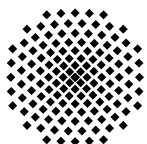


AUFBAU EINES RADVERKEHRSMODELLS FÜR DIE
RADVERKEHRSPANUNG IN STUTTGART



BEARBEITER

HERR CAND. ING. HANNES GÖLZ



UNIVERSITÄT STUTTGART

INSTITUT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN

LEHRSTUHL FÜR VERKEHRSPANUNG UND VERKEHRSEITTECHNIK

© Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik

Die Verteilung dieses Dokuments in elektronischer oder gedruckter Form ist gestattet, solange sein Inhalt einschließlich Autoren- und Copyright-Angabe unverändert bleibt und die Verteilung kostenlos erfolgt, abgesehen von einer Gebühr für den Datenträger, den Kopiervorgang usw.

UNIVERSITÄT STUTTGART
INSTITUT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN
LEHRSTUHL FÜR VERKEHRSPLANUNG UND VERKEHRSLITTECHNIK
SEIDENSTRASSE 36
70174 STUTTGART
TEL.: (+49 711) 685-82480
FAX: (+49 711) 685-82484
[HTTP://WWW.UNI-STUTTGART.DE/ISV/VUV/](http://www.uni-stuttgart.de/isv/vuv/)

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Diplomarbeit selbständig und nur unter Gebrauch der angegebenen Hilfsmittel und Quellen angefertigt habe.

Ich möchte mich bei Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich bedanken, der an den entscheidenden Knotenpunkten dafür gesorgt hat, dass die Diplomarbeit nicht in eine falsche Richtung abgebogen ist. Vielen Dank auch an Gerd Schleupen und Michael Veeck: Ohne deren Hilfe bei der Programmierung und den wichtigen Erklärungen zu den verwendeten Programmen hätte die Diplomarbeit in dieser Form nicht zustande kommen können.

Stuttgart, den 19. Februar 2007

(Hannes Gölz)

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	1
1.1	Verkehrsplanung im nichtmotorisierten Individualverkehr	1
1.2	Zielstellung der Diplomarbeit	1
2	Grundlagen	3
2.1	Motivation zur Verkehrsplanung im Radverkehr	3
2.1.1	Zunahme des PKW-Verkehrs	3
2.1.2	Veränderungen der Moduswahl und Zielwahl	3
2.1.3	Mobilität des nichtmotorisierten Individualverkehrs	4
2.2	Chancen und Einsatzgrenzen im Radverkehr	4
2.2.1	Systemeigenschaften des Fahrrades	4
2.2.2	Radverkehr - effizient auf kurzen Strecken	4
2.2.3	Strukturelle Verbesserungen im nmIV	5
2.3	Modellierung als Planungsinstrument	6
2.3.1	Verbesserung der Systemverständnis	6
2.3.2	Verkehrsmodell als Analyse-Instrument	6
2.4	Vorhandene Routenwahlmodelle für Radverkehr	7
2.4.1	Routenplaner im Internet	7
2.4.2	Dokumentationen zu Routenwahlmodellen	7
3	Netzmodellierung	9
3.1	Öffnen vorhandener Netzelemente	9
3.1.1	Strecken	9
3.1.2	Anbindungen an die Quell- und Zielbezirke	9
3.1.3	Abbiegebeziehungen	9
3.2	Besondere Strecken und Abbieger	10
3.2.1	Einbahnstraßen und Fußgängerzonen öffnen	10
3.2.2	Staffeln sperren	11
3.2.3	Fehlende Strecken einpflegen	12
3.2.4	Zulässige Abbiegebeziehungen öffnen	12
3.2.5	Fahrradspuren an Knotenpunkten	12
4	Aufbau der Widerstandsfunktion	15
4.1	Zeit als Größe des Widerstands	15
4.1.1	Befahrungen	15
4.2	Komponenten der Reisezeit	17
4.2.1	Reisezeit auf freien Strecken	17
4.2.2	Mittlere Abbiegewartezeit an Kreuzungen	18
4.2.3	Anbindungszeiten von Quell- und Zielbezirk	18
4.3	Einfluss des mIV auf den Widerstand	18
4.3.1	Geschwindigkeit des mIV	19
4.3.2	Verkehrsstärke des mIV	19
4.3.3	Widerstandsfaktoren als Analyse-Instrument	20
4.4	Straßenunabhängig geführte Radwege	21
4.5	Straßenbegleitende Radwege	22

4.5.1	Bordsteinradwege	22
4.5.2	Linke Radwege	23
4.5.3	Radfahrstreifen	23
4.5.4	Radschutzstreifen	24
5	Validierung	25
5.1	Befahrungen	25
5.2	Routensuche	26
5.3	Fahrzeitprofil	27
5.4	Höhenprofil	28
6	Ergebnisse	29
6.1	Radroutenplaner im Internet	29
6.2	Fahrrad und öffentlicher Verkehr	29
6.3	Modell zur Radverkehrsplanung	30
	Anhang	33
A	Dokumentation	33
A.1	Verkehrssystem Rad	33
A.2	Netzelemente öffnen	33
A.2.1	Strecken	33
A.2.2	Anbindungen	34
A.2.3	Fehlende Strecken	34
A.3	Widerstandsfunktion	34
A.3.1	Längsneigung berechnen	34
A.3.2	Widerstand	35
A.3.3	Geschwindigkeit aus Steigung berechnen	35
A.3.4	Reisezeit aus Geschwindigkeit berechnen	36
A.4	Einbahnstraßen gegen Fahrtrichtung	36
A.5	Abbiegebeziehungen	38
A.6	Widerstandsfaktoren im Radverkehr	38
A.6.1	Radwiderstandsfaktor Geschwindigkeit mIV	38
A.6.2	Radwiderstandsfaktor Verkehrsstärke mIV	39
A.6.3	Radwiderstandsfaktor	39
A.6.4	Radverkehrsanlagen	39
A.7	Auswertung und Analyse	40
A.7.1	Bezirke außerhalb Stuttgart	40
A.7.2	Nachfragematrix	40
A.7.3	Umlegung	40
A.7.4	Kenngößen	41
A.7.5	Zeit-Weg-Diagramm	41
B	Quellcodes zu den Programmen	43
B.1	Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Steigung	43
B.2	Reisezeit in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Länge	43
B.3	Einbahnstraßen öffnen	44
B.4	Einfluss aus mIV-Geschwindigkeit und Verkehrsstärke	45
B.5	Verknüpfung von RadWidFakQ und RadWidFakV	46
B.6	Widerstandsfaktoren für Radverkehrsanlagen	46

C Aufzeichnung zu den Befahrungen	49
C.1 Route 3: Liederhalle - Mineralbäder	49
C.2 Route 1: Hasenbergst. 45 - Liederhalle	50
C.3 Route 2: Burgstallstr. - Hasenbrgstr. 45	52
C.4 Route 4: Hölderlinplatz - Wilhelmsplatz	54
C.5 Route 5: Keplerstr. - Traubenstr.	56
C.6 Route 6: Sattlerstr. - Kunstakademie	58
C.7 Route 7: Berliner Platz - Marienplatz	60
C.8 Route 8: Ameisenbergstraße - Wilhelmsplatz	62
C.9 Route 9: Nordbahnhof - Schlossgarten	64
Literaturverzeichnis	68
Abbildungsverzeichnis	69
Tabellenverzeichnis	69

1. Zielsetzung

„Zuerst müssen wir das Fahrrad als Verkehrsmittel wahrnehmen und nicht nur als Freizeitobjekt.“

1.1 Verkehrsplanung im nichtmotorisierten Individualverkehr

Während in den vergangenen Jahren die Modellierungs- und Simulationsmethoden zur Planung im motorisierten Individualverkehr und im öffentlichen Verkehr sehr weit vorangebracht wurden, hat sich diese systematische Vorgehensweise im nichtmotorisierten Individualverkehr noch nicht durchgesetzt. Der nichtmotorisierte Individualverkehr verfügt nicht über einen großen Verkehrsmarkt was die Umsätze anbetrifft, jedoch sind die Modi des nmIV bezogen auf die Anzahl der Wege eine bedeutende Größe. Eine gute Planung des nichtmotorisierten Individualverkehrs ist dringend notwendig. Schließlich sind Fußgängerverkehr und Radverkehr ressourcenschonend und emissionsarm. Sie tragen entscheidend zur Lebensqualität in der Stadt bei.



Abbildung 1.1: Wilhelmsplatz und Rotebühlplatz

1.2 Zielstellung der Diplomarbeit

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird auf der Grundlage des bestehenden Netzmodells von Stuttgart das Verkehrssystem Fahrrad eingeführt. Dabei sollen durch die Erweiterungen keine Änderungen in den Ergebnissen der anderen Verkehrssysteme entstehen. Es soll daraufhin eine Widerstandsfunktion für das neue Verkehrssystem Fahrrad entwickelt werden, mit deren

Hilfe man die Routenwahl der Radfahrer qualitativ richtig nachbilden kann. Dieses Routenwahlmodell soll unter Umständen als Grundlage für einen Routenplaner dienen. Mit Hilfe des Routenwahlmodells wird eine gegebene Nachfrage in einer Umlegung auf diese Routen verteilt.

Damit kann das Verkehrsmodell dazu dienen, dass Maßnahmen, die das Verkehrssystem Rad betreffen, analysiert werden können. Beispiele für Maßnahmen sind die Anlage von straßenbegleitenden Radwegen oder die Öffnung von Einbahnstraßen für den Radverkehr. Das Modell soll auch dazu dienen, die vorhandenen Anlagen des Radverkehrs zu speichern und zu verwalten.

Es wird darauf hingewiesen, dass das Modell kein vollständiges Verkehrsmodell darstellt. In der folgenden Zusammenstellung sind die Leistungsmerkmale des Modells zusammengestellt.

- Für die Diplomarbeit wird lediglich der Schritt der Routenwahl betrachtet. Die übrigen Modellschritte des 4-Stufen-Algorithmus Erzeugung, Zielwahl und Moduswahl werden nicht modelliert. Um dennoch eine Verkehrsnachfrage umlegen zu können, wird 5% des Pkw-Verkehrs angesetzt.
- Es handelt sich um ein aggregiertes Modell. Es wird nicht nach Personengruppen unterschieden, auch wenn Alter, Einkommen, soziales Umfeld und körperliche Fitness sicherlich eine Rolle spielen. Diese Faktoren spielen wohl auch stärker für die Verkehrserzeugung, die Moduswahl und die Zielwahl eine Rolle. Die körperliche Fitness spielt jedoch für die Routenwahl und das Fahrzeitprofil durchaus eine Rolle.
- Die Widerstandsfunktion ist nicht belastungsabhängig, da in der Regel die Kapazität der Wege nicht von der Nachfrage durch Radfahrer überschritten wird. Dies liegt zum einen an der gegenwärtig geringen Nachfrage, zum anderen an dem sehr geringen spezifischen Flächenverbrauch des Verkehrssystems. Die CR-Funktion für das Verkehrssystem „Rad“ ist daher konstant.



Abbildung 1.2: Hasenbergstraße und Hauptbahnhof

2. Grundlagen

„Der Natur ist es gleichgültig, ob die verborgenen Gründe und Arten ihres Handelns den Menschen verständlich sind oder nicht.“ (Galileo Galilei)

2.1 Motivation zur Verkehrsplanung im Radverkehr

2.1.1 Zunahme des PKW-Verkehrs

In der Vorstellungswelt vieler Verkehrsplaner ist die Zunahme des motorisierten Individualverkehrs eine Frage der Verkehrserzeugung. Man spricht vom sogenannten „induzierten Verkehr“. Als induzierter Verkehr werden Wege verstanden, die zuvor nicht unternommen wurden, weil man nicht die Möglichkeit hatte diese Wege zu unternehmen. Diese Vorstellung von induziertem Verkehr ist nicht richtig. Aus Verkehrserhebungen weiß man, dass die Weghäufigkeit eine der stabilsten Größen im Verkehrswesen ist. Sie liegt konstant im Bereich von 2,5 und 3,5 Wegen am Tag und wird vermutlich mehr von den soziologischen Rahmenbedingungen verschiedener Personengruppen bestimmt, als von den vorhandenen Verkehrsmitteln. [1]

Wenn also nicht die Verkehrserzeugung zu einer Zunahme des Verkehrs führt, so müssen die Gründe im Bereich der Zielwahl und der Moduswahl zu suchen sein. Tatsächlich kann man beobachten, dass sich die Moduswahl in den vergangenen fünfzig Jahren immer weiter von den Systemen des nichtmotorisierten Individualverkehrs hin zum motorisierten Individualverkehr verschoben hat. Auch bei der Zielwahl läßt sich feststellen, dass statt der Ziele in der Nähe des Wohnorts immer weiter entfernte Ziele gewählt werden. Dies führt dazu, dass die Wege immer länger werden.

2.1.2 Veränderungen der Moduswahl und Zielwahl

Woher kommen die Änderungen in der Modus- und Zielwahl? Die Antwort ist einfach: Da man die Infrastruktur des motorisierten Individualverkehrs immer weiter ausgebaut hat, führte dies zu einer geänderten Moduswahl. Oftmals haben sich die Bedingungen für den nichtmotorisierten Individualverkehr im gleichen Zeitraum verschlechtert.

Die Verbesserungen in der Infrastruktur des motorisierten Individualverkehrs führten zu einer Erhöhung der Reisegeschwindigkeiten. Dies führte dazu, dass weiter entfernt gelegene, attraktive Ziele zunehmend in einen Wettbewerb mit den Zielen in der Nähe des Wohnortes traten. Die größere Attraktivität ist auf die größere Zentralität dieser Ziele zurückzuführen. Da aufgrund der größeren Zentralität ein größerer Einzugsbereich abgedeckt wird, ist die Anlieferung der Waren leichter und muss nur an wenige zentrale Einrichtungen erfolgen. Somit ist bei geringerem Personalaufwand ein höherer Umsatz möglich und die Waren können zu günstigeren Preisen angeboten werden. Der Transport in die Fläche wird von den Kunden selbst übernommen. Da Ziele mit einem kleineren Einzugsbereich und geringerer Zentralität auf diese Weise Kunden verlieren und unrentabel werden, verschwinden sie mit der Zeit. Somit ist die geänderte Zielwahl mit größeren Reiseweiten leicht erklärbar. Sie ist auf die höhere mittlere Reisegeschwindigkeit zurückzuführen.

2.1.3 Mobilität des nichtmotorisierten Individualverkehrs

Bisher wurde Radverkehr und Fußgängerverkehr in der Verkehrsmodellierung so gut wie nicht berücksichtigt. Es wurden bei der Moduswahl nur die Alternativen ÖV und mIV betrachtet. Dabei begeht man aber einen Fehler, denn der nmIV hat einen erheblichen Anteil am Verkehr, besonders, wenn man ihn auf die Zahl der Wege bezieht und nicht auf die zurückgelegten Kilometer. Bei einer Maßnahme zur Verbesserung des mIV speist sich der induzierte Verkehr also im Wesentlichen aus der Vergrößerung der Fahrtweite der Wege des mIV und daraus, dass sich der Modal-Splitt zu Ungunsten des nmIV verändert. Dies läßt sich in einer Modellierung aber nur dann wirklich abbilden, wenn auch die Modi des nmIV miteinbezogen werden. Weiterhin bedeutet eine Zunahme des mIV im Allgemeinen eine Verschlechterung der Attraktivität des nmIV, da die Wege weiter werden (Die Ziele im Nahbereich werden weniger attraktiv oder verschwinden ganz). Außerdem wird die Mobilität des nmIV eingeschränkt, da die Überquerung von Straßen bei hohen Geschwindigkeiten und Verkehrsstärken im mIV erschwert wird und zu größeren Umwegen führt.

