06] Ericsson, E.; Larsson, H. und Brundell-Freij, K. *Optimizing route choice for lowest fuel consumption Potential effects of a new driver support tool*. In *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 14[2006]:369–383.
- [For56] Ford, L. R. *Network flow theory*. Techn. Ber. P-923, The Rand Corporation, Santa Monica [1956].
- [FRC⁺07] Farr, T. G.; Rosen, P. A.; Caro, E.; Crippen, R.; Duren, R.; Hensley, S.; Kobrick, M.; Paller, M.; Rodriguez, E.; Roth, L.; Seal, D.; Shaffer, S.; Shimada, J.; Umland, J.; Werner, M.; Oskin, M.; Burbank, D. und Alsdorf, D. *The Shuttle Radar Topography Mission*. In *Review of Geophysics*, Bd. 45[2007].

- [FT87] Fredman, M. L. und Tarjan, R. E. *Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms*. In *J. ACM*, Bd. 34[1987](3):596–615.
- [FV01] Fellendorf, M. und Vortisch, P. *Validation of the Microscopic Traffic Flow Model VIS-SIM in Different Real-World Situations*. In *Transportation Research Board Annual Meeting Compendium of Papers* [2001].
- [Gei08] Geisberger, Robert. *Contraction Hierarchies: Faster and Simpler Hierarchical Routing in Road Networks*. Diplomarbeit, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH) [2008].
- [GSSD08] Geisberger, R.; Sanders, P.; Schultes, D. und Delling, D. *Contraction Hierarchies: Faster and Simpler Hierarchical Routing in Road Networks*. In McGeoch, C. [Hrsg.], *WEA, Lecture Notes in Computer Science*, Bd. 5038, 319–333. Springer [2008].
- [Hak08] Haken, K.-L. *Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik : mit 36 Tabellen*. Fahrzeugtechnik. Hanser, München [2008].
- [HBEFA] INFRAS. *Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 2.1*. URL <http://www.hbefa.net>.
- [HK04] de Haan, P. und Keller, M. *Modelling fuel consumption and pollutant emissions based on real-world driving patterns: the HBEFA approach*. In *International Journal of Environment and Pollution*, Bd. 22[2004]:240–258.
- [Huc05] Hucho, W.-H. [Hrsg.]. *Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort*. ATZ-MTZ-Fachbuch, 5., völlig neu bearb. und erw. Aufl. Vieweg, Wiesbaden [2005].
- [KH04] Keller, M. und de Haan, P. *Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 2.1 – Dokumentation* [Juli 2004].
- [Kob10] Kobitzsch, Moritz. *Route Planning with Flexible Objective Functions*. Diplomarbeit, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH) [2010].
- [KV08] Korte, B. und Vygen, J. *Kombinatorische Optimierung : Theorie und Algorithmen*. Springer, Berlin [2008].
- [MiD02] infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH; Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW). *Tabellenband – Mobilität in Deutschland* [Juli 2003].
- [Moo59] Moore, E. F. *The shortest path through a maze*. In *Proceedings of the International Symposium on the Theory of Switching*, 285–292. Harvard University Press [1959].
- [MS08] Mehlhorn, K. und Sanders, P. *Algorithms and Data Structures: The Basic Toolbox*. Springer, Berlin [2008].
- [MWV09] Mineralölwirtschaftsverband e.V. (Association of the German Petroleum Industry). *Verbraucherpreise für Mineralölprodukte 1950–2009* [2009]. URL http://www.mwv.de/cms/front_content.php?idcat=14&idart=64. [Online; Stand: Februar 2010].
- [PR06] Park, S. und Rakha, H. *Energy and Environmental Impacts of Roadway Grades*. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Bd. 1987[2006]:148–160.
- [SBB06] Servin, O.; Boriboonsomsin, K. und Barth, M. *An Energy and Emissions Impact Evaluation of Intelligent Speed Adaptation*. In *Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference 2006* [Sept. 2006].

- [Sch08] Schultes, D. *Route Planning in Road Networks*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH) [Febr. 2008].
- [UBA09] Umweltbundesamt. *Emissionsberichterstattung der Bundesrepublik Deutschland 2009, CRF-Tabellen 1990-2007, Berichtstabellen nach dem Common Reporting Format für die Emissionsberichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen* [Apr. 2009].
- [VDM01] van der Voort, M.; Dougherty, M. S. und van Maarseveen, M. *A prototype fuel-efficiency support tool*. In *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 9[2001](4):279–296.
- [VI09] PTV Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe. *PTV Vision – VISSIM 5.20 Benutzerhandbuch* [Aug. 2009].
- [VKK00] de Vlieger, I.; de Keukeleere, D. und Kretzschmar, J. G. *Environmental effects of driving behaviour and congestion related to passenger cars*. In *Atmospheric Environment*, Bd. 34[2000](27):4649–4655.
- [Vol08] Volker, Lars. *Route Planning in Road Networks with Turn Costs*. Studienarbeit, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH) [2008].
- [VwV98] *Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO) vom 22. Oktober 1998 in der Fassung vom 4. Juni 2009*.
URL http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_26012001_S3236420014.htm. [Online; Stand: Februar 2010].
- [Wie74] Wiedemann, R. *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. In *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe*, Bd. 8. Inst. für Verkehrswesen der Univ. [1974].

Abbildungsverzeichnis

1.1	Von Nürnberg an den Fuß des nördlichen Schwarzwalds	7
2.1	Bestimmung der Höhe für einen beliebigen Punkt	14
3.1	Einfluss der Längsneigung	19
3.2	Zusammensetzung des Gesamtfahrwiderstandes	22
3.3	Kennfeld eines Dieselmotors als Direkteinspritzer mit Abgasturbolader (aus [Hak08])	23
3.4	Wirkungsgrad eines Dieselmotors abhängig von der Leistungsauslastung	23
3.5	Wirkungsgrad des Antriebsstrangs	24
3.6	Energieverbrauch Audi A3 2.0 TDI Sportback	26
3.7	Modelle im Überblick	27
4.1	Verteilung der Distanzen typischer Wege in Deutschland	29
4.2	Knotenmengen „Bebauungsgebiete“ und „Schwarzwald“	29
4.3	Überblick über die Anfragedatensätze	30
4.4	Beispielrouten für einen Euro Stundenlohn und durchschnittliche bzw. differenzierte Verbrauchswerte	36
4.5	Beispielrouten für 10 Euro Stundenlohn und durchschnittliche bzw. differenzierte Verbrauchswerte (mit Höhen)	39
4.6	Beispielrouten für 0 Euro Stundenlohn und durchschnittliche Verbrauchswerte, wobei nur in einem Fall Höheninformationen berücksichtigt werden	42
4.7	Beispielrouten für 1 Euro Stundenlohn im physikalischen Modell mit vs. ohne Höhen	45
4.8	Beispielrouten für 10 Euro Stundenlohn im physikalischen Modell mit vs. ohne Rekuperation	47
4.9	Optimale Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Stundenlohn	49
4.10	Effekt von geringeren Geschwindigkeiten im physikalischen Modell	51
4.11	Beispielrouten für 0 Euro Stundenlohn im physikalischen bzw. verbrauchsbasierten Modell ohne Höhen	56
4.12	Vergleich physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz mit Höhen	59
4.13	Vergleich des verbrauchsbasierten Ansatzes mit der herkömmlichen Optimierung .	63
4.14	Vergleich des physikalischen Ansatzes mit der herkömmlichen Optimierung	65
5.1	Aufbau der betrachteten Kreuzung	68
5.2	Simulation einer Kreuzung mit Grundsatz „Rechts vor Links“ in VISSIM	69
5.3	Rechts-vor-Links: Zeit pro Abbiegevorgang	72
5.4	Rechts-vor-Links: Energieverbrauch pro Abbiegevorgang	73
5.5	Signalgesteuert: Zeit pro Abbiegevorgang	74
5.6	Signalgesteuert: Energieverbrauch pro Abbiegevorgang	75
5.7	Vergleich – Rechts-vor-Links vs. signalisiert	76