2.2 Chancen und Einsatzgrenzen im Radverkehr

2.2.1 Systemeigenschaften des Fahrrades

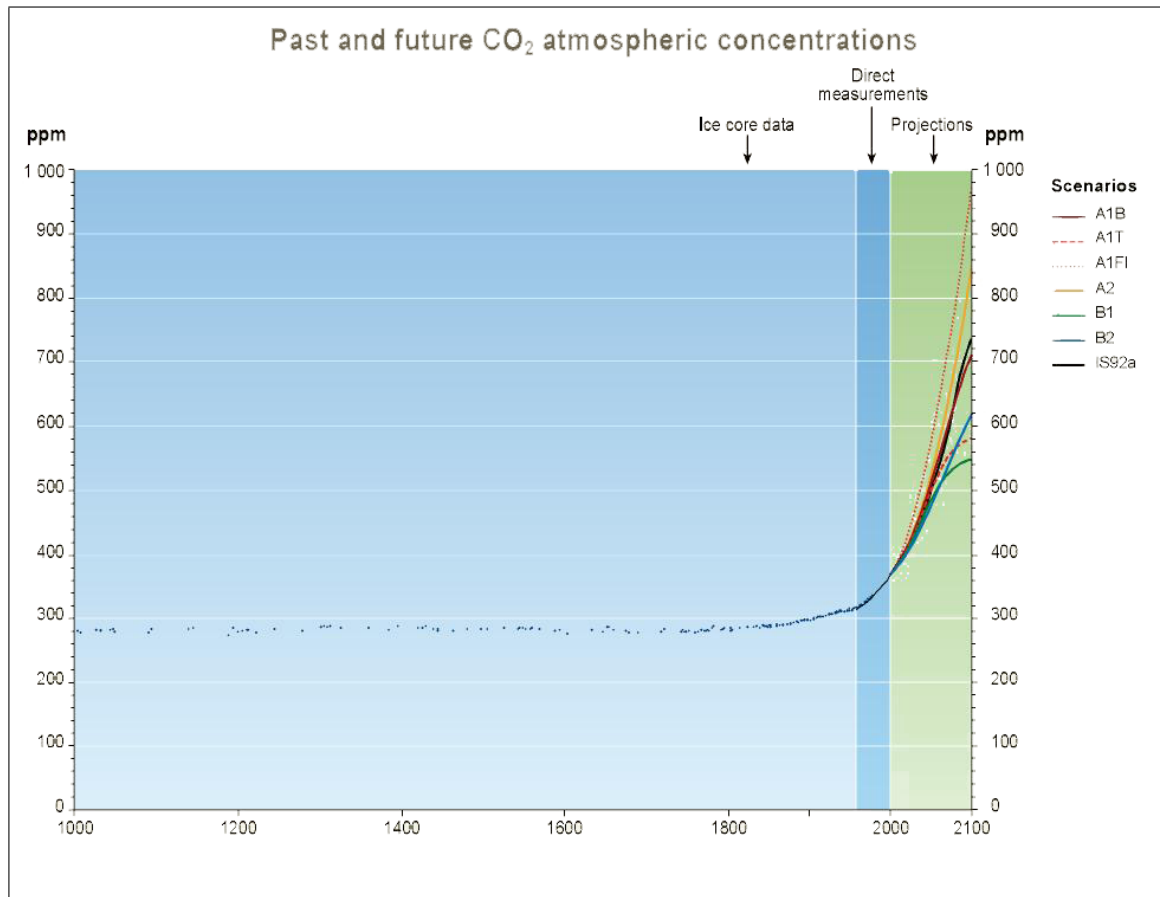
Das Fahrrad ist als Transportsystem des Individualverkehrs zeitlich sehr flexibel einsetzbar. Im Vergleich zum Auto hat es einen deutlich geringeren Flächenverbrauch sowohl für die Fahrbahnen, als auch für die Lagerung im abgestellten Zustand. Dadurch ist die Transportleistung bezogen auf den Flächenverbrauch hoch. Weiterhin verbraucht das Fahrrad im Gegensatz zum Auto keine fossilen Energieträger wie Öl oder Gas. Es wird daher durch den Radverkehr auch kein zusätzliches klimabeeinflussendes CO₂ in den atmosphärischen Kohlenstoff-Kreislauf freigesetzt.

Ein weiterer Vorteil ist, dass nach den, im Vergleich zum Auto, geringen Anschaffungskosten das Verkehrssystem bei niedrigen Betriebs- und Reparaturkosten genutzt werden kann. Das Fahrrad sichert Mobilität also besonders für einkommensschwache Personengruppen ab. Weiterhin ist das Fahrrad das erste Verkehrssystem, mit dem Kinder mit den Regeln des Individualverkehrs vertraut gemacht werden. Die Nutzung des Fahrrades erweitert als erstes Verkehrssystem deren Aktionsradius. [2]

Das Fahrrad hat auch einige systematischen Nachteile. So ist der Fahrkomfort sehr stark witterungsabhängig. Bei unzureichender Beleuchtung ist auch die Benutzung bei Dunkelheit bedenklich. Aus den beiden aufgeführten Gründen wird das Fahrrad als Transportmittel stärker im Sommer eingesetzt als im Winter. Außerdem ist das Radfahren eine anstrengende Fortbewegungsart, da nicht auf externe Energiequellen zurückgegriffen wird. Dies wird vor allem bei starken Steigungen und größeren Distanzen als sehr unangenehm empfunden. Auch für den Transport von Gütern, zum Beispiel beim Einkauf, ist die Nutzung des Fahrrades ungeeignet. Außerdem bietet das Fahrrad im Falle eines Unfalls sehr wenig passive Sicherheit. Bei einem Zusammenstoß mit einem Auto oder einem Sturz kann es zu schweren Verletzungen kommen.

2.2.2 Radverkehr - effizient auf kurzen Strecken

Das Fahrrad ist aufgrund der geringen Zugangs- und Abgangszeiten ein sehr schnelles Verkehrsmittel auf kürzeren Distanzen zwischen 500 m und 2500 m. Besonders im Stadtverkehr bietet es Vorteile, da keine besonders große Parkfläche benötigt wird. Außerdem ist teilweise die Mitbenutzung von Anlagen des Fußgängerverkehrs möglich und die Benutzung von Einbahnstraßen gegen die Fahrtrichtung zugelassen. Dies ermöglicht es häufig direktere Verbindungen zu wählen, als dies mit dem Pkw möglich ist. In dem Modell der Stadt Stuttgart, mit dem diese Diplomarbeit bearbeitet wird, haben die Verkehrszellen einen Durchmesser

Abbildung 2.1: CO₂-Konzentration in der Atmosphäre [3]

zwischen 100 m und 1000 m. Man kann also annehmen, dass der Fahrradverkehr nicht nur im Binnenverkehr der Verkehrszellen eine Rolle spielen wird. Das gesamte Gebiet für das in dieser Diplomarbeit der Radverkehr modelliert werden soll, hat einen Durchmesser von ca. 6 km. Es ist davon auszugehen, dass bei zunehmender Entfernung der Verkehrszellen, der Anteil des Radverkehrs am Modal-Splitt abnehmen wird. Für eine überschlägige Erstellung der Verkehrsnachfrage für den Radverkehr, kann dies berücksichtigt werden, indem die Matrix des Pkw-Verkehrs in Abhängigkeit der Luftlinienentfernung von Quell- und Zielzelle mit unterschiedlichen Prozent-Sätzen multipliziert wird.

2.2.3 Strukturelle Verbesserungen im nmIV

Durch eine Verbesserung der Infrastruktur im nichtmotorisierten Individualverkehr ist es möglich, Einfluß auf die Moduswahl zu nehmen. Es ist denkbar, eine weitere Zunahme des mIV zu vermeiden und eventuell sogar Anteile am Verkehr für den nichtmotorisierten Verkehr zurückzugewinnen. Dem Radverkehr kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da er eine höhere Reisegeschwindigkeit als im Fußgängerverkehr ermöglicht und somit auch auf Relationen größerer Entfernungen noch eine attraktive Alternative darstellt. Neben den Verbesserungen der Wegeinfrastruktur ist in diesem Zusammenhang auch die Bereitstellung eines Routenplaners im Internet von Vorteil. Außerdem besteht in vielen Städten ein deutlicher Mangel an Abstellmöglichkeiten für Fahrräder beispielsweise an den Eingängen von Fußgängerzonen oder an Bahnhöfen und Haltestellen des öffentlichen Verkehrs. Dadurch wird unter Umständen das Potential des Radverkehrs nicht vollständig ausgeschöpft. Gerade Stuttgart könnte hier noch einiges von Beispielen in Freiburg oder Münster lernen.



Abbildung 2.2: Rosensteinpark und Nordbahnhofstraße

2.3 Modellierung als Planungsinstrument

2.3.1 Verbesserung der Systemverständnis

Im Allgemeinen kann man davon ausgehen, dass Modelle helfen, Wirkungszusammenhänge besser zu verstehen. Auf dem Weg zu einem funktionierenden Modell, das die Realität in ihren wesentlichen Eigenschaften wiedergibt, findet man unter Umständen sogar bis dahin unbekannte Wirkungszusammenhänge. Ein Modell kann als funktionsfähig angesehen werden, wenn es auf Einwirkungen im Wesentlichen so reagiert, wie dies in der Realität auch der Fall ist. Mit einem nachvollziehbaren und in sich schlüssigen Modell lassen sich also Aussagen treffen, die im Idealfall von subjektiven Ansichten unabhängig sind. Ein schönes Beispiel sind Modelle zur Wettervorhersage, da die Zeitspanne zwischen Prognose und Validierung durch die Realität sehr kurz ist. Man kann sich also kein Wettermodell vorstellen, das davon abhängig ist, ob der Meteorologe sich ein Hochdruckgebiet wünscht oder ein Tiefdruckgebiet. Auch die Schwierigkeit der Modellierung wird dabei deutlich, da es trotz aller Anstrengungen auch bei Wetterprognosen noch immer zu falschen Vorhersagen kommt.

Da Modelle auf logischen Verknüpfungen und hinterlegten Daten aufbauen, fördert die Modellierung in jedem Fall ein systematisches Vorgehen und die Vorgehensweise sollte nachvollziehbarer werden. Die Datenverarbeitung lässt sich dadurch zu einem großen Teil automatisieren. Außerdem lassen sich die Ergebnisse eines Modells über eine graphische Darstellung leicht Visualisieren. Dies ermöglicht eine Auswertung der Ergebnisse, die leicht verständlich und schnell erfassbar ist.

2.3.2 Verkehrsmodell als Analyse-Instrument

Wenn man über ein Modell verfügt, das die Realität ausreichend genau wiedergibt, kann man es als Analyseinstrument einsetzen. Im Falle eines Radverkehrsmodells kann man sich beispielsweise vorstellen, dass man Strecken findet, die über einen Radweg verfügen sollten. Oder man findet Stellen, an denen dringend eine Überquerungshilfe über eine stark befahrene Straße notwendig wäre. Wenn man ein solches Modell als Planungshilfe einsetzt, könnte man es auch so einstellen, dass beispielsweise ausgeschlossen wird, dass Radstreifen in Zone-30 Gebieten angelegt werden. Die Maßnahme ist zweifelhaft, weil Zone-30-Straßen an sich schon geeignet für Radfahrer sind, also keine wesentliche Verbesserung durch die Markierung

eintritt. Dazu kommt, dass die abmarkierten Radwege oftmals durch Kfz zugeparkt werden.

2.4 Vorhandene Routenwahlmodelle für Radverkehr

2.4.1 Routenplaner im Internet

Die Suche im Internet hat vier echte Routenplaner für Radfahrer ergeben

- London:
http://journeyplanner.tfl.gov.uk/user/XSLT_TRIP_REQUEST2?language=en
- München:
<http://maps.geo.arch.tu-muenchen.de>
- Berlin:
<http://bbbike.radzeit.de/cgi-bin/bbbike.cgi?begin=1>
- Michelin:
<http://www.viamichelin.com/viamichelin/deu/dyn/controller/Routenplaner>

Der Routen-Planer von London geht von einer Reisegeschwindigkeit von 18 bis 20 km/h aus. Ob eine Abhängigkeit zwischen Geschwindigkeit und Steigung vorhanden ist kann daraus aber nicht abgeleitet werden. Zu diesem Routenplaner lag für die Diplomarbeit keine Dokumentation vor. Die drei zuletzt genannten Routenplaner haben keinen Zusammenhang zwischen der Steigung einer Strecke und der Geschwindigkeit. Die Fahrzeit wird vielmehr aus einer gewünschten Geschwindigkeit berechnet, die man als Eingangsgröße eingibt. Der Routenplaner in Berlin war eine Diplomarbeit von Slaven Rezić. Im Internet ist eine Textfassung erhältlich. Auf der Homepage wird angekündigt, dass das Modell auf Steigungsabhängigkeit erweitert werden soll. Bei den Routenplanern in München und Berlin kann man zusätzlich eingeben, ob Hauptstraßen gemieden werden sollen. Die Information, ob eine Strecke Hauptstraße ist, liegt vermutlich als Attribut vor. Der Routenplaner von Michelin liefert für den Radverkehr keine brauchbaren Routen.

Neben diesen echten Routenplaner gibt es verschiedene Projekte, in denen Radrouten mit Wegbeschreibungen von Radfahrern abgerufen und auch selbst ins Internet gestellt werden können. Es handelt sich dabei jedoch nicht um ein automatisiertes Suchverfahren von Routen, sondern um die Darstellung vorgefertigter Routen. Diese Art von Informationssystem ist wohl für das Radfahren als Freizeitbeschäftigung geeignet, nicht jedoch als Hilfsmittel zur Routenplanung für das Fahrrad als Verkehrssystem im Alltag.

2.4.2 Dokumentationen zu Routenwahlmodellen

In Japan wurde von Hyodo, Suzuki und Takahashi ein Modell entwickelt, das die Routenwahl in Abhängigkeit von Infrastruktureigenschaften der Radwege angibt. Als Beispiele dafür werden die Straßenbreite oder das Vorhandensein eines Bordsteinradweges angegeben. Ein Artikel auf Englisch dazu ist in „Transportation Research Record No. 1705“ erschienen. Er trägt den Titel „Modeling of Bicycle Route and destination choice behavior for bicycle road network plan“. Der Artikel lag für die Diplomarbeit allerdings nicht vor.

Aus der Dokumentation zur Diplomarbeit von Slaven Rezić für den Routenplaner in Berlin geht hervor, dass die Routenwahl auf einem Suchalgorithmus nach der Streckenlänge beruht. Es wird also immer der streckenkürzeste Weg gesucht. Alle weiteren Einflussgrößen, wie die Beschaffenheit des Belages, Kreuzungen mit Lichtsignalanlagen, Hauptverkehrsstraße oder Nebenstraße etc. werden über Zuschläge zur Wegstrecke berücksichtigt. Für den Routenplaner in München wurden die selben Suchalgorithmen benutzt. Das Referat für Gesundheit und Umwelt der Stadt München hat dafür das Programm von Slaven Rezić eingekauft.

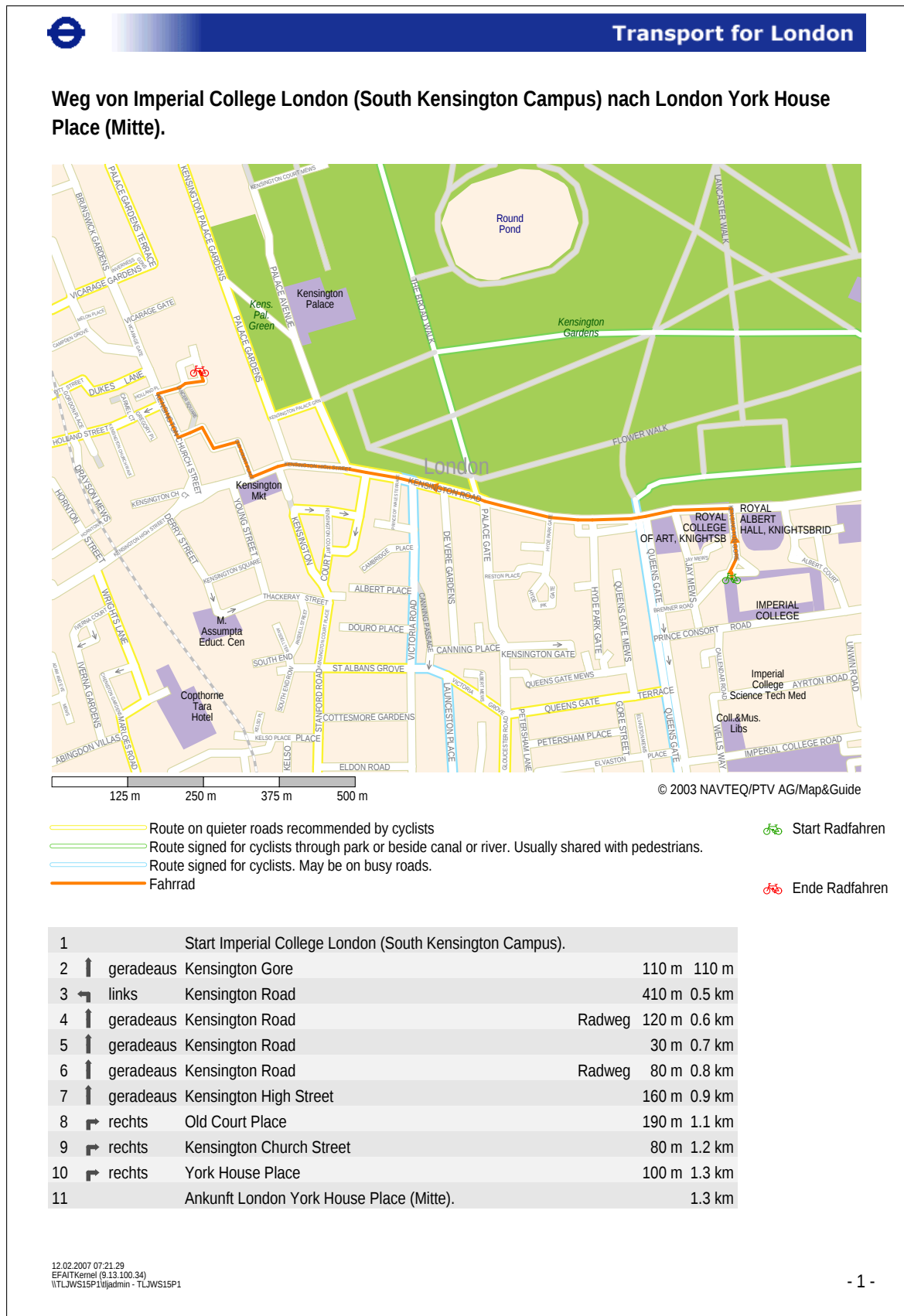


Abbildung 2.3: Beispiel Routenplaner London [4]

3. Netzmodellierung

„Wer exakt plant, irrt sich genauer.“

3.1 Öffnen vorhandener Netzelemente

Für die Bearbeitung der Diplomarbeit wurde das Netzmodell der Stadt Stuttgart zur Verfügung gestellt. Ein Teil der Diplomarbeit ist die Anpassung dieses Netzmodells, so dass es zur Verkehrsplanung im Radverkehr eingesetzt werden kann.

3.1.1 Strecken

In einem ersten Schritt werden alle Strecken des Netzes, deren zulässige Geschwindigkeit unter 70 km/h liegt für den Radverkehr zugelassen. Neben den Strecken, die für Pkw-Verkehr geöffnet sind, existieren auch andere Streckentypen. Von diesen wurden die Streckentypen Fussweg (Rad möglich), Radweg und Forstweg geöffnet. Außerdem existieren Strecken der Typen Fußweg (Staffel) und Fußgängerzone, auf denen Radfahren zum Teil erlaubt ist. Auf diesen Strecken müssen die Anpassungen im Einzelfall vorgenommen werden.

Im Verlauf der Diplomarbeit stellte sich jedoch heraus, dass einige der Streckentypen, die zulässige Geschwindigkeiten zwischen 50 und 70 km/h aufweisen, absolut ungeeignet für Radverkehr sind. Diese wurden daher nachträglich wieder gesperrt, um ein Routing über diese Strecken absolut ausschließen zu können. Die betreffenden Strecken verlaufen zum Teil in Tunnels, verfügen über Zufahrtsrampen oder erfordern Spurwechsel, die von einem Radfahrer nicht zu bewältigen sind.

3.1.2 Anbindungen an die Quell- und Zielbezirke

Es werden alle Anbindungen des mIV auch für den Radverkehr geöffnet. Die Anbindungszeit wird pauschal auf vier Minuten festgelegt. Für diese Annahme liegen zwar keine Erhebungsdaten, aus Befragungen von Radfahrern vor, dennoch kann die Annahme als plausibel angesehen werden.

3.1.3 Abbiegebeziehungen

Für die Abbiegebeziehungen gelten die gleichen Regeln im Radverkehr, wie im motorisierten Individualverkehr. Daher werden zunächst ebenfalls alle Abbiegebeziehungen die für Pkw geöffnet sind auch für Radverkehr freigegeben. Außerdem dürfen Radfahrer aber auch auf Strecken abbiegen, bzw. aus Strecken einbiegen, die zwar für Radverkehr zugelassen, für den mIV jedoch gesperrt sind. Es handelt sich hierbei größtenteils um Radwege und Fußwege, die für Radverkehr geöffnet sind. Die Öffnung dieser Abbiegebeziehungen erfolgt mit drei Filter-Abfragen:

- Abbiegen vom Straßennetz auf Radwege:

von Strecke	$VSysset = Pkw$
nach Strecke	$VSysset \neq Pkw$
nach Strecke	$VSysset = Rad$

- Abbiegen von Radwegen auf Radwege:

von Strecke	$VSysset \neq Pkw$
nach Strecke	$VSysset \neq Pkw$
von Strecke	$VSysset = Rad$
nach Strecke	$VSysset = Rad$

- Abbiegen von Radwegen auf das Straßennetz:

von Strecke	$VSysset \neq Pkw$
von Strecke	$VSysset = Rad$
nach Strecke	$VSysset = Pkw$

3.2 Besondere Strecken und Abbieger

Für den Radverkehr sind noch weitere Elemente des Streckennetzes geöffnet, die für den mIV geschlossen sind. So sind Einbahnstraßen teilweise gegen die Fahrtrichtung geöffnet, es gibt Fußgängerzonen, in denen Radfahren erlaubt ist und es gibt besondere Abbiegebeziehungen an Kreuzungen, die für den Radverkehr geöffnet sind. Im folgenden Abschnitt soll gezeigt werden, wie diese Änderungen vorgenommen wurden.

3.2.1 Einbahnstraßen und Fußgängerzonen öffnen

Um sich einen Überblick über die in Stuttgart geöffneten Einbahnstraßen zu verschaffen und die Freischaltung von Einbahnstraßen gegen die Fahrtrichtung für Radverkehr zu erleichtern wird ein benutzerdefiniertes Attribut „Einbahnoffen“ eingeführt. Dieses ist vom Typ Ganzzahl und bekommt standardmäßig für alle Strecken den Wert Null. Nun wird bei jeder Einbahnstraße, die gegen die Fahrtrichtung geöffnet ist, dieser Wert auf Eins geändert. Mit diesem System lassen sich die geöffneten Einbahnstraßen leicht verwalten. Über ein Filterkriterium kann man sich die entsprechenden Strecken auf der Karte oder in einer Datenbank anzeigen lassen. Die Daten über geöffnete Einbahnstraßen in Stuttgart lagen für die Diplomarbeit vor. [5] Mit Hilfe eines kleinen VBA-Programms kann man nun für jede Strecke, deren Attribut „Einbahnoffen“ den Wert Eins aufweist die nötigen Änderungen für die Öffnung der Strecke in einer Datenbank automatisiert ablaufen lassen. Dies ermöglicht eine schnelle und wenig fehleranfällige Bearbeitung der Strecken.

Im Allgemeinen sind Fußgängerzonen für den Radverkehr gesperrt. Daher wurde dieser Streckentyp nicht für Radverkehr geöffnet. Es gibt jedoch durchaus Fußgängerzonen, die für den Radverkehr geöffnet sind. Als Beispiel hierfür sei die Hohe Straße zwischen der Weimarstraße und der Fritz-Elsass-Straße genannt. Diese Strecken müssen für den Radverkehr geöffnet werden. Das Vorgehen ist dabei identisch zur Öffnung von Einbahnstraßen gegen die Fahrtrichtung. Statt das Attribut „Einbahnoffen“ auf Eins zu setzen, wird lediglich der Wert Zwei eingesetzt. Wichtig ist, dass diese Änderung für beide Richtungen einer Strecke vorgenommen werden muss.



Abbildung 3.1: Einbahnstraßen und Fußgängerzone

3.2.2 Staffeln sperren

Die Besonderheit am Typ Fußweg (Staffel) ist, dass bei Weitem nicht alle Strecken dieses Typs tatsächlich Staffeln sind. Beispielsweise gibt es Strecken im Schlosspark, die absolut flach sind und auf denen Radfahren erlaubt und erwünscht ist, die aber als „Staffel“ abgespeichert sind. Nun müsste man eigentlich alle Strecken dieses Typs kontrollieren, ob tatsächlich Treppen vorhanden sind, beziehungsweise ob Radfahren zugelassen ist. Dies ist eine mühsame Arbeit und wurde aus Zeitgründen nicht gemacht. Statt dessen wurden alle Strecken vom Typ Fußweg (Staffel) mit einem Gefälle, das kleiner als acht Prozent beträgt, gefiltert und deren Kapazität und zulässige Geschwindigkeit auf Werte größer eins gesetzt. Die verbliebenen Strecken sind für das Verkehrssystem Rad weiterhin gesperrt.

Es ist enorm wichtig, dass im Netzmodell keine Strecken mit Treppen für den Radverkehr geöffnet sind. Zum einen untergräbt eine Routenempfehlung mit Treppen die Glaubwürdigkeit des Systems, zum anderen könnte der Betreiber eines solchen Systems rechtlich belangt werden, wenn es aus diesem Grund zu einem Schadensfall kommen sollte.



Abbildung 3.2: Staffel und Fußgängerzone

3.2.3 Fehlende Strecken einpflegen

Da das vorhandene Netz für die Verkehrsplanung im Kfz-Verkehr eingesetzt wird, ist die Infrastruktur die dem Radverkehr zur Verfügung steht nicht überall vollständig vorhanden. Es wird häufig erst durch die Befahrungen deutlich, wo Strecken im Netzmodell fehlen. Für eine komplette Ergänzung fehlender Strecken gibt es vielleicht effektivere Methoden, als die Befahrung und Ergänzung des Netzes „von Hand“. Im Anhang findet sich eine Aufstellung, welche Strecken im Rahmen der Diplom-Arbeit in das Visum-Netz eingepflegt wurden.

3.2.4 Zulässige Abbiegebeziehungen öffnen

An manchen Kreuzungen sind Radfahrern Abbiegebeziehungen erlaubt, die für den Kfz-Verkehr gesperrt sind. Als wichtiges Beispiel sei hier die Kreuzung Kronenstraße - Friedrichstraße genannt. Es handelt sich um einen lichtsignalgesteuerten Knotenpunkt. Hier gibt es für Radfahrer eigene Ampeln, die es erlauben auf der Kronenstraße geradeaus die Friedrichstraße zu überqueren.

Ein weiteres Beispiel ist der Bereich Hasenbergstraße - Reinsburgstraße. Auch hier müssen zusätzlich Abbiegebeziehungen geöffnet werden. Diese zusätzlichen Abbiegebeziehungen ergeben sich, da die Hasenbergstraße in diesem Bereich eine für Radfahrer geöffnete Einbahnstraße ist. An der Kreuzung mit der Rotebühlstraße existiert ebenfalls eine Lichtsignalanlage für den Radverkehr. Besonders bei gegen die Fahrtrichtung geöffneten Einbahnstraßen kann es nötig sein, nachträglich die Abbiegebeziehungen zu kontrollieren. Diese Abbiegebeziehungen werden teilweise nicht durch die Filterkriterien erfasst, die weiter oben benutzt wurden, um Abbiegebeziehungen speziell für den Radverkehr zu öffnen.

Eine weitere Gruppe von Abbiegebeziehungen die einzeln geöffnet werden müssen, sind an Kreuzungen, an denen Abbiegebeziehungen nur für Linienbusse zugelassen sind. Diese Abbiegebeziehungen sind häufig auch für den Radverkehr freigegeben. Ein Beispiel dafür befindet sich in der Johannesstraße bei der Überquerung der Schlossstraße.



Abbildung 3.3: Abbiegebeziehungen an Knotenpunkten

3.2.5 Fahrradspuren an Knotenpunkten

An großen Knotenpunkten, auf denen Radfahrern eigene „Aufstellspuren“ und Abbiegebeziehungen angeboten werden, muss genauer modelliert werden. Ein schönes Beispiel dafür ist die Kreuzung am Neckartor. Hier wird das Streckennetz-Modell im mIV für Hin- und Rückrichtung für die Cannstatter Straße in eigene Strecken aufgetrennt. Daher sind die Abbiegebeziehungen hier komplizierter als an Knotenpunkten bei denen Hin- und Rückrichtung in einer Strecke modelliert wurden. Für den Radverkehr wurde außerdem eine zusätzliche

Ampelphase eingeführt, mit deren Hilfe es möglich ist, aus dem Schlosspark Richtung Neckarstraße, bzw. Richtung Kernerstraße abzubiegen. Zur Modellierung wurden hier neue Strecken in das Netzmodell eingefügt. Nähere Angaben dazu finden sich im Anhang.



Abbildung 3.4: Kreuzung am Neckartor

4. Aufbau der Widerstandsfunktion

„Das Basiselement für die Formulierung von Widerstand ist in allen Fällen das Phänomen Zeit, weil

- Zeit die grundlegende Voraussetzung für die Durchführung von bzw. Teilnahme am Verkehr ist*
- Zeit die einzige Größe ist, die in ihrer reinen Form nicht substituiert oder gelagert werden kann*

Aus diesem Grund sind alle weiteren Einflussgrößen in zeitäquivalente Größen zu transformieren.“ (Klaus Walther, Andreas Oetting) [6]

4.1 Zeit als Größe des Widerstands

Der Modellansatz beruht darauf, die Reisezeit eines Radfahrers von einem Punkt im Netz zu einem anderen Punkt realitätsnah zu modellieren. In den weiteren Schritten wird diese Widerstandsfunktion so erweitert, dass Radverkehrsanlagen, Geschwindigkeit im mIV sowie Verkehrsstärke im mIV berücksichtigt werden.

4.1.1 Befahrungen

Um realistische Eingangsgrößen für das Modell zu finden, wurden Befahrungen im Stadtgebiet Stuttgart durchgeführt. Diese sollen insbesondere dazu dienen, einen Zusammenhang zwischen der Steigung einer Strecke und der Geschwindigkeit eines Radfahrers zu finden. Man kann sich leicht vorstellen, dass es keinen Zusammenhang gibt, der für alle Radfahrer gültig wäre. Daher ist es nötig eine Unterteilung vorzunehmen. Diese Unterteilung wurde nicht weiter verfolgt. Für die Diplomarbeit wurden Ansätze gewählt, die einen geübten bis sportlichen Fahrer beschreiben. Dennoch ist es beispielsweise denkbar für einen Routenplaner im Internet ein Auswahlmenü anzubieten. Abhängig von der Auswahl würden dann eventuell auch unterschiedliche Routenempfehlungen zustande kommen. Eine solche Unterteilung kann zum Beispiel folgende Form haben:

- sportliche/r Fahrer/in
- geübte/r Fahrer/in
- ungeübte/r Fahrer/in

Die Befahrungen wurden nur von einer Person, dem Autor, und nur auf neun Routen vorgenommen. Zum Zeitpunkt der Befahrung war sonniges Wetter, die Straßen waren trocken und es wurde ausschließlich bei ausreichendem Tageslicht gefahren. Die Ergebnisse erheben also nicht den Anspruch unter allen Umständen zutreffend zu sein. Dennoch können sie als realistische Anhaltswerte für einen geübten Fahrer auf alltäglichen Wegstrecken unter günstigen äußeren Bedingungen angesehen werden. Wie alle übrigen Annahmen für das Modell

auch, sind die zugrunde gelegten Ansätze nicht empirisch für eine größere Personengruppe abgesichert.

Wichtig sind die Geschwindigkeiten, die in Abhängigkeit der Steigung gefahren wurden. Um die Geschwindigkeiten zu visualisieren, kann man diese in einem Zeit-Weg-Diagramm auftragen. Je flacher die Kurve ist, desto höher ist die gefahrene Geschwindigkeit.

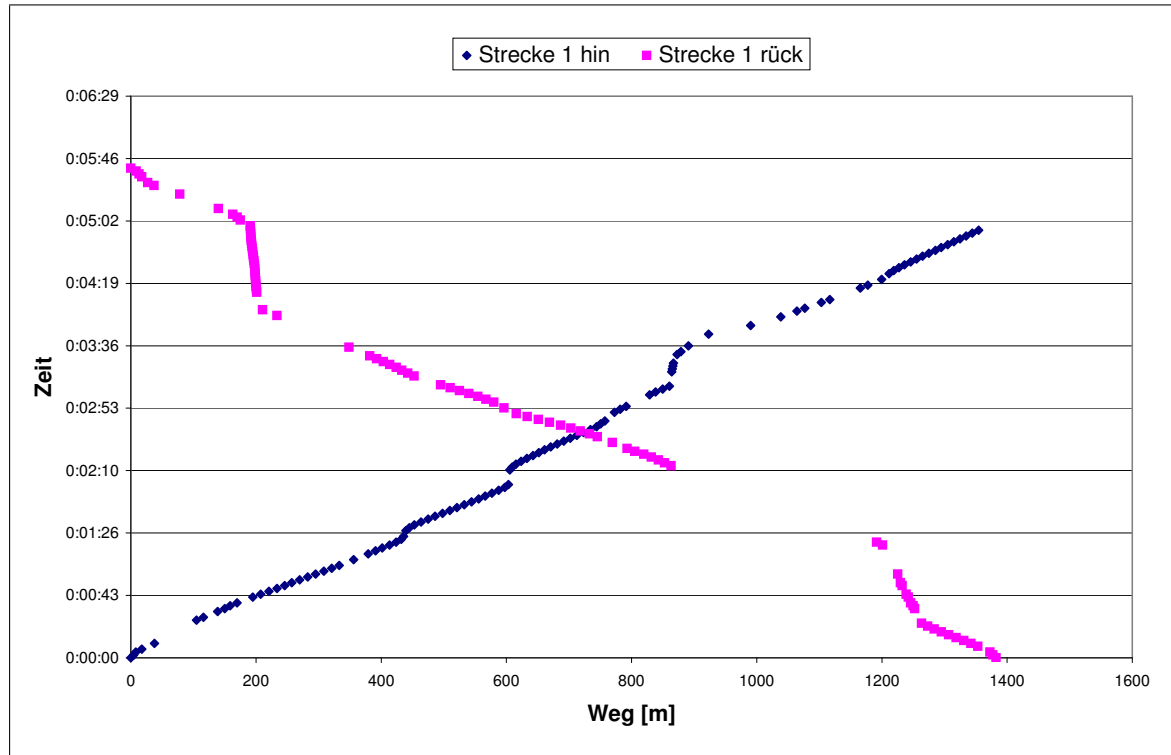


Abbildung 4.1: Zeit-Weg-Diagramm

Aus den Datensätzen lassen sich für Strecken, die eine gleichmäßige Steigung aufweisen, die gefahrenen Geschwindigkeiten ermitteln. Trägt man diese Werte in einem Geschwindigkeits-Steigungs-Diagramm auf, so lässt sich eine Funktion ermitteln, die einen Zusammenhang von Steigung und Geschwindigkeit angibt. Sie geht als Eingangsgröße in die Modellierung ein.