Tabellenverzeichnis

2.1	Bedeutung der Network Class (NC) in den Kartendaten der PTV	12
2.2	Geschwindigkeitsspektrum pro Network Class	13
3.1	Kraftstoffverbrauchswerte aus HBEFA 2.1	19
3.2	Verbrauchsbasiertes Modell: Energieverbrauch tlws. abhängig von NC	20
3.3	Physikalisches Modell: Eingabegrößen	25
4.1	Kosten im verbrauchsbasierten Modell mit differenzierten Verbrauchswerten	32
4.2	Effekt von differenzierten Verbrauchswerten in der Ebene: Relative Differenzen von typischen Strecken	33
4.3	Effekt von differenzierten Verbrauchswerten in der Ebene: Absolute Werte von typischen Strecken	34
4.4	Effekt von differenzierten Verbrauchswerten in der Ebene: Relative Differenzen von Langstrecken	34
4.5	Effekt von differenzierten Verbrauchswerten in der Ebene: Absolute Werte von Langstrecken	35
4.6	Effekt von differenzierten Verbrauchswerten: Relative Differenzen von Kurzstrecken	37
4.7	Effekt von differenzierten Verbrauchswerten: Absolute Werte von Kurzstrecken	37
4.8	Effekt von differenzierten Verbrauchswerten: Relative Differenzen von mittellangen Strecken im Schwarzwald	37
4.9	Effekt von differenzierten Verbrauchswerten: Absolute Werte von mittellangen Strecken im Schwarzwald	38
4.10	Effekt von differenzierten Verbrauchswerten: Relative Differenzen von mittellangen Strecken	40
4.11	Effekt von Höheninformationen im verbrauchsbasierten Modell: Absolute Werte von mittellangen Strecken	40
4.12	Effekt von Höheninformationen im verbrauchsbasierten Modell: Relative Differenzen von mittellangen Strecken im Schwarzwald	41
4.13	Effekt von Höheninformationen im verbrauchsbasierten Modell: Absolute Werte von mittellangen Strecken im Schwarzwald	41
4.14	Kosten im physikalischem Modell für verschiedene Geschwindigkeiten	43
4.15	Effekt von Höheninformationen im physikalischem Modell: Relative Differenzen von sehr kurzen Strecken	44
4.16	Effekt von Höheninformationen im physikalischem Modell: Absolute Werte von sehr kurzen Strecken	44
4.17	Effekt von Höheninformationen im physikalischem Modell: Relative Differenzen von mittellangen Strecken im Schwarzwald	45
4.18	Effekt von Höheninformationen im physikalischem Modell: Absolute Werte von mittellangen Strecken im Schwarzwald	46
4.19	Effekt von Rekuperation im physikalischen Modell: Relative Differenzen von Langstrecken	46
4.20	Effekt von Rekuperation im physikalischen Modell: Absolute Werte von Langstrecken	47
4.21	Effekt von geringeren Geschwindigkeiten im physikalischen Modell: Relative Differenzen von mittellangen Strecken	50
4.22	Effekt von geringeren Geschwindigkeiten im physikalischen Modell: Absolute Werte von mittellangen Strecken	52

4.23	Effekt von geringeren Geschwindigkeiten im physikalischen Modell: Relative Differenzen von Langstrecken	52
4.24	Effekt von geringeren Geschwindigkeiten im physikalischen Modell: Absolute Werte von Langstrecken	53
4.25	Vergleich physikalischer versus verbrauchsbasierter Ansatz (ohne Höhen): Relative Differenzen von mittellangen Strecken	55
4.26	Vergleich physikalischer versus verbrauchsbasierter Ansatz (ohne Höhen): Absolute Werte von mittellangen Strecken	55
4.27	Vergleich physikalischer versus verbrauchsbasierter Ansatz (ohne Höhen): Relative Differenzen von Langstrecken	57
4.28	Vergleich physikalischer versus verbrauchsbasierter Ansatz (ohne Höhen): Absolute Werte von Langstrecken	57
4.29	Vergleich physikalischer versus verbrauchsbasierter Ansatz (mit Höhen): Relative Differenzen von mittellangen Strecken	58
4.30	Vergleich physikalischer versus verbrauchsbasierter Ansatz (mit Höhen): Absolute Werte von mittellangen Strecken	58
4.31	Vergleich physikalischer versus verbrauchsbasierter Ansatz (mit Höhen): Relative Differenzen von mittellangen Strecken im Schwarzwald	59
4.32	Vergleich physikalischer versus verbrauchsbasierter Ansatz (mit Höhen): Absolute Werte von mittellangen Strecken im Schwarzwald	60
4.33	Vergleich mit herkömmlicher Optimierung: Relative Differenzen von mittellangen Strecken	61
4.34	Vergleich mit herkömmlicher Optimierung: Absolute Werte von mittellangen Strecken	62
4.35	Vergleich mit herkömmlicher Optimierung: Relative Differenzen von Langstrecken .	62
4.36	Vergleich mit herkömmlicher Optimierung: Absolute Werte von Langstrecken . . .	63
4.37	Vergleich mit herkömmlicher Optimierung: Relative Differenzen von mittellangen Strecken	64
4.38	Vergleich mit herkömmlicher Optimierung: Absolute Werte von mittellangen Strecken	64
4.39	Vergleich mit herkömmlicher Optimierung: Relative Differenzen von Langstrecken .	65
4.40	Vergleich mit herkömmlicher Optimierung: Absolute Werte von Langstrecken . . .	66
5.1	Erwartungswert für die Fahrtzeiten	70
5.2	Erwartungswert für den Energieverbrauch pro Fahrt	71
A.1	Effekt von differenzierten Verbrauchswerten in der Ebene: Relative Differenzen (Teil 1)	89
A.2	Effekt von differenzierten Verbrauchswerten in der Ebene: Relative Differenzen (Teil 2)	90
A.3	Effekt von differenzierten Verbrauchswerten in der Ebene: Absolute Werte (Teil 1)	90
A.4	Effekt von differenzierten Verbrauchswerten in der Ebene: Absolute Werte (Teil 2)	91
A.5	Effekt von differenzierten Verbrauchswerten: Relative Differenzen	92
A.6	Effekt von differenzierten Verbrauchswerten: Absolute Werte (Teil 1)	93
A.7	Effekt von differenzierten Verbrauchswerten: Absolute Werte (Teil 2)	94
A.8	Effekt von differenzierten Verbrauchswerten: Relative Differenzen (Teil 1)	94
A.9	Effekt von differenzierten Verbrauchswerten: Relative Differenzen (Teil 2)	95
A.10	Effekt von Höheninformationen im verbrauchsbasierten Modell: Absolute Werte (Teil 1)	95
A.11	Effekt von Höheninformationen im verbrauchsbasierten Modell: Absolute Werte (Teil 2)	96
A.12	Effekt von Höheninformationen im verbrauchsbasierten Modell: Absolute Werte (Teil 3)	97
A.13	Effekt von Höheninformationen im physikalischem Modell: Relative Differenzen (Teil 1)	97

A.14 Effekt von Höheninformationen im physikalischem Modell: Relative Differenzen (Teil 2)	98
A.15 Effekt von Höheninformationen im physikalischem Modell: Absolute Werte (Teil 1)	98
A.16 Effekt von Höheninformationen im physikalischem Modell: Absolute Werte (Teil 2)	99
A.17 Effekt von Höheninformationen im physikalischem Modell: Absolute Werte (Teil 3)	100
A.18 Effekt von Rekuperation im physikalischen Modell: Relative Differenzen (Teil 1)	100
A.19 Effekt von Rekuperation im physikalischen Modell: Relative Differenzen (Teil 2)	101
A.20 Effekt von Rekuperation im physikalischen Modell: Absolute Werte (Teil 1)	101
A.21 Effekt von Rekuperation im physikalischen Modell: Absolute Werte (Teil 2)	102
A.22 Effekt von Rekuperation im physikalischen Modell: Absolute Werte (Teil 3)	103
A.23 Effekt von geringeren Geschwindigkeiten im physikalischen Modell: Relative Differenzen (Teil 1)	103
A.24 Effekt von geringeren Geschwindigkeiten im physikalischen Modell: Relative Differenzen (Teil 2)	104
A.25 Effekt von geringeren Geschwindigkeiten im physikalischen Modell: Absolute Werte (Teil 1)	105
A.26 Effekt von geringeren Geschwindigkeiten im physikalischen Modell: Absolute Werte (Teil 2)	106
A.27 Vergleich physikalischer versus verbrauchsbasierter Ansatz (ohne Höhen): Relative Differenzen (Teil 1)	106
A.28 Vergleich physikalischer versus verbrauchsbasierter Ansatz (ohne Höhen): Relative Differenzen (Teil 2)	107
A.29 Vergleich physikalischer versus verbrauchsbasierter Ansatz (ohne Höhen): Absolute Werte (Teil 1)	107
A.30 Vergleich physikalischer versus verbrauchsbasierter Ansatz (ohne Höhen): Absolute Werte (Teil 2)	108
A.31 Vergleich physikalischer versus verbrauchsbasierter Ansatz (ohne Höhen): Absolute Werte (Teil 2)	109
A.32 Vergleich physikalischer versus verbrauchsbasierter Ansatz (mit Höhen): Relative Differenzen (Teil 1)	109
A.33 Vergleich physikalischer versus verbrauchsbasierter Ansatz (mit Höhen): Relative Differenzen (Teil 2)	110
A.34 Vergleich physikalischer versus verbrauchsbasierter Ansatz (mit Höhen): Absolute Werte (Teil 1)	110
A.35 Vergleich physikalischer versus verbrauchsbasierter Ansatz (mit Höhen): Absolute Werte (Teil 2)	111
A.36 Vergleich physikalischer versus verbrauchsbasierter Ansatz (mit Höhen): Absolute Werte (Teil 3)	112
A.37 Vergleich mit herkömmlicher Optimierung: Relative Differenzen (Teil 1)	112
A.38 Vergleich mit herkömmlicher Optimierung: Relative Differenzen (Teil 2)	113
A.39 Vergleich mit herkömmlicher Optimierung: Absolute Werte (Teil 1)	113
A.40 Vergleich mit herkömmlicher Optimierung: Absolute Werte (Teil 2)	114
A.41 Vergleich mit herkömmlicher Optimierung: Absolute Werte (Teil 3)	115
A.42 Vergleich mit herkömmlicher Optimierung: Relative Differenzen (Teil 1)	115
A.43 Vergleich mit herkömmlicher Optimierung: Relative Differenzen (Teil 2)	116
A.44 Vergleich mit herkömmlicher Optimierung: Absolute Werte (Teil 1)	116
A.45 Vergleich mit herkömmlicher Optimierung: Absolute Werte (Teil 2)	117
B.1 Rechts-vor-Links: Zeit pro Abbiegevorgang	118
B.2 Rechts-vor-Links: Energieverbrauch pro Abbiegevorgang	118
B.3 Signalgesteuert: Zeit pro Abbiegevorgang	119
B.4 Signalgesteuert: Energieverbrauch pro Abbiegevorgang	119

A Weitere Ergebnisse der Evaluierung

In diesem Teil des Anhangs werden weitere Ergebnisse der Evaluierung ergänzend zu Kapitel 4 präsentiert. Für einen besseren Überblick wurde die Gliederung übernommen.

A.1 Verbrauchsbasierter Ansatz

Folgende Tabellen sind wie in Abschnitt 4.3 zu verstehen.

A.1.1 Differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch (ohne Höhen)

- zufällige Anfragen:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	0,5	6,865 (11,676)	-2,756	-7,160	6,865
1	0,8	5,496 (9,327)	0,747	-29,869	14,378
5	37,1	0,420 (1,365)	1,638	-3,219	3,220
10	65,1	0,118 (0,332)	1,004	-0,894	1,581

- Kurzstrecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	56,4	1,243 (4,133)	-1,055	2,368	1,243
1	72,3	0,523 (1,883)	-0,949	0,599	0,433
5	89,3	0,083 (0,022)	-0,341	0,051	0,089
10	92,8	0,039 (0,000)	-0,161	-0,007	0,116

- mittellange Strecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	11,1	2,996 (7,489)	-2,212	2,693	2,996
1	31,2	1,629 (5,040)	-0,902	-3,206	3,109
5	69,2	0,292 (1,064)	0,458	-0,950	1,755
10	81,2	0,114 (0,229)	0,255	-0,276	0,960

- sehr kurze Stadtstrecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	76,3	0,832 (3,194)	-0,652	1,471	0,832
1	84,5	0,333 (0,847)	-0,711	0,589	0,194
5	92,8	0,055 (0,000)	-0,468	0,130	-0,119
10	95,3	0,019 (0,000)	-0,228	0,027	-0,040

Tabelle A.1: Relative Differenzen des Vergleichs differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch jeweils ohne Höhen nach Definition 3 von diversen Anfragen (Teil 1).

- mittellange Strecken im Schwarzwald

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	12,5	2,526 (6,471)	-1,957	3,759	2,526
1	34,0	1,167 (3,521)	-1,443	-0,420	1,563
5	64,1	0,352 (1,109)	0,284	-0,902	1,820
10	77,6	0,127 (0,250)	0,468	-0,411	1,321

- mittellange Strecken im Schwarzwald (>750 hm):

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	18,9	1,971 (5,207)	-1,688	3,449	1,971
1	35,4	0,891 (2,894)	-1,510	1,162	0,731
5	69,8	0,215 (0,574)	-0,662	0,087	0,311
10	82,4	0,061 (0,062)	-0,175	-0,059	0,302

Tabelle A.2: Relative Differenzen des Vergleichs differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch jeweils ohne Höhen nach Definition 3 von diversen Anfragen (Teil 2).

- zufällige Anfragen:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	21,69	373,6	08:01	710,1
	23,41	363,2	07:19	766,7
1	29,33	372,8	06:59	731,2
	31,20	376,2	04:39	868,9
5	48,77	390,3	04:05	927,2
	48,97	396,8	03:56	958,2
10	68,63	399,4	03:54	965,2
	68,70	403,1	03:52	979,3

- Kurzstrecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,49	7,6	00:12	15,9
	0,49	7,5	00:12	16,1
1	0,69	7,6	00:12	16,0
	0,69	7,6	00:12	16,0
5	1,48	7,8	00:11	16,2
	1,48	7,7	00:11	16,2
10	2,46	7,8	00:11	16,4
	2,46	7,8	00:11	16,4

Tabelle A.3: Absolute Werte des Vergleichs differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch jeweils ohne Höhen von diversen Anfragen (Teil 1). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

- mittellange Strecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,86	30,8	00:44	60,9
	1,92	30,1	00:45	62,9
1	2,58	30,9	00:41	61,7
	2,62	30,6	00:40	63,9
5	5,15	32,1	00:37	66,8
	5,17	32,3	00:36	68,4
10	8,22	33,1	00:36	69,9
	8,23	33,2	00:36	70,9

- sehr kurze Stadtstrecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,20	3,1	00:05	6,6
	0,20	3,0	00:05	6,7
1	0,30	3,1	00:05	6,6
	0,30	3,1	00:05	6,6
5	0,67	3,1	00:05	6,6
	0,67	3,1	00:05	6,6
10	1,13	3,1	00:05	6,7
	1,13	3,1	00:05	6,7

- mittellange Strecken im Schwarzwald:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,84	30,6	00:42	60,2
	1,89	30,0	00:44	61,8
1	2,54	30,8	00:41	60,5
	2,57	30,3	00:41	61,6
5	5,19	31,7	00:38	64,0
	5,21	31,8	00:38	65,6
10	8,39	32,7	00:38	67,2
	8,40	32,9	00:37	68,5

- mittellange Strecken im Schwarzwald (>750 hm):

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,85	30,6	00:42	60,6
	1,89	30,1	00:44	61,9
1	2,56	30,7	00:42	60,7
	2,58	30,2	00:42	61,2
5	5,33	31,2	00:41	62,0
	5,34	31,1	00:41	62,4
10	8,75	31,6	00:40	63,1
	8,76	31,6	00:40	63,4

Tabelle A.4: Absolute Werte des Vergleichs differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch jeweils ohne Höhen von diversen Anfragen (Teil 2). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

A.1.2 Differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch (mit Höhen)

- zufällige Anfragen:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	0,2	7,255 (11,366)	-2,203	-6,114	7,255
1	0,6	5,639 (9,628)	0,747	-29,408	13,910
5	30,9	0,467 (1,486)	1,759	-3,635	3,485
10	60,7	0,145 (0,455)	1,150	-1,041	1,782

- mittellange Strecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	8,0	3,240 (7,900)	-1,854	3,654	3,240
1	24,7	1,766 (5,260)	-0,981	-2,790	3,088
5	64,7	0,348 (1,194)	0,373	-0,903	1,758
10	78,3	0,128 (0,393)	0,299	-0,335	1,085

- Langstrecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	0,0	7,592 (12,298)	-2,168	-7,333	7,592
1	0,0	5,523 (9,267)	0,762	-29,911	14,007
5	29,3	0,609 (1,914)	2,274	-4,378	4,334
10	62,0	0,136 (0,397)	1,047	-0,954	1,587

- sehr kurze Stadtstrecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	74,5	0,841 (2,942)	-0,519	1,786	0,841
1	83,8	0,334 (1,121)	-0,663	0,646	0,178
5	92,2	0,058 (0,000)	-0,488	0,142	-0,130
10	94,9	0,027 (0,000)	-0,266	0,039	-0,043

- typische Strecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	52,4	1,729 (5,769)	-0,952	2,097	1,729
1	65,1	0,838 (3,145)	-0,754	-0,729	1,183
5	83,6	0,161 (0,214)	-0,040	-0,314	0,622
10	90,9	0,059 (0,000)	0,196	-0,207	0,583

- mittellange Strecken im Schwarzwald (>750 hm):

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	6,2	2,492 (5,708)	-0,652	6,542	2,492
1	21,6	1,239 (3,626)	-1,343	2,115	0,903
5	63,6	0,347 (1,294)	-0,704	0,282	0,342
10	78,3	0,100 (0,176)	-0,340	0,028	0,185

Tabelle A.5: Relative Differenzen des Vergleichs differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch jeweils mit Höhen von diversen Anfragen.

- zufällige Anfragen:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	23,22	374,1	08:04	760,4
	25,16	365,7	07:27	823,9
1	30,88	373,0	07:00	781,6
	32,91	376,4	04:42	923,5
5	50,59	389,3	04:07	981,7
	50,82	396,4	03:57	1 017,2
10	70,51	398,8	03:55	1 024,5
	70,61	403,0	03:52	1 041,0

- mittellange Strecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,98	30,8	00:44	64,9
	2,05	30,2	00:46	67,2
1	2,70	30,9	00:41	65,6
	2,75	30,6	00:40	68,0
5	5,28	32,0	00:37	70,8
	5,30	32,2	00:37	72,5
10	8,35	33,0	00:36	74,1
	8,37	33,2	00:36	75,2

- Langstrecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	19,19	309,1	06:42	628,2
	20,81	302,3	06:11	681,3
1	25,57	308,2	05:50	645,7
	27,09	310,6	04:02	754,7
5	42,26	321,2	03:33	800,7
	42,52	328,9	03:23	838,1
10	59,40	331,0	03:21	844,5
	59,48	334,9	03:19	859,3

- sehr kurze Stadtstrecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,21	3,1	00:05	6,9
	0,21	3,1	00:05	7,0
1	0,30	3,1	00:05	6,9
	0,31	3,1	00:05	6,9
5	0,68	3,1	00:05	7,0
	0,68	3,1	00:05	6,9
10	1,14	3,1	00:05	7,0
	1,14	3,1	00:05	7,0

Tabelle A.6: Absolute Werte des Vergleichs differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch jeweils mit Höhen von diversen Anfragen (Teil 1). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

- typische Strecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,95	14,8	00:21	31,2
	0,99	14,5	00:22	32,5
1	1,31	14,8	00:20	31,6
	1,34	14,8	00:19	33,4
5	2,54	15,4	00:17	35,0
	2,55	15,6	00:17	35,8
10	4,00	15,8	00:17	36,2
	4,00	16,0	00:17	37,2