Mit den gemessenen Daten aus der Befahrung wurde folgender Zusammenhang zwischen Steigung und Geschwindigkeit abgeleitet:

$$y = f(x) = \begin{cases} 29 & , x \leq -8 \\ 19 - \frac{25}{20}x & , -8 < x < 12 \\ 4 & , 12 \leq x \end{cases}$$

Für die Modellierung wird eine Höchstgeschwindigkeit von 29 km/h angenommen. Diese kann zwar in der Realität überschritten werden, da aber die Strecken in der Regel kurz sind, können höhere Geschwindigkeiten nicht lange gefahren werden. Daher kann die obige Annahme als realistisch angesehen werden. Außerdem wird eine Grundgeschwindigkeit von 4 km/h angenommen. Diese entspricht der Fußgänger-Geschwindigkeit. Auch diese Annahme

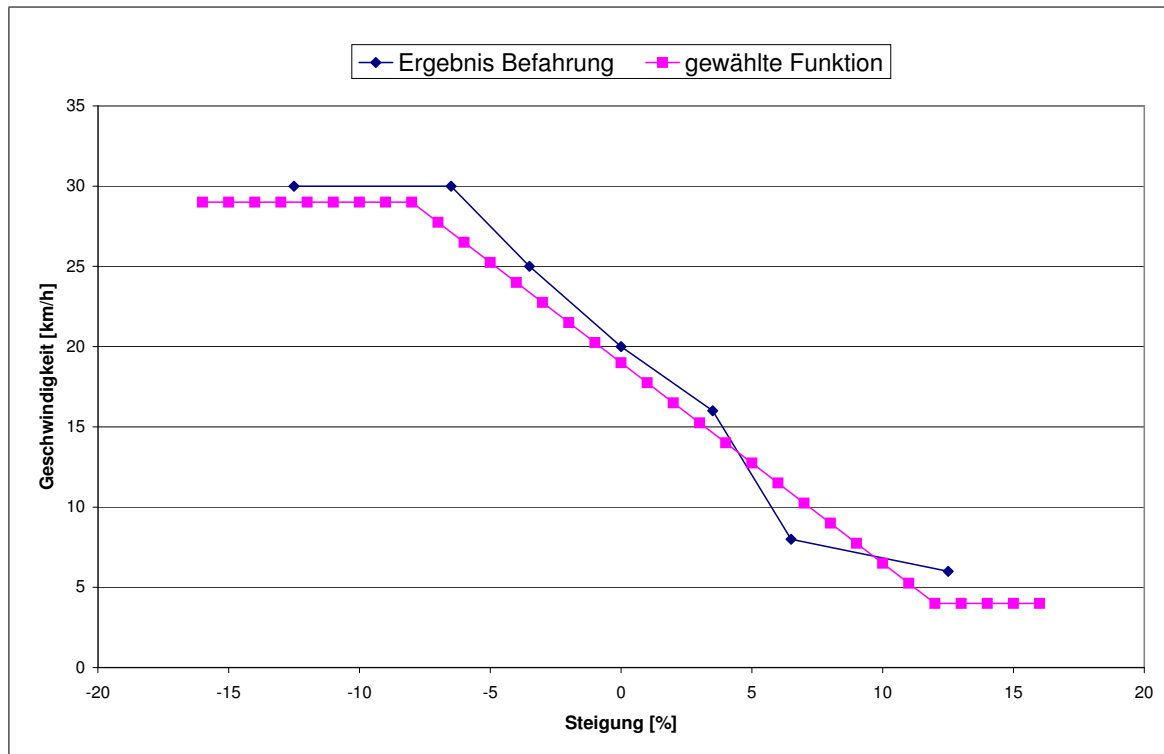


Abbildung 4.2: Zusammenhang Steigung - Geschwindigkeit

kann als realistisch angesehen werden, da beim Erreichen einer kritischen Steigung der Radfahrer vom Rad steigen wird und schiebt. Er hat daher die Fußgänger-Geschwindigkeit. Auch bei einer weiteren Zunahme der Steigung wird für die Modellierung angenommen, dass die Fußgänger-Geschwindigkeit konstant bleibt. Zwischen diesen beiden Punkten wurde linear interpoliert, sodass die Ergebnisse der Befahrungen möglichst mit dem Modell übereinstimmen. Die realen Geschwindigkeiten liegen leicht über den Modellannahmen, um eher auf der sicheren Seite zu liegen. Das heißt in der Realität soll die Fahrzeit im Zweifelsfall kürzer sein als dies vom Modell prognostiziert wurde.

4.2 Komponenten der Reisezeit

Die Reisezeit setzt sich zusammen aus den Anbindungszeiten von Quell- und Zielbezirk, der Fahrzeit auf den Strecken des Netzes, sowie den mittleren Wartezeiten an Kreuzungen (den Abbiegewartezeiten). Aus der Aufsummierung der Zeiten der Teilelemente einer Route erhält man die Reisezeit. Es ist im Modell möglich eine solche Route sowohl zwischen zwei Knoten als auch zwischen zwei Bezirken suchen zu lassen.

4.2.1 Reisezeit auf freien Strecken

Die Reisezeit des Fahrrades lässt sich aus der mittleren Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Steigung und der Weglänge ermitteln. Daher wird für jede Strecke eine mittlere Längsneigung ermittelt. Diese Längsneigung wird mit der unten genannten Formel berechnet und in ein benutzerdefiniertes Attribut für Strecken geschrieben. Die Höhenunterschiede zwischen den Knoten werden über die Differenz der z-Koordinaten der Knoten bestimmt. Auch wenn es in der Realität häufig nicht der Fall ist, wird die Annahme getroffen, dass die Steigung zwischen zwei Knoten konstant sei.

$$\text{Längsneigung}[\%] = \frac{\Delta h[m]}{\text{Streckenlänge}[m]} \cdot 100$$



Abbildung 4.3: Wolframstraße und Stuttgarter Westen

Über eine abschnittsweise definierte Funktion lässt sich einer Steigung eine Fahrgeschwindigkeit zuweisen. Der Verlauf dieser abschnittsweise definierten Funktion entspricht dem oben genannten Zusammenhang aus Steigung und Geschwindigkeit. Auch die zugewiesene Geschwindigkeit wird in ein benutzerdefiniertes Attribut geschrieben.

Nun liegt die Streckenlänge und die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der jeweiligen Steigung vor. Mit diesen Eingangsgrößen kann man die Zeiten für die Strecken berechnen, mit der Formel

$$Zeit[s] = \frac{Weg[m]}{Geschwindigkeit[m/s]}$$

Die Länge liegt im Modell in km vor. Die Geschwindigkeit in km/h. Bei der Berechnung von t_0 -IV (Verkehrssystem Rad) muss daher auf Sekunden umgerechnet werden.

4.2.2 Mittlere Abbiegewartezeit an Kreuzungen

Im Verkehrsmodell sind mittlere Abbiegewartezeiten für den mIV hinterlegt. Diese sind abhängig vom Knotentyp (LiSA, Kreisverkehr, etc...), der Hierarchiestufe der kreuzenden Straßen (Hauptstraße, Nebenstraße, etc...) und der Abbiegebeziehung (rechts, geradeaus, links, U-turn). Da man davon ausgehen kann, dass die mittlere Wartezeiten an Knotenpunkten für den Radverkehr genauso lange sind wie für den mIV, werden hier die selben Zuschläge verwendet.

4.2.3 Anbindungszeiten von Quell- und Zielbezirk

Wie bereits weiter oben erwähnt, wurde die Anbindungszeit pauschal für alle Bezirke auf vier Minuten gewählt.

4.3 Einfluss des mIV auf den Widerstand

Für den Widerstand von Strecken im Radverkehr spielt es eine große Rolle, wie stark der Kfz-Verkehr auf dieser Strecke ist und welche Geschwindigkeit dieser fährt. In [7] findet man dazu ein Diagramm nach dem niederländischen Planungshandbuch für fahrradfreundliche Infrastruktur, das Empfehlungen gibt, wann Radwege angelegt werden sollen. Die Einflussgrößen

sind dabei die Verkehrsstärke und die zulässige Geschwindigkeit. Dieses Diagramm bildet die Grundlage zur Gewichtung des Widerstands aufgrund der Einflüsse aus dem Kfz-Verkehr.

4.3.1 Geschwindigkeit des mIV

Der Überholvorgang von Fahrzeugen wird von Radfahrern als gefährliche Situation wahrgenommen. Dies liegt daran, dass bei höheren Geschwindigkeiten im Kfz-Verkehr das Gleichgewicht eines Radfahrers durch den Fahrtwind der Fahrzeuge gestört werden kann. Zum anderen ist es das Gefahrenpotenzial, das vom Radfahrer wahrgenommen wird. Im Falle eines Fahrfehlers (vom Radfahrer selbst oder dem Kfz-Fahrer) hat der Radfahrer mit zunehmender Geschwindigkeit zunehmend schlechte Aussichten. Für die Modellierung wird also ein „Radwiderstandsfaktor Geschwindigkeit“ eingeführt. Im Bereich von zulässigen Geschwindigkeiten bis 30 km/h wird dieser gleich eins gesetzt. Im weiteren Verlauf wird von einer kubischen Zunahme ausgegangen. In diesem Modell wird dafür eine Funktion verwendet, die in ihrer Form einer CR-Funktion entspricht. Die Reisezeit, die die grundlegende Größe des Widerstands bildet, wird mit diesem „Radwiderstandsfaktor Geschwindigkeit“ multipliziert. Ist also der Faktor gleich zwei, geht in die Widerstandsfunktion die doppelte Reisezeit ein.

$$RadWidFakV = 1 + 0,1 \left(\frac{V_{0(mIV)} - 10}{35} \right)^3$$

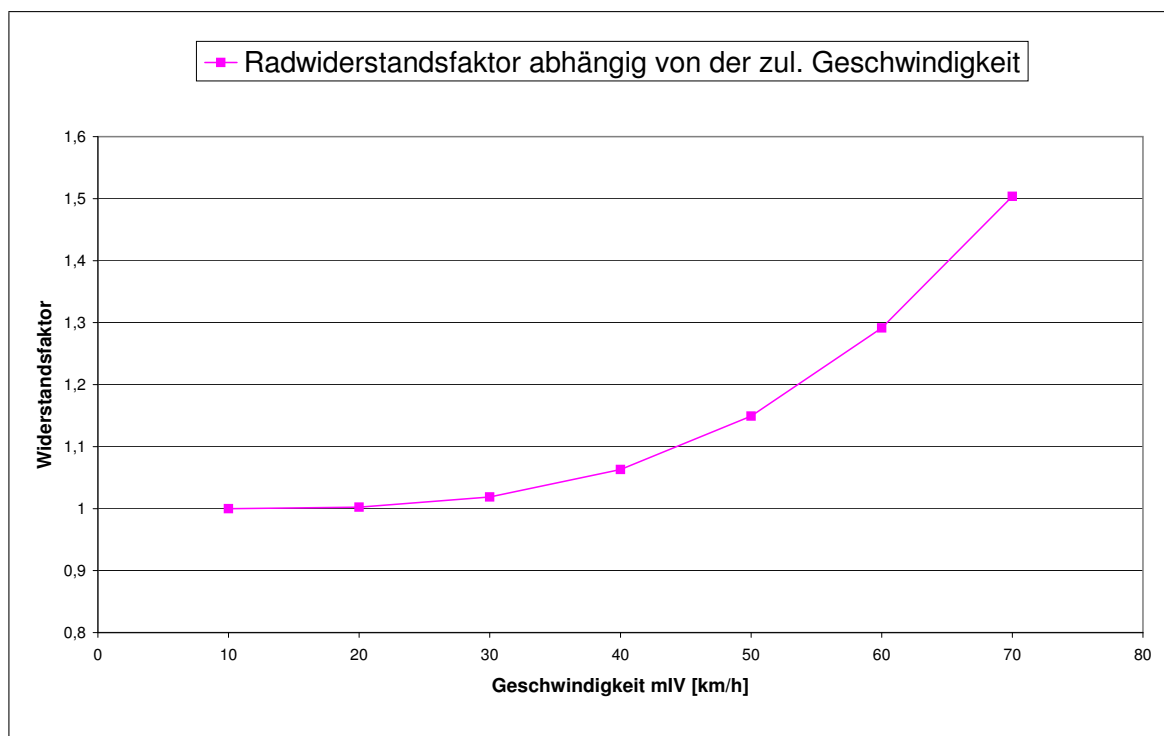


Abbildung 4.4: Einfluss der Geschwindigkeit im Kfz-Verkehr

4.3.2 Verkehrsstärke des mIV

Ebenso wie die Geschwindigkeit im Kfz-Verkehr spielt auch die Verkehrsstärke eine Rolle für den Widerstand im Radverkehr. Je höher die Verkehrsstärke im Kfz-Verkehr ist, desto mehr Emissionen werden freigesetzt, die der Radfahrer direkt einatmet. Diese sind zum einen die Abgase, die beim Radfahren besonders unangenehm empfunden werden, da es sich um eine sportliche Fortbewegungsart handelt. Ein weiterer Effekt in der Wahrnehmung besteht darin, dass der Radfahrer abwechselnd reaktiv saubere Luft einatmet, um dann hinter einem

Auto stark verschmutzter Luft ausgesetzt zu sein. Durch diesen Wechsel werden die Abgase vom Radfahrer stärker wahrgenommen, als vom Autofahrer, da im Auto die Konzentration durch die Belüftung konstant auf einem mittleren Level gehalten wird. Da es keine Konzentrationsunterschiede gibt, nimmt der Autofahrer durch Gewöhnung die Abgase nicht in dem Maß wahr, wie sie vorhanden sind. Außerdem nimmt mit zunehmender Verkehrsstärke auch die Anzahl der Überholvorgänge zu. Wie oben beschrieben stellen Überholvorgänge für den Radfahrer gefährliche Situationen dar.

Da sowohl die Abgasmenge als auch die Anzahl der Gefahrensituationen durch Überholvorgänge proportional zur Verkehrsstärke zunehmen, kommt hier nur ein linearer Zusammenhang in Frage. Es wird also der „Radwiderstandsfaktor Verkehrsstärke“ eingeführt. Dieser ist ≥ 1 und nimmt proportional zur Verkehrsstärke zu. Er geht ebenso wie der vorige Faktor in die Widerstandsfunktion ein, indem man ihn mit der Reisezeit multipliziert.

$$RadWidFakQ = 1 + \frac{1}{20000} \cdot Q_{(mIV)}$$

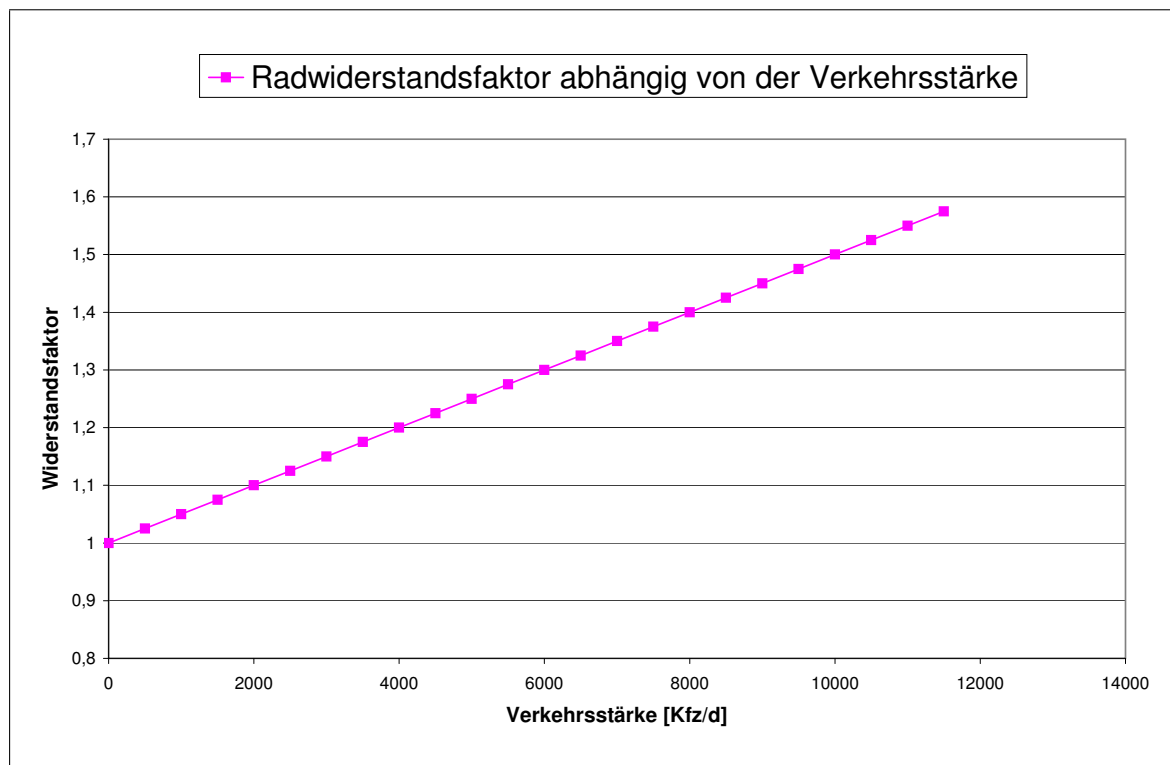


Abbildung 4.5: Einfluss der Verkehrsstärke im Kfz-Verkehr

4.3.3 Widerstandsfaktoren als Analyse-Instrument

Die beiden vorgenannten Widerstandsfaktoren können multiplikativ zu einem Widerstandsfaktor, abhängig vom Kfz-Verkehr, verknüpft werden. Mit diesem Widerstandsfaktor werden die Reisezeiten multipliziert und bilden somit die Widerstandsfunktion für das Verkehrssystem Rad. Das besondere an diesem Radwiderstandsfaktor ist, dass er gleichzeitig ein Analysetool für Radwege darstellt. Für den Fall, dass der Radwiderstandsfaktor $\geq 1,5$ ist, ist Radverkehr im Mischverkehr mit dem Kfz-Verkehr nicht mehr zumutbar und die Anlage von Radwegen dringend zu empfehlen, sofern keine alternativen Routen existieren. Dieser Zusammenhang besteht, da die beiden Funktionen für den „Radwiderstandsfaktor Geschwindigkeit“ und „Radwiderstandsfaktor Verkehrsstärke“ so gewählt wurden, dass, wenn man die zulässige Geschwindigkeit im Kfz-Verkehr über die Verkehrsstärke im Kfz-Verkehr für

die Ergebnisse „1,5“ aufträgt ungefähr der Verlauf erhalten wird, der im Diagramm aus [7] angegeben ist. Wie bereits erwähnt wird also für alle Werte größer 1,5 die Anlage von Radwegen empfohlen.