- mittellange Strecken im Schwarzwald (>750 hm):

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	2,37	30,7	00:43	77,7
	2,44	30,5	00:46	79,8
1	3,09	30,8	00:42	78,0
	3,13	30,3	00:43	78,8
5	5,87	31,2	00:41	79,6
	5,89	31,1	00:41	80,1
10	9,29	31,7	00:40	80,8
	9,30	31,6	00:40	81,1

Tabelle A.7: Absolute Werte des Vergleichs differenzierter vs. durchschnittlicher Verbrauch jeweils mit Höhen von diversen Anfragen (Teil 2). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

A.1.3 Mit vs. ohne Höhen (differenzierter Verbrauch)

- zufällige Anfragen:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	4,8	0,421 (0,999)	-0,113	-0,630	0,421
1	10,4	0,237 (0,572)	-0,054	-0,237	0,361
5	60,0	0,038 (0,090)	0,238	-0,645	0,570
10	80,2	0,020 (0,007)	0,178	-0,188	0,328

- Kurzstrecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	76,1	0,197 (0,628)	-0,146	-0,298	0,197
1	85,0	0,098 (0,167)	0,032	-0,170	0,200
5	94,7	0,013 (0,000)	0,030	-0,031	0,091
10	96,3	0,008 (0,000)	0,121	-0,050	0,175

Tabelle A.8: Relative Differenzen des Vergleichs mit vs. ohne Höhen jeweils mit differenzierten Verbrauchswerten von diversen Anfragen (Teil 1).

- Langstrecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	4,7	0,373 (0,916)	-0,129	-0,441	0,373
1	8,7	0,220 (0,590)	-0,094	-0,276	0,362
5	63,0	0,038 (0,081)	0,252	-0,654	0,583
10	82,3	0,013 (0,007)	0,057	-0,078	0,135

- sehr kurze Stadtstrecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	85,7	0,248 (0,411)	-0,135	-0,172	0,248
1	90,5	0,107 (0,000)	-0,045	-0,096	0,201
5	95,6	0,025 (0,000)	-0,016	-0,018	0,116
10	97,1	0,009 (0,000)	0,012	-0,011	0,099

- typische Strecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	71,4	0,255 (0,655)	-0,046	-0,388	0,255
1	79,9	0,097 (0,234)	0,035	-0,165	0,200
5	91,9	0,031 (0,000)	0,079	-0,091	0,222
10	95,4	0,007 (0,000)	0,060	-0,055	0,155

- mittellange Strecken im Schwarzwald:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	31,5	0,485 (1,303)	-0,191	-0,573	0,485
1	53,3	0,254 (0,714)	-0,017	-0,388	0,455
5	80,7	0,063 (0,115)	-0,253	0,218	-0,110
10	86,5	0,024 (0,021)	0,053	-0,069	0,223

Tabelle A.9: Relative Differenzen des Vergleichs mit vs. ohne Höhen jeweils mit differenzierten Verbrauchswerten von diversen Anfragen (Teil 2).

- zufällige Anfragen:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	23,22	374,1	08:04	760,4
	23,32	373,6	08:01	763,6
1	30,88	373,0	07:00	781,6
	30,96	372,8	06:59	784,5
5	50,59	389,3	04:07	981,7
	50,61	390,3	04:05	987,4
10	70,51	398,8	03:55	1 024,5
	70,53	399,4	03:54	1 027,5

Tabelle A.10: Absolute Werte des Vergleichs mit vs. ohne Höhen jeweils mit differenzierten Verbrauchswerten von diversen Anfragen (Teil 1). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

- Kurzstrecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,52	7,6	00:12	16,9
	0,52	7,6	00:12	16,9
1	0,72	7,6	00:12	16,9
	0,72	7,6	00:12	16,9
5	1,51	7,8	00:11	17,2
	1,51	7,8	00:11	17,2
10	2,49	7,8	00:11	17,3
	2,49	7,8	00:11	17,4

- Langstrecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	19,19	309,1	06:42	628,2
	19,26	308,7	06:40	630,6
1	25,57	308,2	05:50	645,7
	25,62	307,9	05:49	648,2
5	42,26	321,2	03:33	800,7
	42,28	322,0	03:32	805,4
10	59,40	331,0	03:21	844,5
	59,40	331,3	03:21	845,7

- sehr kurze Stadtstrecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,21	3,1	00:05	6,9
	0,21	3,1	00:05	6,9
1	0,30	3,1	00:05	6,9
	0,30	3,1	00:05	6,9
5	0,68	3,1	00:05	7,0
	0,68	3,1	00:05	7,0
10	1,14	3,1	00:05	7,0
	1,14	3,1	00:05	7,0

- typische Strecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,95	14,8	00:21	31,2
	0,96	14,8	00:21	31,3
1	1,31	14,8	00:20	31,6
	1,31	14,8	00:20	31,7
5	2,54	15,4	00:17	35,0
	2,54	15,4	00:17	35,1
10	4,00	15,8	00:17	36,2
	4,00	15,8	00:17	36,3

Tabelle A.11: Absolute Werte des Vergleichs mit vs. ohne Höhen jeweils mit differenzierten Verbrauchswerten von diversen Anfragen (Teil 2). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

- mittellange Strecken im Schwarzwald:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	2,06	30,7	00:42	67,5
	2,07	30,6	00:42	67,8
1	2,76	30,8	00:41	67,8
	2,77	30,8	00:41	68,1
5	5,42	31,8	00:38	71,8
	5,43	31,7	00:38	71,6
10	8,62	32,7	00:38	74,6
	8,62	32,7	00:38	74,8

Tabelle A.12: Absolute Werte des Vergleichs mit vs. ohne Höhen jeweils mit differenzierten Verbrauchswerten von diversen Anfragen (Teil 3). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

A.2 Physikalischer Ansatz

Folgende Tabellen sind wie in Abschnitt 4.4 zu verstehen.

A.2.1 Mit vs. ohne Höhen

- zufällige Anfragen:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	1,5	2,274 (4,430)	0,858	-12,604	2,274
1	5,2	0,570 (1,424)	1,220	-5,028	2,044
5	49,4	0,063 (0,129)	0,401	-0,404	0,532
10	75,1	0,016 (0,027)	0,170	-0,091	0,228

- Kurzstrecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	52,8	1,687 (5,302)	0,005	-2,381	1,687
1	66,8	0,715 (2,255)	0,422	-0,909	1,467
5	83,5	0,140 (0,359)	0,197	-0,142	0,743
10	88,9	0,054 (0,039)	0,029	-0,062	0,517

- mittellange Strecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	22,5	2,202 (6,326)	1,465	-5,594	2,202
1	40,8	0,862 (2,738)	1,499	-2,168	1,993
5	69,8	0,166 (0,497)	0,912	-0,399	1,122
10	81,4	0,048 (0,095)	0,660	-0,157	0,707

Tabelle A.13: Relative Differenzen des Vergleichs mit vs. ohne Höhen im physikalischen Modell von diversen Anfragen (Teil 1).

- Langstrecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	0,4	2,165 (4,485)	0,727	-13,163	2,165
1	6,5	0,471 (1,391)	1,045	-4,369	1,727
5	52,7	0,047 (0,125)	0,343	-0,368	0,455
10	76,2	0,015 (0,027)	0,171	-0,091	0,218

- typische Strecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	50,5	1,981 (6,292)	0,305	-3,030	1,981
1	63,9	0,835 (2,518)	0,587	-1,370	1,784
5	82,7	0,152 (0,236)	0,370	-0,217	0,925
10	89,1	0,053 (0,010)	0,293	-0,084	0,628

- mittellange Strecken im Schwarzwald (>750 hm):

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	8,6	2,342 (6,186)	1,284	-4,249	2,342
1	23,7	1,069 (3,201)	1,677	-1,848	2,093
5	65,5	0,197 (0,435)	0,939	-0,298	0,990
10	80,3	0,072 (0,088)	0,584	-0,089	0,581

Tabelle A.14: Relative Differenzen des Vergleichs mit vs. ohne Höhen im physikalischen Modell von diversen Anfragen (Teil 2).