Die Aussage dieses Sachverhaltes ist, dass dann ein Radweg nötig ist, wenn ein Radfahrer bereit ist die anderthalbfache Reisezeit in Kauf zu nehmen, um nicht auf der stark befahrenen Straße fahren zu müssen. Ob diese Aussage richtig ist, lässt sich ohne eine empirische Untersuchung nicht feststellen. Unter Umständen müssten die Funktionen so angepasst werden, dass der Zusammenhang für beispielsweise den Wert 2 gültig ist. Letztendlich werden bei einem Wert von 2 lediglich stark befahrene Straßen stärker in der Routensuche mit dem Radwiderstandsfaktor „bestraft“ als bei einem Wert von 1,5. „Modell-Radfahrer“ sind also bereit noch größere Umwege in Kauf zu nehmen, um nicht auf der stark befahrenen Route zu fahren. Der Zusammenhang zwischen dem Diagramm aus [7] und dem Wert des Radwiderstandsfaktors von 1,5 wurde letztlich rein willkürlich gewählt.

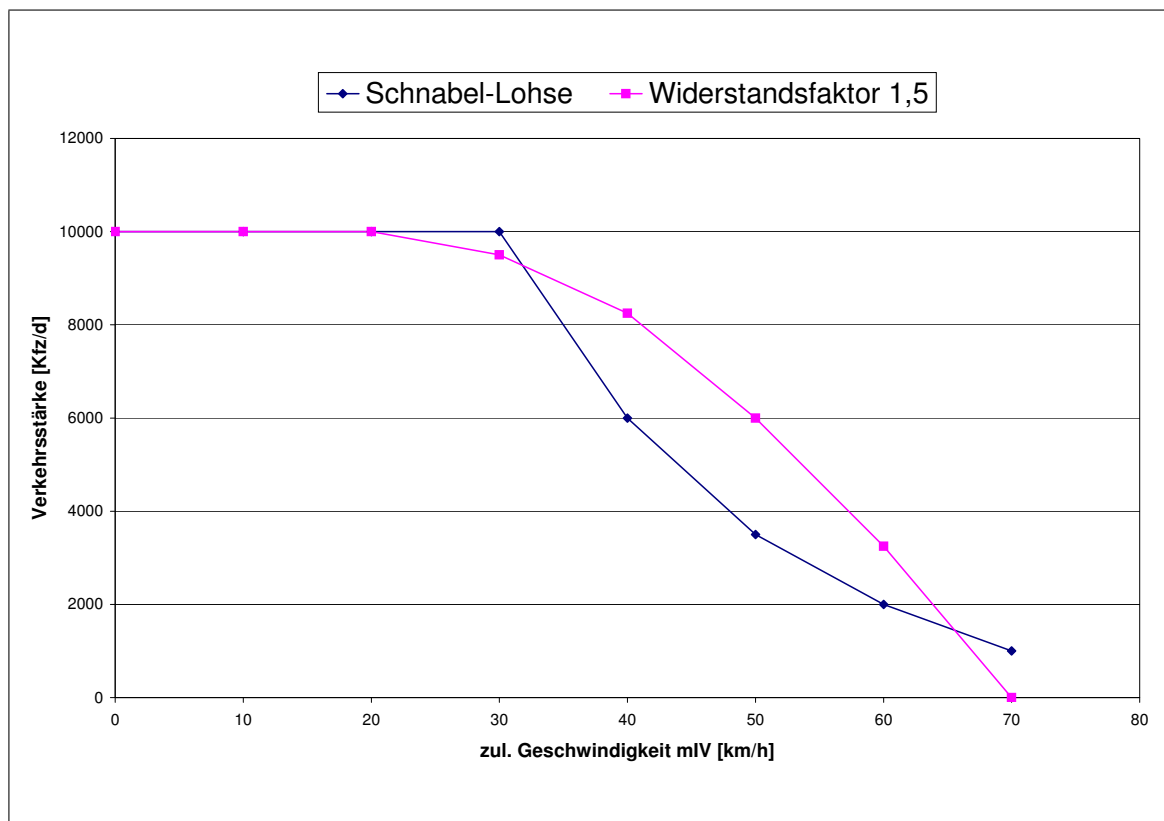


Abbildung 4.6: Kriterium zur Anlage von Radwegen

4.4 Straßenunabhängig geführte Radwege

Die unabhängig geführten Radwege und auch unabhängig geführte gemischte Fuß- und Radwege, werden im Modell als eigene Streckentypen definiert. Diese Streckentypen heißen „Radweg“ und „Fussweg (Rad möglich)“. Wenn Wege existieren, die noch nicht im Netzmodell enthalten sind, müssen diese eingepflegt werden. Für diese Wege sind die oben genannten Widerstandsfaktoren gleich eins. Die Widerstandsfunktion ist also die reine Reisezeit. Diese Streckentypen sind neben Straßen mit geringen Kfz-Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten die geeignetsten Strecken für Radverkehr.

4.5 Straßenbegleitende Radwege

Um den Einfluß von straßenbegleitenden baulichen Anlagen wie Bordsteinradwegen, Radfahrstreifen und Radschutzstreifen miteinzubeziehen, wird ein weiteres benutzerdefiniertes Attribut „HatRadweg“ eingeführt. Da die Ausweisung von Radwegen rechtlich eine Radwegbenutzungspflicht mit sich bringt, muss dringend darauf geachtet werden, dass durch die Anlage der Radwege tatsächlich eine Verbesserung der Situation für Radfahrer eintritt. Generell gilt: „Ein schlechter Radweg ist schlechter als gar kein Radweg.“ Bei der Anlage von Radwegen ist es daher wichtig, darauf zu achten, dass Qualitätsstandards in Bezug auf Breite, Belag, Linienführung und Knotenpunktführung eingehalten werden. Die Vorschriften dazu finden sich in BGB 1997, Teil I, Nr. 57, S. 2028-2030, sie wurden in einer Novellierung der StVO 1997 eingebracht. Für die Modellierung wird daher vorgeschlagen, nur solche Radwege tatsächlich in das Modell aufzunehmen, die solche Mindestanforderungen erfüllen. Laut [8] wurden die Radwege in Stuttgart auf die Konformität mit den Qualitätsmerkmalen überprüft. Nach einer Anfrage bei Herrn Köhnlein war es aufgrund der Vielzahl von straßenbegleitenden Radwegen nicht möglich eine komplette Auflistung zu erhalten. Jedoch wurde von ihm eine Auflistung [9] über Radfahrstreifen und Radschutzstreifen zur Verfügung gestellt. Anhand der dort aufgeführten Anlagen und eigener Erhebungen während der Befahrungen wird der Einfluß von baulichen Anlagen auf den Streckenwiderstand gezeigt.

Für die Modellierung werden vier Typen von straßenbegleitenden Radwegen definiert:

- Bordsteinradweg
- links geführter Bordsteinradweg
- Radfahrstreifen
- Radschutzstreifen



Abbildung 4.7: Radfahrstreifen und Bordsteinradweg

4.5.1 Bordsteinradwege

Ein Bordsteinradweg ermöglicht es dem Radfahrer relativ unabhängig vom Kfz-Verkehr zu fahren. Jedoch kommt es zu Gefahrenpunkten an Kreuzungen und Einmündungen, wo Radfahrer leicht übersehen werden, beziehungsweise ihr Vorfahrtsrecht mißachtet wird. Bordsteinradwege sollten eine Breite von mindestens 1,5 m aufweisen. Bordsteinradwege mit kleineren Breiten sollten nicht im Modell abgebildet und auch in der Realität nicht ausgewiesen

werden. Im Modell wird daher der Radwiderstandsfaktor abhängig vom mIV überschrieben mit einem Wert von 1,3. Damit ist auch gewährleistet, dass keine Bordsteinradwege an Straßen angelegt werden, die bereits sehr geeignet für Radverkehr sind. Es würde ja schließlich zu einem ungünstigeren Radwiderstandsfaktor kommen, wenn ein Faktor von 1,1 (z.B. Zone 30, geringe Verkehrsstärke) durch einen Faktor 1,3 ersetzt werden würde.

Auf die Abbildung von staßenbegleitenden gemeinsamen Fuß- und Radwegen im Modell wird verzichtet, da diese in der Regel keine ausreichende Breite für Radverkehr aufweisen und Radfahrer gezwungen sind Schrittgeschwindigkeit zu fahren. Die gegenseitige Beeinträchtigung von Fußgängern und Radfahrern ist besonders bei ungenügender Breite der Wege so groß, dass es im Allgemeinen sinnvoller ist, die Radfahrer im Verkehr auf der Straße mitzuführen. Außerdem liegt keine Aufstellung der Anlagen vor.

4.5.2 Linke Radwege

Bei links geführten Radwegen (Freigabe auch für Radfahrer aus der Gegenrichtung) muss sehr sorgfältig geplant werden, da sonst gefährliche Situationen an Einmündungen entstehen. Die Gefahr liegt darin, dass abbiegende Kfz nicht mit Radverkehr von rechts rechnen können, wenn nicht besondere Hinweise gegeben werden. Sind solche Wege sehr gut durchdacht ausgeführt, könnte man sie als eigene Strecken vom Typ Radweg ins Modell aufnehmen.

Die andere Möglichkeit besteht darin, diesen Radwegtyp im Modell in der Hinrichtung als normalen Bordsteinradweg mit einem Radwiderstandsfaktor von 1,3 abzuspeichern und in der Rückrichtung als links liegenden Bordsteinradweg, der einen Radwiderstandsfaktor von 1,5 zugewiesen bekommt. Der etwas ungünstigere Widerstandsfaktor liegt daran, dass bei links liegenden Radwegen häufiger die Straßenseite gewechselt werden muss und Radfahrer vorsichtiger fahren müssen, um Gefahrensituationen zu vermeiden.



Abbildung 4.8: Radfahrstreifen und linker Radweg

4.5.3 Radfahrstreifen

Da Radfahrstreifen keine wirkliche bauliche Abtrennung zwischen Kfz-Verkehr und Radverkehr darstellen, muss der Radwiderstandsfaktor in diesem Fall auch auf andere Art in die Widerstandsfunktion eingehen. Es handelt sich ja lediglich um Abmarkierungen, die die Autofahrer davon abhalten sollen in den Fahrbahnbereich der Radfahrer zu fahren. Auch das vom Radfahrer wahrgenommene Gefahrenpotential durch überholende Kfz wird durch die Anlage von Radfahrstreifen lediglich abgemindert, aber keineswegs komplett aufgehoben. Für die Modellierung bedeutet dies, dass der „Radwiderstandsfaktor“ in diesem Fall nicht ersetzt wird, sondern lediglich abgemindert in die Widerstandsfunktion eingeht. Für

die Modellierung wurde für die entsprechenden Strecken der Radwiderstandsfaktor auf 75 Prozent des Ausgangswertes abgemindert. Auch dieser Annahme liegen keine empirischen Erhebungen zugrunde.

4.5.4 Radschutzstreifen

Der Radschutzstreifen hat eine ähnliche Wirkung wie der Radfahrstreifen. Allerdings darf er von Kfz überfahren werden, solange er nicht von Radfahrern benutzt wird. Außerdem gelten hier andere Bestimmungen zur Mindestbreite. Die Abmarkierung von Radschutzstreifen kam bisher in Stuttgart so gut wie nicht zur Anwendung. Lediglich in der Neckarstraße befindet sich ein kurzer Streckenabschnitt. Dieser taucht allerdings etwas unvermittelt auf und steht nicht in einem sichtbaren Zusammenhang zu anderen Radverkehrsanlagen, so dass er lediglich zur Verwirrung von Radfahrern und Autofahrern beitragen dürfte. Da Radschutzstreifen nicht so stark abmindernd auf den Widerstand von Strecken wirken wie die Anlage von Radfahrstreifen, wird der Widerstandsfaktor lediglich auf 95 Prozent des Ausgangswertes abgemindert. Das unten dargestellte Flussdiagramm entspricht einem kleinen VBA-Programm, das in einer Datenbank angewendet werden kann, um die Änderungen der Widerstandsfaktoren für mehrere Strecken automatisiert durchführen zu können. Das Programm stellt auch sicher, dass für keine der Strecken der Widerstandsfaktor kleiner Eins wird. Es ist schließlich unsinnig in einer Zone-30 einen Radfahrstreifen anzulegen. Die abmindernde Wirkung einer solchen Maßnahme auf den Widerstand wird dadurch ausgeschlossen.

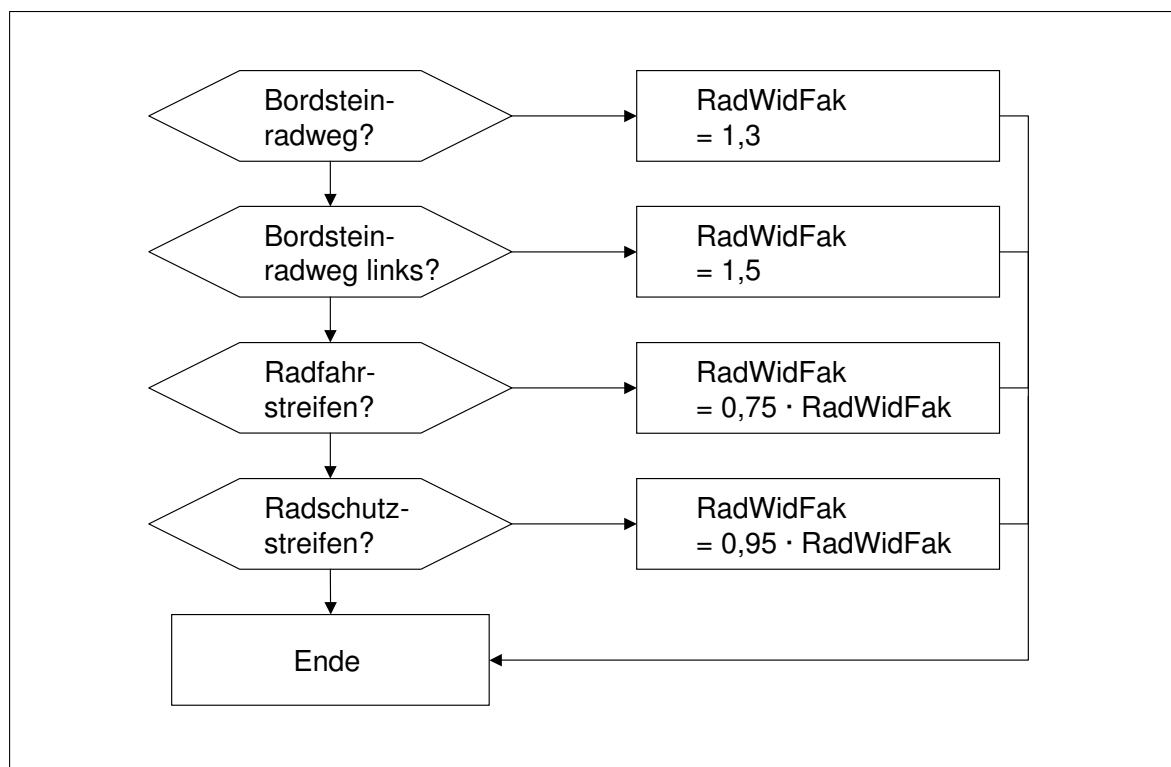


Abbildung 4.9: Flussdiagramm zur Wirkung straßenbegleitender Radwege auf den Widerstand

5. Validierung

„Die Erwachsenen haben eine Vorliebe für Zahlen“ (Saint-Exupéry, Der kleine Prinz)

5.1 Befahrungen

Während der Diplomarbeit wurden auf neun verschiedenen Routen in Stuttgart Befahrungen mit dem Fahrrad durchgeführt. Während der Befahrungen wurde die Position alle zwei Sekunden mit einem GPS-Gerät festgestellt und aufgezeichnet. Anhand dieser Daten war es möglich ein Zeit-Weg-Diagramm für die verschiedenen Routen zu erstellen. Wie bereits weiter oben erläutert, wurde daraus der Zusammenhang zwischen Steigung und Geschwindigkeit abgeleitet.