- zufällige Anfragen:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	19,23	380,3	06:56	629,5
	19,67	383,4	06:00	644,0
1	25,09	379,2	04:59	657,9
	25,22	383,2	04:43	670,8
5	41,89	397,1	03:57	724,9
	41,91	398,3	03:56	728,0
10	61,42	403,4	03:52	740,6
	61,43	403,9	03:52	741,9

Tabelle A.15: Absolute Werte des Vergleichs mit vs. ohne Höhen im physikalischen Modell von diversen Anfragen (Teil 1). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

- Kurzstrecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,48	7,8	00:12	15,7
	0,49	7,8	00:11	16,0
1	0,68	7,8	00:11	15,8
	0,68	7,8	00:11	16,0
5	1,47	7,9	00:11	15,9
	1,47	7,9	00:11	16,0
10	2,45	7,9	00:11	16,0
	2,45	7,9	00:11	16,1

- mittellange Strecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,73	31,6	00:41	56,8
	1,77	32,1	00:38	58,1
1	2,39	31,8	00:38	57,3
	2,41	32,4	00:37	58,5
5	4,88	33,0	00:36	59,7
	4,89	33,4	00:36	60,4
10	7,91	33,7	00:36	61,1
	7,91	34,0	00:36	61,6

- Langstrecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	15,96	314,4	05:43	522,4
	16,31	316,7	04:56	534,1
1	20,81	313,5	04:10	544,4
	20,90	316,8	03:58	554,1
5	35,22	329,3	03:23	598,5
	35,24	330,5	03:22	601,3
10	51,95	335,4	03:19	613,4
	51,96	336,0	03:19	614,7

- typische Strecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,86	15,1	00:20	28,0
	0,87	15,3	00:18	28,6
1	1,18	15,2	00:18	28,4
	1,18	15,5	00:18	28,9
5	2,35	15,8	00:17	29,7
	2,36	16,0	00:17	30,0
10	3,79	16,2	00:17	30,4
	3,79	16,2	00:17	30,6

Tabelle A.16: Absolute Werte des Vergleichs mit vs. ohne Höhen im physikalischen Modell von diversen Anfragen (Teil 2). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

- mittellange Strecken im Schwarzwald (>750 hm):

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,99	31,1	00:43	65,1
	2,04	31,5	00:41	66,7
1	2,70	31,0	00:42	65,3
	2,73	31,6	00:41	66,8
5	5,46	31,6	00:41	66,7
	5,47	32,0	00:40	67,4
10	8,87	32,0	00:40	67,4
	8,87	32,2	00:40	67,8

Tabelle A.17: Absolute Werte des Vergleichs mit vs. ohne Höhen im physikalischen Modell von diversen Anfragen (Teil 3). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

A.2.2 Mit vs. ohne Rekuperation

- zufällige Anfragen:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	17,9	0,063 (0,161)	-0,149	-1,704	0,063
1	47,8	0,030 (0,097)	0,183	-1,803	0,530
5	87,3	0,001 (0,000)	0,001	0,021	-0,010
10	94,3	0,001 (0,000)	-0,009	0,006	-0,006

- Kurzstrecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	92,8	0,018 (0,000)	-0,056	-0,109	0,018
1	96,7	0,001 (0,000)	0,016	-0,014	-0,028
5	98,1	0,001 (0,000)	-0,045	0,007	-0,018
10	99,0	0,000 (0,000)	0,014	0,001	-0,003

- mittellange Strecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	77,9	0,026 (0,029)	0,007	-0,447	0,026
1	88,5	0,012 (0,000)	0,061	-0,262	0,124
5	96,2	0,002 (0,000)	0,087	-0,069	0,123
10	97,2	0,000 (0,000)	-0,005	-0,002	0,011

Tabelle A.18: Relative Differenzen des Vergleichs mit vs. ohne Rekuperation im physikalischen Modell von diversen Anfragen (Teil 1).

- sehr kurze Stadtstrecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	95,5	0,019 (0,000)	-0,152	-0,123	0,019
1	97,2	0,002 (0,000)	0,004	0,004	-0,002
5	99,2	0,000 (0,000)	0,032	0,000	0,001
10	99,5	0,000 (0,000)	-0,005	0,000	-0,002

- typische Strecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	89,9	0,005 (0,000)	-0,085	-0,239	0,005
1	95,6	0,004 (0,000)	0,010	-0,071	0,032
5	98,3	0,000 (0,000)	0,042	-0,020	0,028
10	98,4	0,000 (0,000)	0,029	-0,009	0,036

- mittellange Strecken im Schwarzwald:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	58,1	0,052 (0,095)	0,037	-0,325	0,052
1	82,5	0,022 (0,014)	0,152	-0,161	0,098
5	94,8	0,005 (0,000)	0,107	-0,043	0,075
10	97,2	0,001 (0,000)	0,015	0,000	0,003

- mittellange Strecken im Schwarzwald (>750 hm):

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	56,4	0,064 (0,049)	0,235	-0,067	0,064
1	82,1	0,034 (0,010)	0,173	0,014	0,037
5	93,9	0,007 (0,000)	0,164	-0,035	0,064
10	97,5	0,002 (0,000)	0,116	-0,030	0,091

Tabelle A.19: Relative Differenzen des Vergleichs mit vs. ohne Rekuperation im physikalischen Modell von diversen Anfragen (Teil 2).

- zufällige Anfragen:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	18,86	381,0	07:05	617,7
	18,88	380,3	06:56	618,1
1	24,86	378,6	05:06	647,0
	24,87	379,2	04:59	650,7
5	41,75	397,2	03:56	720,4
	41,75	397,1	03:57	720,2
10	61,28	403,4	03:52	736,1
	61,28	403,4	03:52	736,0

Tabelle A.20: Absolute Werte des Vergleichs mit vs. ohne Rekuperation im physikalischen Modell von diversen Anfragen (Teil 1). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

- Kurzstrecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,47	7,8	00:12	15,4
	0,47	7,8	00:12	15,4
1	0,67	7,8	00:11	15,5
	0,67	7,8	00:11	15,5
5	1,46	7,9	00:11	15,6
	1,46	7,9	00:11	15,6
10	2,44	7,9	00:11	15,7
	2,44	7,9	00:11	15,7

- mittellange Strecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,70	31,5	00:41	55,7
	1,70	31,6	00:41	55,7
1	2,36	31,8	00:38	56,3
	2,36	31,8	00:38	56,4
5	4,85	33,0	00:36	58,7
	4,85	33,0	00:36	58,8
10	7,88	33,7	00:36	60,2
	7,88	33,7	00:36	60,2

- sehr kurze Stadtstrecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,21	3,2	00:05	6,9
	0,21	3,2	00:05	6,9
1	0,31	3,1	00:05	6,9
	0,31	3,1	00:05	6,9
5	0,68	3,1	00:05	7,0
	0,68	3,1	00:05	7,0
10	1,14	3,1	00:05	7,0
	1,14	3,1	00:05	7,0

- typische Strecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,84	15,1	00:20	27,5
	0,84	15,1	00:20	27,5
1	1,16	15,2	00:18	27,9
	1,16	15,2	00:18	27,9
5	2,34	15,8	00:17	29,3
	2,34	15,8	00:17	29,3
10	3,78	16,2	00:17	30,0
	3,78	16,2	00:17	30,0

Tabelle A.21: Absolute Werte des Vergleichs mit vs. ohne Rekuperation im physikalischen Modell von diversen Anfragen (Teil 2). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

- mittellange Strecken im Schwarzwald:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,60	31,1	00:42	52,4
	1,60	31,1	00:42	52,4
1	2,29	31,0	00:40	52,9
	2,29	31,1	00:40	53,0
5	4,89	32,5	00:38	56,0
	4,89	32,5	00:38	56,0
10	8,05	33,3	00:37	57,6
	8,05	33,3	00:37	57,6

- mittellange Strecken im Schwarzwald (>750 hm):

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,90	31,0	00:43	62,3
	1,90	31,1	00:43	62,3
1	2,61	30,9	00:42	62,6
	2,61	31,0	00:42	62,6
5	5,37	31,5	00:41	64,0
	5,38	31,6	00:41	64,0
10	8,79	31,9	00:40	64,7
	8,79	32,0	00:40	64,8

Tabelle A.22: Absolute Werte des Vergleichs mit vs. ohne Rekuperation im physikalischen Modell von diversen Anfragen (Teil 3). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

A.3 Effekt von reduzierten Geschwindigkeiten im physikalischen Modell

Folgende Tabellen sind wie in Abschnitt 4.5 zu verstehen.

- zufällige Anfragen:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	3,0	15,514 (21,435)	-2,289	-5,294	15,514
1	7,4	10,409 (14,039)	-2,311	-15,383	16,867
5	88,2	0,814 (1,059)	-0,094	-6,902	8,128

Tabelle A.23: Mittelwerte der relativen Differenzen nach Definition 4 des Vergleichs mit vs. ohne Geschwindigkeitsbeschränkung im physikalischen Modell von diversen Anfragen (Teil 1).

- Kurzstrecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	97,1	1,067 (2,280)	-0,411	-1,803	1,067
1	98,5	0,561 (0,957)	-0,220	-1,175	1,049
5	99,9	0,032 (0,000)	-0,037	-0,242	0,355

- sehr kurze Stadtstrecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	99,5	0,148 (0,000)	-0,087	-0,330	0,148
1	99,8	0,069 (0,000)	-0,034	-0,166	0,140
5	100,0	0,003 (0,000)	0,000	-0,025	0,040

- typische Strecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	88,1	1,661 (6,647)	-0,814	-1,644	1,661
1	92,0	0,969 (4,036)	-0,529	-1,602	1,697
5	99,9	0,067 (0,312)	-0,002	-0,534	0,781

- mittellange Strecken im Schwarzwald:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	80,7	1,935 (8,210)	-1,960	-1,487	1,935
1	87,4	1,337 (5,323)	-1,567	-1,368	2,111
5	99,8	0,110 (0,478)	-0,025	-0,897	1,351

- mittellange Strecken im Schwarzwald (>750 hm):

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	95,5	0,538 (1,318)	-0,573	-1,030	0,538
1	97,0	0,293 (0,572)	-0,462	-0,476	0,532
5	100,0	0,019 (0,023)	0,000	-0,157	0,253

Tabelle A.24: Mittelwerte der relativen Differenzen des Vergleichs mit vs. ohne Geschwindigkeitsbeschränkung im physikalischen Modell nach Definition 4 von diversen Anfragen (Teil 2).

- zufällige Anfragen:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	16,70	391,5	06:18	546,8
	20,03	383,4	06:00	655,9
1	22,46	392,4	05:38	550,9
	25,30	383,2	04:43	673,4
5	41,47	398,5	04:14	662,1
	41,83	398,3	03:56	725,2

- Kurzstrecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,55	7,9	00:11	18,0
	0,56	7,8	00:11	18,2
1	0,75	7,9	00:11	18,0
	0,75	7,8	00:11	18,2
5	1,54	7,9	00:11	18,2
	1,54	7,9	00:11	18,2

- sehr kurze Stadtstrecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,26	3,1	00:05	8,5
	0,26	3,1	00:05	8,5
1	0,35	3,1	00:05	8,5
	0,35	3,1	00:05	8,5
5	0,72	3,1	00:05	8,5
	0,72	3,1	00:05	8,5

- typische Strecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,89	15,7	00:19	29,2
	0,94	15,3	00:18	30,9
1	1,21	15,7	00:18	29,2
	1,25	15,5	00:18	31,0
5	2,41	16,0	00:17	31,0
	2,42	16,0	00:17	32,0

- mittellange Strecken im Schwarzwald:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,84	32,4	00:40	60,2
	1,88	31,7	00:40	61,4
1	2,51	32,5	00:39	60,3
	2,54	31,8	00:39	61,7
5	5,10	33,0	00:38	62,5
	5,10	33,0	00:37	63,5

Tabelle A.25: Absolute Werte des Vergleichs mit vs. ohne Geschwindigkeitsbeschränkung im physikalischen Modell von diversen Anfragen (Teil 1). Die obere Zeile enthält nach Definition 4 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_B(P_B)$ über alle Anfragen.

- mittellange Strecken im Schwarzwald (>750 hm):

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,90	31,8	00:41	62,2
	1,91	31,5	00:41	62,5
1	2,59	31,8	00:41	62,2
	2,60	31,6	00:41	62,6
5	5,33	32,0	00:40	62,8
	5,33	32,0	00:40	63,1

Tabelle A.26: Absolute Werte des Vergleichs mit vs. ohne Geschwindigkeitsbeschränkung im physikalischen Modell von diversen Anfragen (Teil 2). Die obere Zeile enthält nach Definition 4 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_B(P_B)$ über alle Anfragen.

A.4 Vergleich beider Ansätze

Folgende Tabellen sind wie in Abschnitt 4.6 zu verstehen.

A.4.1 Ohne Höheninformationen

- zufällige Anfragen:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	0,3	9,851 (14,868)	-2,593	24,013	9,851
1	0,5	8,896 (14,258)	-2,992	30,008	1,799
5	22,7	0,724 (2,203)	-2,236	3,465	-2,144
10	55,6	0,232 (0,695)	-1,312	0,982	-1,234

- Kurzstrecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	54,3	2,354 (8,137)	-2,554	2,856	2,354
1	64,8	1,252 (4,394)	-2,235	1,742	1,083
5	84,6	0,267 (0,321)	-1,276	0,390	0,066
10	90,8	0,091 (0,000)	-0,829	0,160	-0,102

- sehr kurze Stadtstrecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	71,5	1,463 (4,499)	-1,863	1,172	1,463
1	78,8	0,667 (1,891)	-1,497	0,524	0,718
5	90,9	0,129 (0,000)	-0,778	0,110	0,163
10	94,9	0,044 (0,000)	-0,436	0,044	0,045

Tabelle A.27: Relative Differenzen des Vergleichs physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz jeweils ohne Höhen von diversen Anfragen (Teil 1).

- typische Strecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	54,5	3,035 (10,754)	-2,473	4,567	3,035
1	63,0	1,876 (6,738)	-2,467	3,615	1,277
5	81,1	0,351 (0,733)	-1,640	0,818	-0,328
10	88,5	0,149 (0,064)	-1,177	0,350	-0,394

- mittellange Strecken im Schwarzwald:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	18,4	3,938 (10,494)	-3,073	5,380	3,938
1	31,3	2,289 (7,149)	-3,088	4,434	1,542
5	55,6	0,830 (2,897)	-3,421	2,252	-1,331
10	70,8	0,272 (0,724)	-2,077	0,745	-1,069

- mittellange Strecken im Schwarzwald (>750 hm):

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	29,7	2,999 (8,244)	-2,779	3,354	2,999
1	45,3	1,541 (5,299)	-2,489	1,909	1,414
5	69,2	0,368 (1,029)	-1,812	0,691	-0,136
10	80,2	0,162 (0,275)	-1,326	0,341	-0,354

Tabelle A.28: Relative Differenzen des Vergleichs physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz jeweils ohne Höhen von diversen Anfragen (Teil 2).

- zufällige Anfragen:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	20,03	383,4	06:00	655,9
	22,31	373,6	08:01	730,5
1	25,30	383,2	04:43	673,4
	27,91	372,8	06:59	684,7
5	41,83	398,3	03:56	725,2
	42,13	390,3	04:05	709,8
10	61,32	403,9	03:52	738,4
	61,45	399,4	03:54	730,4

Tabelle A.29: Absolute Werte des Vergleichs physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz jeweils ohne Höhen von diversen Anfragen (Teil 1). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

- Kurzstrecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,56	7,8	00:11	18,2
	0,57	7,6	00:12	18,7
1	0,75	7,8	00:11	18,2
	0,76	7,6	00:12	18,4
5	1,54	7,9	00:11	18,2
	1,54	7,8	00:11	18,2
10	2,51	7,9	00:11	18,3
	2,52	7,8	00:11	18,2

- sehr kurze Stadtstrecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,26	3,1	00:05	8,5
	0,26	3,1	00:05	8,7
1	0,35	3,1	00:05	8,5
	0,36	3,1	00:05	8,6
5	0,72	3,1	00:05	8,5
	0,73	3,1	00:05	8,5
10	1,19	3,1	00:05	8,5
	1,19	3,1	00:05	8,5

- typische Strecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,94	15,3	00:18	30,9
	1,01	14,8	00:21	33,0
1	1,25	15,5	00:18	31,0
	1,31	14,8	00:20	31,8
5	2,42	16,0	00:17	32,0
	2,44	15,4	00:17	31,6
10	3,85	16,2	00:17	32,5
	3,87	15,8	00:17	32,0

- mittellange Strecken im Schwarzwald:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,88	31,7	00:40	61,4
	1,96	30,6	00:42	64,2
1	2,54	31,8	00:39	61,7
	2,60	30,8	00:41	62,7
5	5,10	33,0	00:37	63,5
	5,15	31,7	00:38	62,4
10	8,25	33,5	00:37	64,4
	8,28	32,7	00:38	63,5

Tabelle A.30: Absolute Werte des Vergleichs physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz jeweils ohne Höhen von diversen Anfragen (Teil 2). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

- mittellange Strecken im Schwarzwald (>750 hm):

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,91	31,5	00:41	62,5
	1,97	30,6	00:42	64,7
1	2,60	31,6	00:41	62,6
	2,64	30,7	00:42	63,5
5	5,33	32,0	00:40	63,1
	5,36	31,2	00:41	62,9
10	8,74	32,2	00:40	63,4
	8,75	31,6	00:40	63,1

Tabelle A.31: Absolute Werte des Vergleichs physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz jeweils ohne Höhen von diversen Anfragen (Teil 3). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

A.4.2 Mit Höheninformationen

- zufällige Anfragen:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	0,1	7,085 (11,325)	-1,640	13,350	7,085
1	0,1	6,458 (10,973)	-1,740	26,263	-0,537
5	17,1	0,768 (2,288)	-2,074	3,697	-2,348
10	47,0	0,241 (0,822)	-1,319	1,077	-1,413

- Kurzstrecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	36,3	3,219 (9,796)	-2,414	0,761	3,219
1	52,7	1,627 (5,282)	-1,858	1,005	1,982
5	77,3	0,341 (0,879)	-1,108	0,279	0,533
10	83,8	0,146 (0,234)	-0,918	0,148	0,240

- Langstrecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	0,0	7,131 (11,512)	-1,682	14,246	7,131
1	0,0	6,882 (12,141)	-1,726	27,613	-0,436
5	19,0	0,836 (2,465)	-2,413	4,305	-2,918
10	48,3	0,208 (0,762)	-1,225	1,014	-1,323

Tabelle A.32: Relative Differenzen des Vergleichs physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz jeweils mit Höhen von diversen Anfragen (Teil 1).

- sehr kurze Stadtstrecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	55,7	3,125 (10,612)	-2,344	-0,650	3,125
1	66,6	1,361 (4,613)	-1,433	-0,387	2,279
5	84,5	0,243 (0,507)	-0,540	-0,070	1,061
10	91,0	0,079 (0,000)	-0,359	-0,004	0,466

- typische Strecken:

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	39,0	3,875 (12,171)	-2,134	2,011	3,875
1	51,2	2,073 (6,944)	-1,919	2,464	2,079
5	73,9	0,370 (1,057)	-1,352	0,692	0,017
10	84,1	0,152 (0,204)	-0,943	0,321	-0,201

- mittellange Strecken im Schwarzwald (>750 hm):

Lohn [€/h]	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
0	6,8	2,839 (7,094)	-1,159	0,644	2,839
1	19,0	1,249 (3,488)	-0,694	0,706	1,489
5	60,3	0,239 (0,552)	-0,938	0,441	-0,068
10	75,3	0,105 (0,200)	-0,687	0,240	-0,261

Tabelle A.33: Relative Differenzen des Vergleichs physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz jeweils mit Höhen von diversen Anfragen (Teil 2).