Die Wahl der neun Routen war intuitiv. Als Kriterien für die Wahl stand lediglich fest, dass das gesamte Stadtgebiet von Stuttgart abgedeckt werden sollte und dass sowohl flache als auch steilere Strecken befahren werden sollten. Die intuitive Wahl der Routen macht die Befahrungen auch zu einem geeigneten Mittel zur Validierung des Modells. Die Auswahl der neun Routen erfolgte bereits zu einem Zeitpunkt, bevor das Modell zur Radroutenwahl entwickelt wurde. Daher kann man davon ausgehen, dass die Routen unabhängig von den Ergebnissen des Modells sind.

Liefert das Modell also die gleiche Route wie die intuitive Auswahl, so kann man davon ausgehen, dass sowohl das Modell wie auch die Intuition den „Besten Weg“ gefunden haben. Es ist aber auch denkbar, dass Intuition und Modell den gleichen nicht optimalen Weg gefunden haben. Liefert das Modell einen anderen Weg als die Intuition, so kann das daran liegen, dass das Modell besser ist, als die Intuition. In diesem Fall kann man sich zufrieden zurücklehnen. Das Modell liefert allerdings unter Umständen auch schlechtere Wege als die Intuition. Das deutet auf Fehler im Modell hin.



Abbildung 5.1: Spezielle Strecken und Abbiegebeziehungen

Die Befahrungen liefern jedoch nicht nur ein Mittel um die qualitative Routenwahl zu validieren, sondern auch um die Fahrzeitprofile zwischen dem Modell und der Realität zu vergleichen.

5.2 Routensuche

Für die Routensuche wurde eine stochastische Umlegung durchgeführt, die dreimal (Global: Maximale Anzahl der Iterationen 3) nach einer Route sucht und das bei je 10 zusätzlichen Iterationen gesamt. Es können also maximal 30 Routen gefunden werden (soweit ich das verstanden habe...). Mit Hilfe einer solchen Umlegung lässt sich für viele Relationen schnell eine visuelle Überprüfung der gefundenen Wege durchführen. Wenn etwa Wege auftauchen, die unerklärliche Schleifen aufweisen oder offensichtlich sinnlose Wege ausgegeben werden, deutet dies auf Fehler im Modell hin.

Am Beispiel der Relation Liederhalle - Hasenbergstraße 45 wird gezeigt, welche Alternativen bei einer stochastischen Umlegung gefunden wurden. In der Regel wurde bei der stochastischen Umlegung die intuitiv gefundene Route ermittelt. In den folgenden Screenshots sind vier verschiedene Routen und ihr Widerstand festgehalten. Die intuitiv gefundene Route hat hier den dritt-besten Widerstand von 17 alternativen Routen, die ermittelt wurden. Davon sind die zwei besten allerdings sehr ähnlich.

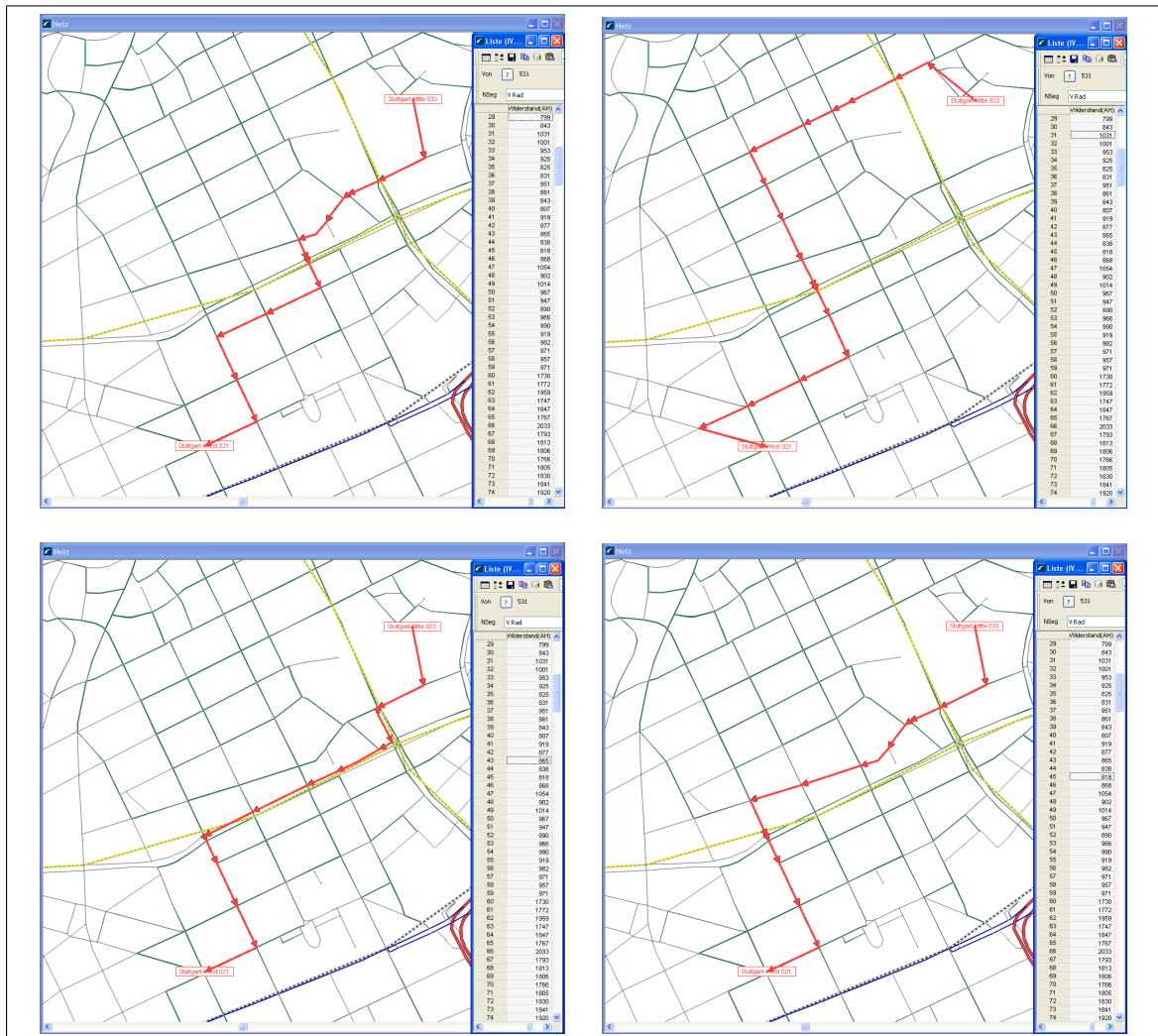


Abbildung 5.2: Alternative Wege durch eine stochastische Umlegung

Für die vier oben dargestellten Alternativen sind noch einmal ihr Widerstand, ihre Reise-

zeit, und ihr mittlerer Radwiderstandsfaktor (bezogen auf die Länge) in der folgenden Tabelle dargestellt. Die Nummerierung läuft dabei von oben links nach unten rechts. Die Höheren Widerstände auf den Screenshots kommen durch die Anbindungszeiten. Außerdem werden die Widerstände bei einer stochastischen Umlegung variiert, so dass es zu Abweichungen kommt.

Alternative	Länge	Reisezeit	Widerstand	Radwiderstandsfaktor
1	1297 m	355 s	370 s	1,05449
2	1627 m	456 s	550 s	1,26834
3	1322 m	372 s	437 s	1,23897
4	1346 m	375 s	391 s	1,05246

Tabelle 5.1: Vergleich von vier alternativen Routen

Ein häufiger Grund für offensichtlich ungünstige Wege waren gesperrte Abbiegebeziehungen. Häufig waren im Bereich von Einbahnstraßen, die gegen die Fahrtrichtung geöffnet wurden, zulässige Abbiegebeziehungen noch gesperrt. Die Johannesstraße bei der Überquerung der Schlossstraße ist ein Beispiel, wo zusätzliche Abbiegebeziehungen geöffnet werden mussten. Hier trat das Problem allerdings nicht in Zusammenhang mit einer geöffneten Einbahnstraße auf, sondern, weil die Abbiegebeziehung „geradeaus“ hier nur für Busverkehr, Taxis und Radfahrer erlaubt ist.

Unter Umständen hat das Modell eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Steigungen, als dies für viele Personen in der Realität der Fall ist. Man müsste in diesem Fall also entweder die Geschwindigkeits-Steigungs-Funktion abändern, oder man bietet in einem Auswahlmenü in einem Routenplaner die Möglichkeit an, Strecken ab einer gewissen Steigung für eine Routensuche auszuschalten. Vielleicht schätzen sich aber auch viele Personen steigungsempfindlicher ein, als sie es tatsächlich sind. Ein Grund, warum der Radverkehrsplanung in Stuttgart bislang weniger Aufmerksamkeit gewidmet wurde, als sie es verdient hätte, wird im folgenden Zitat von Kienzle zum Ausdruck gebracht: „Zudem bestätigt man sich täglich gegenseitig, dass die Topographie der Stadt (...) sehr bergig und somit völlig ungeeignet für einen ernstzunehmenden Radverkehr sei (...)“ [8]

Für die Validierung des Modells wurde vom Institut für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik der Universität Stuttgart ein Excel-Tool zur Verfügung gestellt. Mit dessen Hilfe kann man sich ein Zeit-Weg-Diagramm ausgeben lassen. Durch eine kleine Erweiterung des Programms ist es möglich sich auch den Radwiderstandsfaktor für jede Strecke einer Route ausgeben zu lassen. Der Radwiderstandsfaktor wird durch das Programm mit der Streckenlänge multipliziert. Summiert man diese Werte auf und teilt sie anschließend durch die gesamte Länge der Route, so erhält man einen mittleren Radwiderstandsfaktor für die Route. Dieser mittlere Radwiderstandsfaktor gibt einen Anhaltspunkt, ob die gefundene Route auf fahrradfreundlichen Strecken verläuft, oder ob Strecken mit hohem Kfz-Verkehrsaufkommen gewählt wurden.

5.3 Fahrzeitprofil

Indem man die Zeiten über den Weg aufträgt, kann man sich für die gefundene Route ein Zeit-Weg-Diagramm erstellen. Mit Hilfe dieses Zeit-Weg-Diagramms hat man eine sehr schöne Möglichkeit, zu kontrollieren, ob das Modell im Bezug auf die Reisezeiten realitätsnahe Ergebnisse liefert. Man muss dafür das Modell-Ergebnis lediglich mit der Aufzeichnung eines realen Zeit-Weg-Diagramms vergleichen.

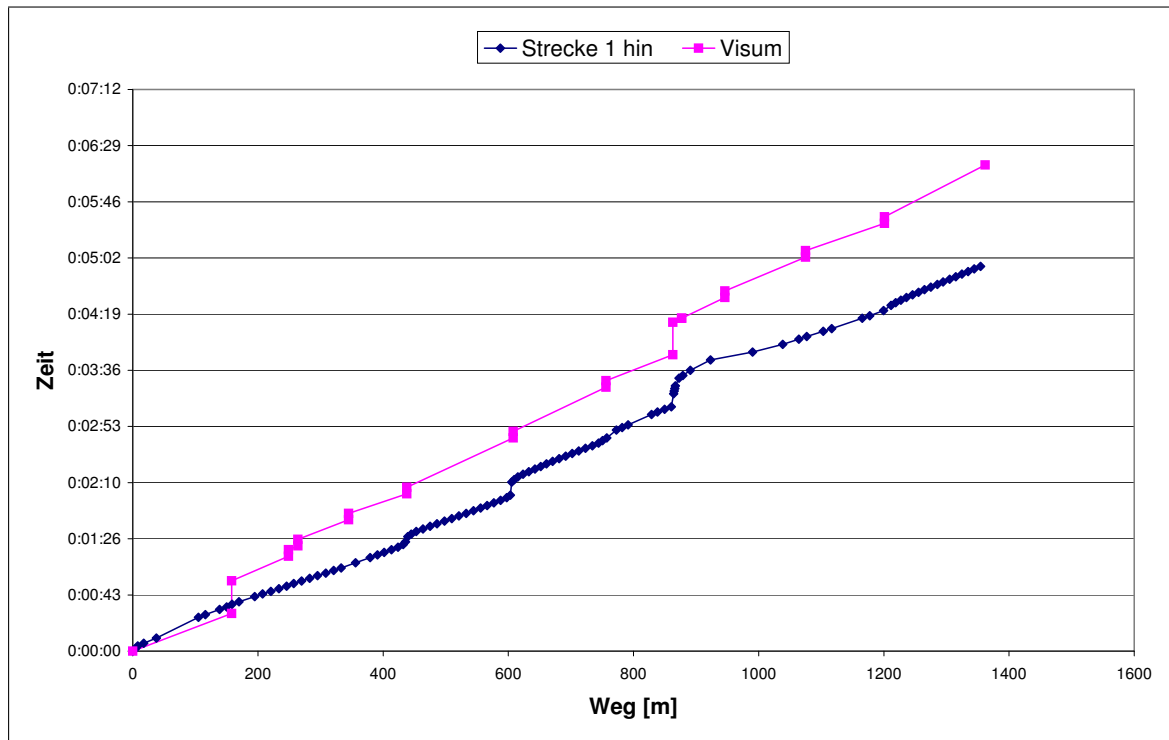


Abbildung 5.3: Vergleich Modell - Realität

5.4 Höhenprofil

Auch die Ausgabe eines Höhenprofils ist denkbar, indem man automatisiert die Höhendifferenz zwischen zwei Knoten über die Streckenlänge aufträgt. Dieses Leistungsmerkmal gibt es aber noch nicht, da sich der Autor dafür stärker mit der VBA-Programmierung in Verbindung mit der Com-Schnittstelle von Visum auseinandersetzen müsste. Es ist jedoch gerade für Stuttgart eine nützliche Angabe für Radfahrer. Es dürfte nicht all zu schwer sein, das Programm zu Routenauswertung so zu erweitern, dass neben dem Fahrzeitprofil auch ein Höhenprofil erzeugt wird.

6. Ergebnisse

*„Wir dürfen (...) nicht vergessen, dass unser Denken und Handeln in weit höherem Maße von Vorbildern, Zielen, Wünschen und Motiven geleitet wird, als von Logik und Tatsachen.“
(Werner Munter) [10]*

6.1 Radroutenplaner im Internet

Die Bereitstellung eines Routenplaners für Radfahrer im Internet ist ein wichtiges Element auf dem Weg zu einem höheren Anteil von Radverkehr am Gesamtverkehrsaufkommen. Die Erfahrungen im motorisierten Individualverkehr, besonders aber im Öffentlichen Verkehr zeigen, dass die Bereitstellung eines solchen Planers den Zugang zum System vereinfacht. Die häufigen Zugriffe auf Routenplaner im Internet zeigen dies deutlich. Jedoch ist es zum einen wichtig, dass ein solches Instrument zuverlässig gute Routen findet und den Nutzer nicht über unerwartete Hindernisse leitet. Zum anderen ist der Auftritt im Internet von Bedeutung: Die Beispiele in München, Berlin und London zeigen, dass der Zugang nicht sehr einfach ist. In München und Berlin liegt dies daran, dass die Internetseiten nicht sehr bekannt sind oder der Weg durch diverse Links lange ist, bis man den Planer finden kann. In London muss man erst verschiedene Auswahlkriterien im Routenplaner des ÖV einstellen, bis man den Routenvorschlag erhält.

Hier zeigt sich wahrscheinlich die Konkurrenz-Situation zwischen den Modi des ÖV und des Radverkehrs. Sind doch die Nutzer von beiden Systemen ähnlichen Personengruppen zuzuordnen: Schüler, umweltbewusste Personen, einkommensschwache Personen und generell Autolose. Es kann einem ÖV-Unternehmen zwar egal sein, wenn Abonnenten einer Zeitfahrkarte (z.B. eines Monatstickets) teilweise das Rad benutzen, jedoch hat es finanzielle Einbußen zu tragen, wenn Einzelfahrtentickets nicht gekauft werden, weil die Fahrt mit dem Rad, statt mit dem ÖV-Verkehrsmittel durchgeführt wird. Eventuell kann man diesen Widerspruch aufheben, indem man den Radrouten-Planer als Zusatznutzen für Abonnenten von Monats-, Semester- oder Jahreskarten anbietet.

6.2 Fahrrad und öffentlicher Verkehr

Das Rad bietet jedoch auch Vorteile für ÖV-Verkehrsunternehmen: Durch die höhere Fahrgeschwindigkeit vergrößert es den Haltestelleneinzugsbereich, beziehungsweise verkürzt die Zugangszeit. Um diesen Vorteil realisieren zu können, müssen jedoch die nötigen Grundlagen vorhanden sein. Für das Modell Bike + Ride müssen die Haltestellen über gute Abstellmöglichkeiten verfügen, an denen die Fahrräder sicher abgestellt werden können. Ist eine Mitnahme der Fahrräder vorgesehen, so müssen die Fahrzeuge über einen bequemen Zustieg und ausreichende freie Abstellflächen verfügen. Ein schönes Beispiel ist die schweizer Bundesbahn. Hier ist der letzte Wagen grundsätzlich für die Mitnahme von Rädern vorgesehen. Außerdem sind während der Spitzenstunden Sperrzeiten vorzusehen, während denen eine Mitnahme der Räder nicht gestattet ist. Dies muss auch bei der Planung eines Routenplaners für Fahrradmitnahme berücksichtigt werden.

Auch der Image-Gewinn durch das Angebot eines solchen Routenplaners darf nicht unterschätzt werden. Es gelingt dadurch unter Umständen Personen zur Nutzung des Routenplaners des ÖV-Unternehmens zu bewegen, die seither ausschließlich das Auto genutzt haben. Wenn das Angebot des ÖV-Unternehmens so gestaltet wird, dass das Fahrrad als Erweiterung des Angebotes wahrgenommen wird und nicht als Konkurrent um Kunden, dann kann die Kombination zu einer Symbiose mit beiderseitigem Nutzen führen, die die Attraktivität des Umwelt-Verbundes erhöht.



Abbildung 6.1: Radweg in Fußgängerzone und Stellplätze für Berufspendler

6.3 Modell zur Radverkehrsplanung

Das vorgestellte Programm hilft die Elemente des Verkehrssystems Rad als Netz wahrzunehmen und Schwachstellen in diesem Netz zu finden. Es stellt somit ein wirksames Instrument zur systematischen Planung dar.

Man sollte bei der Planung generell darauf achten, dass sich der Modal-Split nicht zu Lasten des ÖV verschiebt, dem dann ja Einnahmeeinbußen drohen, sondern dass tatsächlich der mIV-Anteil am Modal-Split abnimmt. Eine wichtige Maßnahme ist dabei die Reduzierung der Geschwindigkeiten. Durch mehr Zone-30-Gebiete mit Rechts-vor-Links Regelungen und die Einrichtung von Spielstraßen werden wirksam die Geschwindigkeiten gesenkt. Jedoch sollte man auch hier darauf achten, dass keine Buslinien auf den entsprechenden Strecken verkehren. Damit wird die Situation für Radfahrer verbessert und der mIV verliert gleichzeitig an Attraktivität.

Eine einfache Anwendung ist zum Beispiel ein Filter auf Strecken, die über einen geringen Radwiderstandsfaktor verfügen, obwohl sie eine relativ hohe zulässige Geschwindigkeit haben. Das heißt also der Radwiderstandsfaktor zwischen 1 und 1,5 und die zulässige Geschwindigkeit zwischen 31 und 51 km/h. Die so gefilterten Strecken verfügen offensichtlich über eine geringe Verkehrsstärke, es ist daher bei einigen dieser Strecken angebracht, die zul. Geschwindigkeit beispielsweise auf 30 km/h abzusenken und die Strecken somit attraktiver für Radverkehr zu machen. Auch hier sollte man darauf achten, dass auf den entsprechenden Strecken kein Busverkehr statt findet. Es erscheint mir allerdings ein großes Potential in Stuttgart, was die Ausweisung von Zone-30 Gebieten angeht. Unter anderen die folgenden Strecken kommen dafür in Frage (Die Geschwindigkeits-Angaben basieren auf den Daten des Netzmodells und wurden nicht für alle Strecken überprüft):

Straße	zwischen	und
Silberburgstraße	Hölderlinplatz	Rosenbergstraße
Gutenbergstraße	Silberburgstraße	Schwabstraße
Vogelsangstraße	Bismarckplatz	Rückertstraße
Kernerstraße	Hausmannstraße	Neckartor
Olga- / Werastraße	Charlottenstraße	Kernerstraße

Tabelle 6.1: Kandidaten für Zone-30

Eine weitere einfache Anwendung ist ein Filter auf alle Strecken, deren Radwiderstandsfaktor größer als 1,5 ist. Diese Strecken sind potenzielle Kandidaten für die Anlage von Radfahrstreifen oder Radwegen, soweit keine alternativen Strecken für Radfahrer angeboten werden. Man sieht hier deutlich die mangelhafte Verbindung vom Bereich Liederhalle über Universität zum Hauptbahnhof. Besonders im Bereich Kriegsbergstraße - Arnulfklett-Platz fehlt eine gute Radwegführung. Das ist bedauerlich, da die Breitscheidstraße von der Liederhalle über das Gelände der Universität leicht als eigenständiger Radweg fortgeführt werden könnte. Zumindest bis zur Keplerstraße wäre die Anlage eines solchen Radweges ohne großen finanziellen Aufwand möglich. Außerdem wird die Überquerungsmöglichkeit über die Friedrichstraße auf der Kronenstraße nicht über die Lautenschlagerstraße und den Arnulf-Klett-Platz in den Schloßgarten fortgeführt. Die einzige Alternative von der Kronenstraße über die Lautenschlagerstraße und Bolzstraße in den Schloßgarten ist nicht ausgeschildert. Außerdem ist die Kreuzung der Königsstraße mit einem sehr hohen Fußgängeraufkommen mit der Bolzstraße konfliktträchtig, wenn sich der Radverkehr hier weiter erhöht. Und der Radverkehrsanteil wird sich weiter erhöhen, wenn man die Situation für Radfahrer verbessert und die Logik der Verkehrsentwicklung zugrunde legt:

1. Wenn ein Verkehrsmodus gegenüber einem anderen verbessert wird, gewinnt er Anteile am Modal-Split
2. Wenn die Reisegeschwindigkeit erhöht wird, nimmt die Länge der Wege zu

Mit dem vorgestellten Netzmodell wurde eine Umlegung von 5% des Pkw-Verkehrsaufkommens durchgeführt und in einer „Best-Weg-Umlegung“ auf das Netz verteilt (Abbildung 6.2). Die Verkehrserzeugung ist hier natürlich nicht richtig abgebildet. Besonders ins Gewicht fallen dürfte die Tatsache, dass der Radverkehr auf Strecken über 3 km nur noch einen sehr geringen Anteil am Verkehrsaufkommen hat. Dennoch läßt sich bereits an dieser groben Modellierung erkennen, dass die vorhandenen Radrouten auf den Strecken liegen, die auch im Modell den höchsten Radverkehr aufzuweisen haben. Dabei ist bemerkenswert, dass der Widerstand dieser Strecken auf Radrouten nicht durch spezielle Attribute abgemindert wurde. Man kann also davon ausgehen, dass dort Radrouten eingerichtet wurden, die ohnehin geeignet für Radverkehr waren und die die höchste Nachfrage im Radverkehr aufzuweisen haben. Es handelt sich hier um eine klassische Anpassungsplanung, die auch im Kfz-Verkehr zum weiteren Ausbau der Verkehrswege und Steigerung des Verkehrsaufkommens führt.

Die Abbildung 6.2 zeigt, dass die Fritz-Elsass-Straße ein wichtiges Element im Streckennetz für Radverkehr ist. Die Belastungen und die Geschwindigkeiten im Pkw-Verkehr lassen es durchaus zu, hier Radverkehr vorzusehen. Die bauliche Ausgestaltung lässt dies jedoch nicht erkennen. Der existierende Bordsteinradweg zwischen Seidenstraße und Rotebühl-Platz ist nur eine unzureichende Lösung. Die Fritz-Elsass-Straße ist wegen den vier Fahrspuren des Kfz-Verkehrs und der Stadtbahntrasse nahezu nicht überquerbar. Es wäre daher wünschenswert, die Fritz-Elsass-Straße zwischen Rotebühlplatz und Seidenstraße so umzugestalten, dass für Radfahrer eine sichere und eindeutige Routenführung erreicht wird,

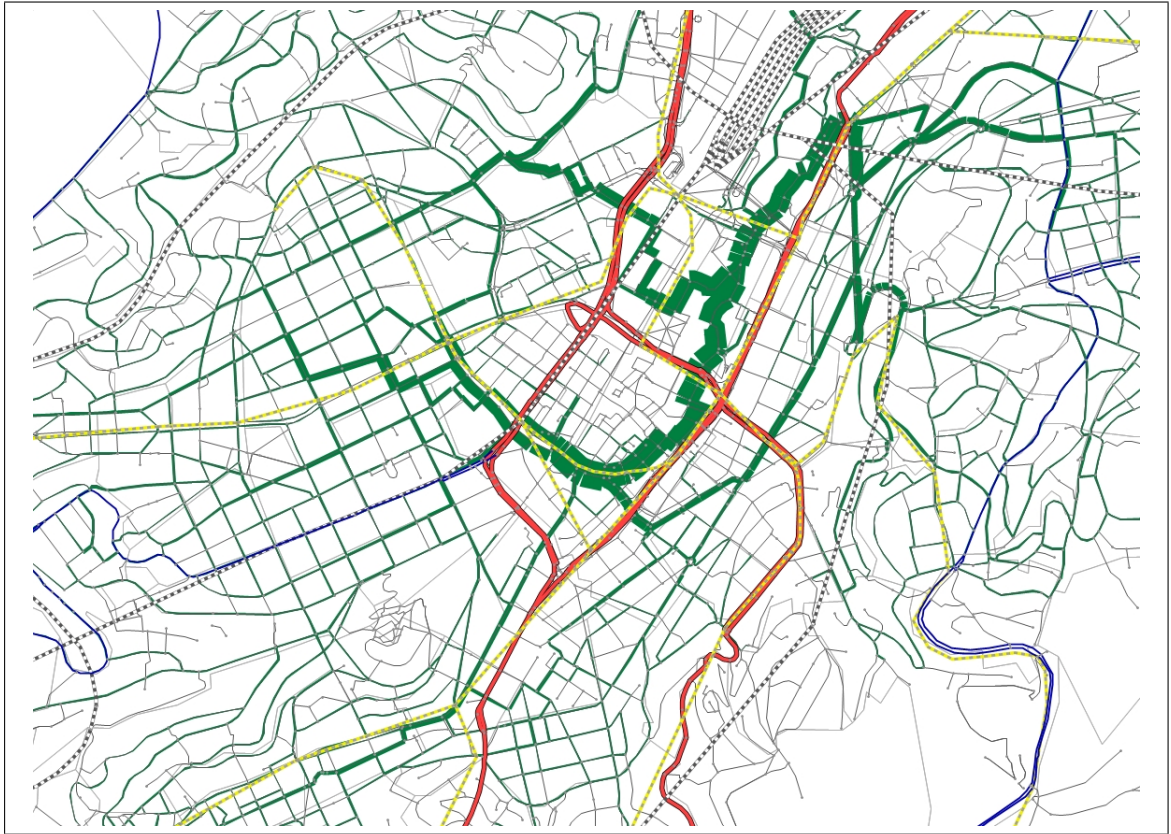


Abbildung 6.2: Umlegung 5% des Pkw-Verkehrs

gleichzeitig die effektiven Geschwindigkeiten im Pkw-Verkehr gesenkt werden, ohne jedoch den Bus-Linienverkehr, der hier stattfindet, zu beeinträchtigen.

A. Dokumentation

A.1 Verkehrssystem Rad

- Unter *Netz - Vsys Modi Nsegs* wird das neue Verkehrssystem Rad eingeführt.
- Dazu wird der Code *V*, der Name *Rad*, der Typ *IV* und die Pkw-Einheiten *0,2* gesetzt. *V max* wird auf *30 km/h* gesetzt
- Es werden die folgenden existierenden Streckentypen freigeschalten:
Fußweg (Rad möglich), *Fußweg (Staffel)*, *Forstweg*, *Radweg*, *Straßen mit $v \leq 70$ km/h*

A.2 Netzelemente öffnen

A.2.1 Strecken

- Um die betreffenden Strecken auszuwählen, werden sie durch geeignete Filterkriterien ausgefiltert. Um beispielsweise alle Strecken zu filtern, deren zulässige Höchstgeschwindigkeit ≤ 70 km/h beträgt und auf denen Pkw-Verkehr zugelassen ist, werden die Filterkriterien *V₀-IVSys(Pkw)* auf den Wertebereich 0-70 km/h und *VSysSet* auf den Wertebereich Pkw gesetzt.
- Über Multiselekt werden alle *aktiven Strecken* ausgewählt. Dazu klickt man einmal die rechte Maustaste innerhalb des Netzes an und wählt aus dem erscheinenden Menü die Option *ändern*.
- Im Auswahlmenü wird den gefilterten Strecken durch das Attribut *VSysSet* über den Button „Konstant“ das Verkehrssystem Rad zugelassen. Damit sind diese Strecken für den Radverkehr geöffnet. Zu einem späteren Zeitpunkt wurden die Streckentypen [30], [31], [34], [35], [37], [38], [39], [40], [41] und [42] wieder für das Verkehrssystem Rad gesperrt, da sie sich als absolut ungeeignet herausstellten.

Auf diese Weise werden alle Strecken, die für Pkw-Verkehr mit zulässigen Geschwindigkeiten unter 70 km/h und alle Fußwege (Rad möglich), Forstwege und Radwege im Netz für den Radverkehr geöffnet. Bei den drei zuletzt genannten Streckentypen muss man außerdem den gefilterten Strecken eine zulässige Geschwindigkeit und IV-Kapazität größer als Null zuweisen.

Problem der Treppen: Fußwege (Staffel) sind teilweise keine Treppen, aber echte Treppen sollten für Fahrräder gesperrt bleiben. Das ist ein größeres Problem, denn es kann nur in Detailarbeit gelöst werden, mit genauen Karten und Begehungen vor Ort. Außerdem gibt es unter Umständen rechtliche Probleme, wenn man mit einem Routenplaner Radfahrer eine Treppe hinunter schickt.¹

¹Das Problem wird vorläufig so gelöst, dass alle Strecken vom Typ 1 (Fußweg - Staffel) mit einem Gefälle von kleiner 8 Prozent gefiltert werden und diese ebenfalls für den Radverkehr geöffnet werden. Dies ist aber erst dann möglich, wenn für alle Strecken die Steigung berechnet wurde

A.2.2 Anbindungen

- Über einen Anbindungsfilter werden alle Anbindungen des Pkw ausgewählt
- Über multiselekt *Anbindungen* werden die Anbindungen für das Verkehrssystem *Rad* zugelassen
- Die Anbindungszeit wird generell auf vier Minuten festgelegt

A.2.3 Fehlende Strecken

Hier sollten die im Netz fehlenden Strecken eingepflegt werden. Es handelt sich in der Regel um Fußwege, die von Radfahrern mitbenutzt werden können, oder aber um Überquerungsmöglichkeiten an Kreuzungen, die für Radfahrer eingerichtet wurden. Werden zu einem späteren Zeitpunkt neue Strecken eingeführt, so müssen die jetzt folgenden Schritte wiederholt werden, um die komplette Grundlage zur Berechnung des Widerstands zu besitzen.

Streckennummer	Straßenname	Streckennummer	Straßenname
2100000771	Kirche Heschach	2100000781	Schlosspark
2100000772	Kirche Heschach	2100000782	Furt bei Planie
2100000773	Kirche Heschach	2100000783	gesplittet Neckartor
2100000774	Lindenspür-/Falkertstr.	2100000784	gesplittet Neckartor
2100000775	Wannenstraße	2100000785	neu Neckartor
2100000776	Wannenstraße	2100000786	neu Neckartor
2100000777	Gebelsbergstraße	2100000787	neu Neckartor
2100000778	Gebelsbergstraße	2099900003	Fußweg gesperrt
2100000779	Schlosspark	990026898	Staffel geöffnet
2100000780	Schlosspark	2052884631	Staffel geöffnet

Tabelle A.1: Eingefügte und geänderte Strecken

Außerdem wurden die Knoten 800000360, 800000361 und 800000362 eingefügt (z-Koordinate nicht vergessen!). Der Knoten 58522835 mit den angrenzenden Strecken wurde gelöscht.

A.3 Widerstandsfunktion

Da für den Radverkehr sehr unterschiedliche Einflussgrößen (Weglänge, Höhendifferenz, Fahrbahnbelag, Anlage von Radwegen, Geschwindigkeiten im mIV, Verkehrsstärke im mIV, Wartezeiten an Knotenpunkten) eine Rolle spielen, ist es nötig diese Einflussgrößen in der Widerstandsfunktion qualitativ richtig zu berücksichtigen. Da die Einflussgrößen von jedem Menschen subjektiv unterschiedlich bewertet werden, ist es schwierig eine allgemeingültige Aussage zu treffen. Es ist daher möglich, dass die Annahmen, die der Widerstandsfunktion im Folgenden zugrunde gelegt sind, auch von anderen Personen in anderer Weise gewichtet werden.

A.3.1 Längsneigung berechnen

Die Längsneigung spielt eine wichtige Rolle im Radverkehr. Sie entscheidet wesentlich über die Fahrgeschwindigkeit und damit über die Reisezeit. Daher wird für jede Strecke eine mittlere Längsneigung ermittelt. Dazu berechnet man zunächst die Höhendifferenz zwischen jedem „vonKnoten“ und „nachKnoten“. Diese wird in das benutzerdefinierte Attribut *Delta h* geschrieben. Daraufhin berechnet man die Längsneigung für jede Strecke. Diese wird in

das benutzerdefinierte Attribut *Gefaele* geschrieben, indem man unter *Rechnen-Verfahren* das Attribut ändert. Dazu wird die folgende Funktion verwendet.

$$\text{Längsneigung} = \frac{\Delta h[m]}{\text{Streckenlänge}[m]} \cdot 100$$

A.3.2 Widerstand

Die Widerstandsfunktion kann man in Visum unter *Rechnen - Verfahren* in der „Dateikarte“ *Funktionen* verändern. Dort kann man unter *IV-Funktionen - Widerstand* für das Verkehrssystem Rad den Widerstand der Routen (Eine Route besteht aus den beiden Anbindungen, den Teilstrecken und den Abbiegebeziehungen) einstellen. Um benutzerdefinierte Attribute direkt in die Widerstandsfunktion einzubeziehen, muss man die Option *detailliert* wählen. Dort kann man für Strecken, Anbindungen und Abbiegebeziehungen getrennt die Einflussgrößen auf den Widerstand angeben. Die verschiedenen Einflussgrößen kann man in benutzerdefinierten Attributen als Zeitzuschläge oder Bewertungsfaktoren abspeichern.