- zufällige Anfragen:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	19,23	380,3	06:56	629,5
	20,74	374,1	08:04	679,0
1	25,09	379,2	04:59	657,9
	26,92	373,0	07:00	652,0
5	41,89	397,1	03:57	724,9
	42,23	389,3	04:07	707,8
10	61,42	403,4	03:52	740,6
	61,56	398,8	03:55	731,4

Tabelle A.34: Absolute Werte des Vergleichs physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz jeweils mit Höhen von diversen Anfragen (Teil 1). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

- Kurzstrecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,48	7,8	00:12	15,7
	0,50	7,6	00:12	16,3
1	0,68	7,8	00:11	15,8
	0,69	7,6	00:12	16,1
5	1,47	7,9	00:11	15,9
	1,47	7,8	00:11	16,0
10	2,45	7,9	00:11	16,0
	2,45	7,8	00:11	16,0

- Langstrecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	15,96	314,4	05:43	522,4
	17,21	309,1	06:42	563,5
1	20,81	313,5	04:10	544,4
	22,38	308,2	05:50	541,5
5	35,22	329,3	03:23	598,5
	35,53	321,2	03:33	580,4
10	51,95	335,4	03:19	613,4
	52,07	331,0	03:21	604,6

- sehr kurze Stadtstrecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,22	3,2	00:05	7,1
	0,22	3,1	00:05	7,3
1	0,31	3,1	00:05	7,1
	0,31	3,1	00:05	7,2
5	0,68	3,1	00:05	7,1
	0,68	3,1	00:05	7,2
10	1,15	3,1	00:05	7,2
	1,15	3,1	00:05	7,2

- typische Strecken:

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	0,86	15,1	00:20	28,0
	0,91	14,8	00:21	29,7
1	1,18	15,2	00:18	28,4
	1,22	14,8	00:20	28,9
5	2,35	15,8	00:17	29,7
	2,37	15,4	00:17	29,3
10	3,79	16,2	00:17	30,4
	3,80	15,8	00:17	29,9

Tabelle A.35: Absolute Werte des Vergleichs physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz jeweils mit Höhen von diversen Anfragen (Teil 2). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

- mittellange Strecken im Schwarzwald (>750 hm):

Lohn [€/h]	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
0	1,99	31,1	00:43	65,1
	2,05	30,7	00:43	67,1
1	2,70	31,0	00:42	65,3
	2,73	30,8	00:42	66,3
5	5,46	31,6	00:41	66,7
	5,47	31,2	00:41	66,6
10	8,87	32,0	00:40	67,4
	8,88	31,7	00:40	67,1

Tabelle A.36: Absolute Werte des Vergleichs physikalischer vs. verbrauchsbasierter Ansatz jeweils mit Höhen von diversen Anfragen (Teil 3). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

A.5 Vergleich mit herkömmlicher Optimierung

Folgende Tabellen sind wie in Abschnitt 4.7 zu verstehen.

A.5.1 Vergleich mit dem verbrauchsbasierten Ansatz

- zufällige Anfragen:

Modell	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
∅, mit Höhen	85,5	0,013 (0,003)	0,031	-0,039	0,090
diff., ohne Höhen	65,1	0,118 (0,332)	1,004	-0,894	1,581
diff., mit Höhen	58,7	0,161 (0,559)	1,180	-1,080	1,867

- Kurzstrecken:

Modell	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
∅, mit Höhen	95,4	0,018 (0,000)	0,131	-0,052	0,218
diff., ohne Höhen	92,8	0,039 (0,000)	-0,161	-0,007	0,116
diff., mit Höhen	91,2	0,054 (0,000)	-0,040	-0,057	0,306

- sehr kurze Stadtstrecken:

Modell	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
∅, mit Höhen	97,3	0,009 (0,000)	0,051	-0,024	0,142
diff., ohne Höhen	95,3	0,019 (0,000)	-0,228	0,027	-0,040
diff., mit Höhen	94,5	0,026 (0,000)	-0,216	0,016	0,055

Tabelle A.37: Relative Differenzen des Vergleichs verbrauchsbasierter Ansatz vs. herkömmliche Optimierung von diversen Anfragen (Teil 1).

- typische Strecken:

Modell	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
∅, mit Höhen	95,8	0,006 (0,000)	0,021	-0,016	0,074
diff., ohne Höhen	91,7	0,047 (0,000)	0,156	-0,169	0,493
diff., mit Höhen	89,6	0,060 (0,000)	0,216	-0,224	0,637

- mittellange Strecken im Schwarzwald:

Modell	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
∅, mit Höhen	86,5	0,024 (0,025)	0,019	-0,041	0,190
diff., ohne Höhen	77,6	0,127 (0,250)	0,468	-0,411	1,321
diff., mit Höhen	76,0	0,136 (0,339)	0,522	-0,480	1,441

- mittellange Strecken im Schwarzwald (>750 hm):

Modell	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
∅, mit Höhen	82,7	0,044 (0,061)	0,109	-0,075	0,345
diff., ohne Höhen	82,4	0,061 (0,062)	-0,175	-0,059	0,302
diff., mit Höhen	81,6	0,063 (0,068)	-0,232	-0,046	0,285

Tabelle A.38: Relative Differenzen des Vergleichs verbrauchsbasierter Ansatz vs. herkömmliche Optimierung von diversen Anfragen (Teil 2).

- zufällige Anfragen:

Modell	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
∅, ohne Höhen	65,96	403,1	03:52	889,6
∅, mit Höhen	67,70	403,0	03:52	946,0
	67,72	403,1	03:52	947,1
diff., ohne Höhen	68,63	399,4	03:54	965,2
	68,70	403,1	03:52	979,3
diff., mit Höhen	70,51	398,8	03:55	1 024,5
	70,62	403,1	03:52	1 042,2

Tabelle A.39: Absolute Werte des Vergleichs verbrauchsbasierter Ansatz vs. herkömmliche Optimierung von diversen Anfragen (Teil 1). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

- Kurzstrecken:

Modell	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
∅, ohne Höhen	2,49	7,8	00:11	17,2
∅, mit Höhen	2,52	7,8	00:11	18,3
	2,52	7,8	00:11	18,3
diff., ohne Höhen	2,46	7,8	00:11	16,4
	2,46	7,8	00:11	16,4
diff., mit Höhen	2,49	7,8	00:11	17,3
	2,49	7,8	00:11	17,4

- sehr kurze Stadtstrecken:

Modell	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
∅, ohne Höhen	1,14	3,1	00:05	6,9
∅, mit Höhen	1,15	3,1	00:05	7,2
	1,15	3,1	00:05	7,2
diff., ohne Höhen	1,13	3,1	00:05	6,7
	1,13	3,1	00:05	6,7
diff., mit Höhen	1,14	3,1	00:05	7,0
	1,14	3,1	00:05	7,0

- typische Strecken:

Modell	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
∅, ohne Höhen	3,95	16,0	00:17	35,4
∅, mit Höhen	4,01	16,0	00:17	37,5
	4,01	16,0	00:17	37,5
diff., ohne Höhen	3,93	15,8	00:17	34,2
	3,94	16,0	00:17	35,1
diff., mit Höhen	4,00	15,8	00:17	36,2
	4,00	16,0	00:17	37,2

- mittellange Strecken im Schwarzwald:

Modell	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
∅, ohne Höhen	8,53	32,9	00:37	72,7
∅, mit Höhen	8,78	32,9	00:37	80,8
	8,78	32,9	00:37	81,0
diff., ohne Höhen	8,39	32,7	00:38	67,2
	8,40	32,9	00:37	68,5
diff., mit Höhen	8,62	32,7	00:38	74,6
	8,63	32,9	00:37	76,1

Tabelle A.40: Absolute Werte des Vergleichs verbrauchsbasierter Ansatz vs. herkömmliche Optimierung von diversen Anfragen (Teil 2). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

- mittellange Strecken im Schwarzwald (>750 hm):

Modell	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
∅, ohne Höhen	8,95	31,6	00:40	69,8
∅, mit Höhen	9,55	31,6	00:40	89,2
	9,56	31,6	00:40	89,5
diff., ohne Höhen	8,75	31,6	00:40	63,1
	8,76	31,6	00:40	63,4
diff., mit Höhen	9,29	31,7	00:40	80,8
	9,30	31,6	00:40	81,1

Tabelle A.41: Absolute Werte des Vergleichs verbrauchsbasierter Ansatz vs. herkömmliche Optimierung von diversen Anfragen (Teil 3). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

A.5.2 Vergleich mit dem physikalischen Ansatz

- zufällige Anfragen:

Modell	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
ohne Höhen	60,5	0,069 (0,186)	-0,310	0,089	0,015
mit Höhen	56,7	0,049 (0,136)	-0,140	-0,003	0,128
mit Rekuperation	58,2	0,048 (0,137)	-0,149	0,003	0,118

- Kurzstrecken:

Modell	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
ohne Höhen	87,5	0,118 (0,103)	-0,989	0,153	0,027
mit Höhen	83,4	0,118 (0,223)	-0,958	0,092	0,267
mit Rekuperation	83,5	0,121 (0,224)	-0,944	0,092	0,282

- sehr kurze Stadtstrecken:

Modell	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
ohne Höhen	92,0	0,078 (0,000)	-0,667	0,072	0,103
mit Höhen	90,1	0,099 (0,000)	-0,573	0,011	0,532
mit Rekuperation	90,0	0,100 (0,000)	-0,579	0,012	0,561

Tabelle A.42: Relative Differenzen des Vergleichs physikalischer Ansatz vs. herkömmliche Optimierung von diversen Anfragen (Teil 1).

- typische Strecken:

Modell	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
mit Höhen	86,4	0,130 (0,147)	-1,024	0,182	0,000
ohne Höhen	84,0	0,121 (0,185)	-0,732	0,098	0,322
mit Rekuperation	84,0	0,122 (0,183)	-0,702	0,089	0,381

- mittellange Strecken im Schwarzwald:

Modell	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
ohne Höhen	70,9	0,201 (0,631)	-1,608	0,335	-0,191
mit Höhen	73,4	0,106 (0,341)	-0,888	0,186	-0,157
mit Rekuperation	73,5	0,102 (0,329)	-0,872	0,186	-0,185

- mittellange Strecken im Schwarzwald (>750 hm):

Modell	Identisch [%]	Kosten [%]	Distanz [%]	Zeit [%]	Energie [%]
ohne Höhen	74,5	0,191 (0,556)	-1,499	0,283	-0,064
mit Höhen	75,1	0,109 (0,224)	-0,918	0,194	-0,133
mit Rekuperation	75,7	0,096 (0,212)	-0,802	0,164	-0,112

Tabelle A.43: Relative Differenzen des Vergleichs physikalischer Ansatz vs. herkömmliche Optimierung von diversen Anfragen (Teil 2).

- zufällige Anfragen:

Modell	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
ohne Höhen	61,32	403,9	03:52	738,4
	61,36	403,1	03:52	738,9
mit Höhen	61,42	403,4	03:52	740,6
	61,45	403,1	03:52	741,9
mit Rekuperation	61,28	403,4	03:52	736,1
	61,31	403,1	03:52	737,2

- Kurzstrecken:

Modell	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
ohne Höhen	2,51	7,9	00:11	18,3
	2,52	7,8	00:11	18,3
mit Höhen	2,45	7,9	00:11	16,0
	2,45	7,8	00:11	16,0
mit Rekuperation	2,44	7,9	00:11	15,7
	2,44	7,8	00:11	15,8

Tabelle A.44: Absolute Werte des Vergleichs physikalischer Ansatz vs. herkömmliche Optimierung von diversen Anfragen (Teil 1). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

- sehr kurze Stadtstrecken:

Modell	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
ohne Höhen	1,19	3,1	00:05	8,5
	1,19	3,1	00:05	8,5
mit Höhen	1,15	3,1	00:05	7,2
	1,15	3,1	00:05	7,2
mit Rekuperation	1,14	3,1	00:05	7,0
	1,15	3,1	00:05	7,1

- typische Strecken:

Modell	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
ohne Höhen	3,85	16,2	00:17	32,5
	3,86	16,0	00:17	32,5
mit Höhen	3,79	16,2	00:17	30,4
	3,80	16,0	00:17	30,4
mit Rekuperation	3,78	16,2	00:17	30,0
	3,78	16,0	00:17	30,0

- mittellange Strecken im Schwarzwald:

Modell	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
ohne Höhen	8,25	33,5	00:37	64,4
	8,27	32,9	00:37	64,2
mit Höhen	8,12	33,3	00:37	59,6
	8,12	32,9	00:37	59,4
mit Rekuperation	8,05	33,3	00:37	57,6
	8,06	32,9	00:37	57,4

- mittellange Strecken im Schwarzwald (>750 hm):

Modell	Kosten [€]	Distanz [km]	Zeit [hh:mm]	Energie [MJ]
ohne Höhen	8,74	32,2	00:40	63,4
	8,76	31,6	00:40	63,3
mit Höhen	8,87	32,0	00:40	67,4
	8,88	31,6	00:40	67,3
mit Rekuperation	8,79	31,9	00:40	64,7
	8,79	31,6	00:40	64,6

Tabelle A.45: Absolute Werte des Vergleichs physikalischer Ansatz vs. herkömmliche Optimierung von diversen Anfragen (Teil 2). Die obere Zeile enthält nach Definition 3 die Durchschnitte von $Z_A(P_A)$. Darunter stehen die Mittelwerte von $Z_A(P_B)$ über alle Anfragen.

B Weitere Ergebnisse zum innerstädtischen Verkehr

In diesem Teil des Anhangs werden weitere Ergebnisse der Evaluierung ergänzend zu Kapitel 5 präsentiert. Für einen besseren Überblick wurde die Gliederung übernommen.

B.1 Bestimmung der Abbiegekosten

B.1.1 Ungeregelte Kreuzung mit Grundsatz „Rechts-vor-Links“

Zeit [s]		Mitternacht		Normal		Stoßzeit	
		30 km/h	50 km/h	30 km/h	50 km/h	30 km/h	50 km/h
rechts	Q_1	0,84	3,07	0,94	3,17	1,04	3,27
	\emptyset	1,30	3,53	1,38	3,68	2,11	4,58
	Q_9	1,74	4,07	1,84	4,47	7,54	11,77
gerade	Q_1	-0,26	-0,11	-0,16	-0,11	-0,06	-0,01
	\emptyset	0,00	0,00	0,26	0,47	3,58	4,58
	Q_9	0,14	0,09	2,14	3,39	17,44	18,49
links	Q_1	0,60	2,48	0,60	2,58	0,80	2,78
	\emptyset	0,88	2,93	1,68	3,95	5,05	7,87
	Q_9	1,20	3,38	5,90	8,48	16,40	19,48

Tabelle B.1: Abbiegezeiten an einer Kreuzung mit Vorfahrtsregelung „Rechts-vor-Links“ in verschiedenen Verkehrssituationen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten: bereinigter Durchschnitt \emptyset sowie 10 %-Quantil Q_1 und 90 %-Quantil Q_9

Energie [kJ]		Mitternacht		Normal		Stoßzeit	
		30 km/h	50 km/h	30 km/h	50 km/h	30 km/h	50 km/h
rechts	Q_1	33,12	225,70	37,89	225,24	44,03	233,37
	\emptyset	84,79	283,67	96,90	286,99	142,49	307,91
	Q_9	377,52	336,72	377,03	340,10	377,61	425,19
gerade	Q_1	-34,30	-70,51	-22,42	-49,07	8,46	5,40
	\emptyset	0,09	-3,57	64,90	77,73	162,40	249,38
	Q_9	36,96	146,81	265,53	318,35	322,21	460,67
links	Q_1	37,96	207,60	45,32	214,04	75,45	232,98
	\emptyset	60,52	235,31	130,75	291,67	210,37	358,07
	Q_9	102,54	308,28	279,73	409,13	361,54	471,21

Tabelle B.2: Energieverbrauch pro Abbiegevorgang an einer Kreuzung mit Vorfahrtsregelung „Rechts-vor-Links“ in verschiedenen Verkehrssituationen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten: bereinigter Durchschnitt \emptyset , sowie 10 %-Quantil Q_1 und 90 %-Quantil Q_9

B.1.2 Signalisierte Kreuzung

Zeit [s]		Mitternacht		Normal		Stoßzeit	
		50 km/h	70 km/h	50 km/h	70 km/h	50 km/h	70 km/h
rechts	Q_1	3,17	5,81	3,47	5,90	3,87	6,21
	\emptyset	5,93	8,67	8,37	11,08	11,74	14,59
	Q_9	10,07	12,61	19,47	22,11	25,07	26,91
gerade	Q_1	-0,11	-0,03	-0,01	-0,03	0,29	0,07
	\emptyset	4,11	5,27	5,08	6,01	9,40	10,14
	Q_9	8,89	11,27	15,09	16,77	20,49	21,97
links	Q_1	2,38	4,93	2,78	5,13	3,38	5,63
	\emptyset	5,80	8,50	8,92	11,19	12,82	13,87
	Q_9	9,88	12,43	18,38	20,63	26,38	27,03

Tabelle B.3: Abbiegezeiten an einer bedarfsgesteuert signalisierten Kreuzung mit zwei Signalgruppen in verschiedenen Verkehrssituationen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten: bereinigter Durchschnitt \emptyset , sowie 10 %-Quantil Q_1 und 90 %-Quantil Q_9

Energie [kJ]		Mitternacht		Normal		Stoßzeit	
		50 km/h	70 km/h	50 km/h	70 km/h	50 km/h	70 km/h
rechts	Q_1	232,12	505,84	263,73	498,20	290,32	479,40
	\emptyset	351,09	577,97	373,91	591,32	405,93	606,37
	Q_9	460,01	649,27	460,39	664,91	537,98	717,63
gerade	Q_1	-49,83	-67,67	-16,16	-38,42	38,17	25,18
	\emptyset	219,27	327,36	256,99	415,83	333,87	531,74
	Q_9	439,23	655,28	439,16	666,87	476,77	713,98
links	Q_1	194,89	483,12	247,14	485,50	279,54	469,50
	\emptyset	338,37	574,90	384,33	602,23	404,83	611,40
	Q_9	455,40	657,37	466,58	692,17	515,01	720,94

Tabelle B.4: Energieverbrauch pro Abbiegevorgang an einer bedarfsgesteuert signalisierten Kreuzung mit zwei Signalgruppen in verschiedenen Verkehrssituationen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten: bereinigter Durchschnitt \emptyset , sowie 10 %-Quantil Q_1 und 90 %-Quantil Q_9