Das Modell erlaubt zwei sinnvolle Varianten zur Suche nach Routen. Zum einen die Suche nach dem zeitkürzesten Weg. Dafür wählt man als Streckenwiderstand die reine Reisezeit t_0 -Rad. Die andere Möglichkeit besteht darin, diese Reisezeit mit dem Radwiderstandsfaktor zu bewerten. Dafür wird die Reisezeit t_0 -Rad mit dem benutzerdefinierten Attribut *RadWidFak* multipliziert. Wie diese beiden Benutzerdefinierten Attribute zustande kommen, wird im Folgenden erklärt. Der Radwiderstandsfaktor lässt sich in der Widerstandsfunktion einfach aus- und einschalten. Man darf die Reisezeit allerdings nicht mit Null multiplizieren, da sonst keine sinnvollen Routen ermittelt werden.

A.3.3 Geschwindigkeit aus Steigung berechnen

Die Reisezeit des Fahrrades lässt sich aus der mittleren Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Steigung und der Weglänge ermitteln. Über eine abschnittsweise definierte Funktion lässt sich einer Steigung eine Fahrgeschwindigkeit zuweisen. Den Verlauf der abschnittsweise definierten Funktion erhält man aus Werten aus der Befahrung mit dem Fahrrad. Dazu wird die Streckendatenbank in Access exportiert.

In Access gibt es die Möglichkeit über ein VBA-Programm die Radgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Steigung berechnen zu lassen. Hier wird die Annahme getroffen, die Geschwindigkeit eines Radfahrers würde sich wie folgt entwickeln:

$$y = f(x) = \begin{cases} 29 & , x \leq -8 \\ 19 - \frac{25}{20}x & , -8 < x < 12 \\ 4 & , 12 \leq x \end{cases}$$

Um in VBA ein Modul umzubenennen, markiert man das entsprechende Modul, klickt auf *Ansicht* und schließlich auf *Eigenschaftenfenster*. Unter Umständen ist es nötig sich in der Objektbücherei zusätzliche Befehlspakete zu laden. Diese findet man unter *Extras - Verweise - Object-Library*. Für die Programmierung in VBA benötigt man das Paket *DOA 3.6 von Microsoft*

Über *Datei - Importieren* kann man die Daten aus der Datenbank wieder in Visum einlesen. Dabei muss man darauf achten, dass die Option *additiv lesen* gewählt wurde. Außerdem sollen die Attribute *überschrieben* werden. Weiterhin sollte man unbedingt darauf achten, dass nur die Attribute eingelesen werden, die auch tatsächlich geändert wurden.

A.3.4 Reisezeit aus Geschwindigkeit berechnen

Die Reisezeit für das Verkehrssystem Rad setzt sich zusammen aus den Anbindungszeiten, den Abbiegezuschlägen und der Zeit auf den Strecken. Die Zeiten für die Strecken kann man berechnen, mit der Formel

$$Zeit[s] = \frac{Weg[m]}{Geschwindigkeit[m/s]}$$

Die Länge liegt in Visum in km vor. Die Geschwindigkeit in km/h. Bei der Berechnung von t_0 -Rad muss daher auf Sekunden umgerechnet werden. Auch für dieses Problem ist es sinnvoll eine VBA-Script zu nutzen, da es leichter nachvollziehbar, schneller zu ändern und weniger fehleranfällig in der Bedienung ist.

Im vorigen Schritt wurde auch solchen Strecken eine Reisezeit zugewiesen, die für das Fahrrad gesperrt sind. Diesen Strecken kann man in einer Access-Datenbank mit einer Aktualisierungsabfrage sehr hohe Werte der Reisezeit t_0 -Rad zuweisen. Für diese Zuweisung macht man eine Aktualisierungsabfrage, in der man als Kriterien für die zugelassenen Verkehrssysteme angibt „nicht wie *Rad*“ und weist der Reisezeit den Wert 360000000 zu. Diese Abfrage wird als *gesperrte Strecken sperren* benannt. Die geänderte Streckendatenbank kann man sich dann wieder in Visum einlesen.

A.4 Einbahnstraßen gegen Fahrtrichtung

Um sich einen Überblick über die in Stuttgart geöffneten Einbahnstraßen zu verschaffen und die Freischaltung von Einbahnstraßen gegen die Fahrtrichtung für Radverkehr zu erleichtern wird ein benutzerdefiniertes Attribut „Einbahnoffen“ eingeführt. Dieses ist vom Typ Ganzzahl und bekommt standardmäßig den Wert Null zugewiesen. Nun wird über *Listen - Strecken* für jede Einbahnstraße, die gegen die Fahrtrichtung geöffnet ist, dieser Wert auf Eins geändert. (Diese Änderung kann man auch noch in einer Access-Datenbank vornehmen.)

Man kann auf diese Art alle Einbahnstrassen, die für den Radverkehr geöffnet sind, in die Datenbank *Strecken* einpflegen. Um die Strecken im Modell tatsächlich für ein Routing zu öffnen, muss das Verkehrssystem Rad (V) zugelassen werden, müssen die Kapazität und Geschwindigkeit im IV größer als Null sein und das benutzerdefinierte Attribut T_0 -Rad muss wieder mit der Reisezeit für das Fahrrad belegt werden, wenn zuvor die Abfrage *gesperrte Strecken sperren* durchgeführt worden war.

Um diese Änderungen auszuführen, kann man ein kleines VBA-Programm in einer Access-Datenbank nutzen. Man muss dafür jedoch zunächst die Strecken-Datenbank aus Visum exportieren und nachdem das Programm durchgelaufen ist, wieder importieren. Da dies zeitaufwendige Vorgänge sind, lohnt es sich nur, wenn man mehrere Einbahnstraßen gleichzeitig öffnen will.

Neben den genannten Einbahnstraßen, die im Modell für den Radverkehr gegen die Fahrtrichtung geöffnet werden mussten, gibt es eine Reihe von Einbahnstraßen, die zwar Einbahnstraßen sind, jedoch im Netzmodell nicht gegen die Fahrtrichtung gesperrt sind. Für ein Routing im Radverkehr waren daher keine Änderungen nötig. Sie sind nach wie vor falsch abgespeichert.

Fußgängerzonen können analog geöffnet werden. Hier muss dem Attribut allerdings für Hin- und Rückrichtung der Wert 2 zugewiesen werden. Das VBA-Programm wird dann natürlich auch auf 2 abgeändert!

Streckennummer	Straßenname	Streckennummer	Straßenname
52888225	Hasenbergstraße	2052853372	Münzstraße
52852834	Hasenbergstraße	2052853312	Marktstraße
52852835	Hasenbergstraße	2052853311	Marktstraße
52852833	Hasenbergstraße	2100000739	Kronenstraße
52852777	Gutbrodstraße	2100000738	Kronenstraße
52852778	Gutbrodstraße	52853215	Lautenschlagerstr.
52888219	Hasenbergstraße	52852493	Büchsenstraße
52852829	Hasenbergstraße	990026917	Büchsenstraße
52854304	Weimarstraße	52853254	Leuschnerstraße
990026922	Ludwigstraße	52853255	Leuschnerstraße
52854822	Bergstraße	52852607	Esslinger Straße
990026643	Landhausstraße	52852608	Esslinger Straße
990026781	Schubartstraße	52852474	Breitscheidstraße
52852576	Eberhardstraße	52888810	Eberhardstraße
52852577	Eberhardstraße	52852578	Eberhardstraße
52852573	Eberhardstraße	52852579	Eberhardstraße
52854253	Urbanstraße	990026668	Klingenstraße

Tabelle A.2: Geöffnete Einbahnstraßen

Streckennummer	Straßenname	Streckennummer	Straßenname
?	Falkertstraße West	?	Augustenstr. West
?	Straussweg Ost	?	Grüneisenstr. Ost
?	Heinrich-Baumannstr. Ost	?	Mörikestr. Süd
?	Hahnstraße Süd		

Tabelle A.3: Falsche geöffnete Einbahnstraßen

Streckennummer	Straßenname	Streckennummer	Straßenname
990026848	Lederstraße	2053197465	Holzstraße
52852964	Hohe Straße		Burgstallstraße

Tabelle A.4: Geöffnete Fußgängerzonen

A.5 Abbiegebeziehungen

- Zunächst gelten für Abbiegebeziehungen im Radverkehr die gleichen Regelungen wie im motorisierten Individualverkehr. Es werden daher zunächst alle Abbiegebeziehungen die im mIV geöffnet sind auch für den Radverkehr geöffnet.
- Radverkehr wird oftmals auch auf eigenen Radwegen geführt oder kann gemeinsame Fuß- und Radwege, sowie gesperrte Forst- und Landwirtschaftliche Wege nutzen. Daher müssen auch für diese Fälle die Abbiegebeziehungen geöffnet werden. Dabei muss beachtet werden, dass solche Abbiegebeziehungen nicht geöffnet werden, die sowohl für den Pkw-Verkehr als auch für den Radverkehr verboten sind. Die Öffnung dieser Abbiegebeziehungen erfolgt mit drei Filter-Abfragen:
 - Abbiegen vom Straßennetz auf Radwege:

von Strecke	$VSysset = Pkw$
nach Strecke	$VSysset \neq Pkw$
nach Strecke	$VSysset = Rad$
 - Abbiegen von Radwegen auf Radwege:

von Strecke	$VSysset \neq Pkw$
nach Strecke	$VSysset \neq Pkw$
von Strecke	$VSysset = Rad$
nach Strecke	$VSysset = Rad$
 - Abbiegen von Radwegen auf das Straßennetz:

von Strecke	$VSysset \neq Pkw$
von Strecke	$VSysset = Rad$
nach Strecke	$VSysset = Pkw$
- Außerdem gibt es noch eine ganze Reihe weiterer Abbiegebeziehungen, die für den Radverkehr zulässig sind, für den Pkw-Verkehr jedoch gesperrt. Es handelt sich dabei meist um Knotenpunkte, an denen für den Linienbus-Verkehr exclusive Abbiegebeziehungen vorhanden sind. Diese wurden auch für den Radverkehr freigegeben. Hier werden einige Beispiele in Stuttgart aufgeführt:
 - Überquerung der Schlossstraße auf der Johannesstraße
 - Tübingerstraße in Richtung Marienplatz
 - Eberhardstraße in Richtung Rotebühlplatz
 - Kronenstraße über die Friedrichstraße
 - Hasenbergstraße über die Reinsburgstraße

A.6 Widerstandsfaktoren im Radverkehr

Außer der Reisezeit spielt für den Widerstand im Radverkehr die Geschwindigkeit im mIV, die Verkehrsstärke im mIV und die Anlage von Radfahrstreifen, Radschutzstreifen beziehungsweise Bordsteinradwegen eine Rolle, sofern der Radverkehr nicht separat vom mIV geführt wird.

A.6.1 Radwiderstandsfaktor Geschwindigkeit mIV

- Unter *Netz - Benutzerdefinierte Attribute* wird das Netzelement Strecken ausgewählt
- Es wird ein Radwiderstandsfaktor eingeführt, der streckenabhängig die Attraktivität für Radfahrer beeinflusst

- Dazu wird die ID *RadWidFakV*, der Code *RadWidFakV*, der Name *RadWidFakV*, der Typ *Gleitkommazahl* und der Standardwert *1* gesetzt.

Um dem benutzerdefinierten Attribut *RadWidFakV* Werte zuzuweisen, werden Strecken, die für den Pkw zugelassen sind in Abhängigkeit von der zulässigen Geschwindigkeit mit der folgenden Funktion Werte zugewiesen. Dazu wird in einer Datenbank ein VBA-Programm verwendet.

$$RadWidFakV = 1 + 0,1 \left(\frac{V_{0(mIV)} - 10}{35} \right)^3$$

A.6.2 Radwiderstandsfaktor Verkehrsstärke mIV

Die Verkehrsstärke im mIV kann man in ein benutzerdefiniertes Attribut abspeichern. Dazu benötigt man Verkehrszählungen oder ein Umlegungsergebnis für den mIV. Für diese Diplomarbeit wurden die Werte aus „Belastung_RVP_IST“ verwendet. Diese liegen zwar nicht für das ganze Netz vor, jedoch sind auf allen größeren Straßen Werte vorhanden, auf denen die Verkehrsstärke eine Rolle spielt.

Es wird ein weiteres benutzerdefiniertes Attribut *RadWidFakQ* eingeführt, dem entsprechend der Belastung die Werte nach folgender Funktion zugewiesen werden:

$$RadWidFakQ = 1 + \frac{1}{20000} \cdot Q_{(mIV)}$$

A.6.3 Radwiderstandsfaktor

Die beiden zuvor genannten Widerstandsfaktoren können multiplikativ zu einem Widerstandsfaktor, abhängig vom mIV, verknüpft werden. Mit diesem Widerstandsfaktor werden die Reisezeiten *T0_Rad* multipliziert und bilden somit die Widerstandsfunktion für das Verkehrssystem Rad. Das Genialische an diesem Radwiderstandsfaktor ist, dass er gleichzeitig ein Analysetool für Radwege darstellt. Für den Fall, dass er $\leq 1,5$ ist, ist Radverkehr auf der Fahrbahn nicht mehr zumutbar und die Anlage von Radwegen dringend zu empfehlen. Dieser Zusammenhang besteht, da die beiden Funktionen für *RadWidFakQ* und *RadWidFakV* so gewählt wurden, dass, wenn man die zulässige Geschwindigkeit im mIV über die Verkehrsstärke im mIV für die Ergebnisse „1,5“ aufträgt, ungefähr der Verlauf erhalten wird, der in Schnabel-Lohse angegeben ist, für den die Anlage von Radwegen empfohlen wird. Ein solcher Zusammenhang wäre entsprechend für andere Funktionen auch für andere Werte, z.B. zwei oder drei, denkbar. Es wurde jedoch 1,5 gewählt, da man davon ausgehen sollte, dass dann eine Verbesserung der Situation für Radfahrer nötig ist, wenn ein Radfahrer keine Alternativen hat, die die anderthalbfache („äquivalente“) Reisezeit betragen.

A.6.4 Radverkehrsanlagen

Um den Einfluss von straßenbegeleitenden baulichen Anlagen wie Bordsteinradwegen, Radfahrstreifen oder Radschutzstreifen mit einzubeziehen wird ein weiteres benutzerdefiniertes Attribut *HatRadweg* eingeführt.

Strecken ohne Radweg *HatRadweg=0*

Strecken mit Bordsteinradweg *HatRadweg=1*

Strecken mit links liegendem Bordsteinradweg *HatRadweg=2*

Strecken mit Radfahrstreifen *HatRadweg=3*

Strecken mit Radschutzstreifen *HatRadweg=4*

Über eine Abfrage in einer Datenbank wird für alle Werte gleich eins der Radwiderstandsfaktor *RadWidFak* auf 1,3 gesetzt. Für alle Werte gleich zwei wird der Radwiderstandsfaktor *RadWidFak* auf 1,5 gesetzt. Der Einfluss von Radfahrstreifen und Radschutzstreifen macht sich so bemerkbar, dass die Einwirkungen aus dem mIV weniger direkt erlebt werden. Es liegt also nahe, den Radwiderstandsfaktor *RadWidFak* durch einen Faktor abzumindern. Für Werte des Attributs *HatRadweg* gleich drei wird der Radwiderstandsfaktor *RadWidFak* mit 0,75 multipliziert, für Werte *HatRadweg* gleich vier wird der Radwiderstandsfaktor *RadWidFak* mit 0,95 multipliziert. Diese Werte sind willkürlich gewählt, ohne über einen empirischen Hintergrund zu verfügen!

A.7 Auswertung und Analyse

A.7.1 Bezirke außerhalb Stuttgart

Da für die Bezirke außerhalb des Stadtgebietes Stuttgart das Wegenetz für Radfahrer (also Land- und Forstwirtschaftswege, straßenbegleitende Radwege) nicht ausreichend genau eingepflegt sind, ist hier eine Bestwugsuche, bzw. eine Umlegung oftmals nicht möglich. Es scheitert zum einen daran, dass die betreffenden Bezirke nicht in das Wegenetz eingebunden sind, zum anderen werden nicht die für Radverkehr geeigneten Wege angeboten. Um dieses Problem zu umgehen, wird für die Bezirke außerhalb des Stadtgebietes die Verkehrsnachfrage auf Null gesetzt. Die Nummern der Bezirke des Stadtgebietes Stuttgart liegen im Wertebereich 23000 bis 23999. Man setzt also einen Filter auf den Bereich dieser Nummern. Indem man sich die Bezirke und die Bezirksanbindungen darstellen lässt, kann man sehen, dass fast alle Bezirke für den Radverkehr eingebunden sind. Die Bezirke 23453 und 23454 sind nicht für Radverkehr geeignet angebunden. Die Nachfrage wurde hier auch zu Null gesetzt.

A.7.2 Nachfragematrix

Um die Nachfrage eingeben zu können, fügt man unter *Nachfrage - Nachfragedaten* eine neue Nachfrage-Matrix für den Radverkehr ein. In einem ersten Versuch wird der Radverkehr zu 5 % der Pkw-Nachfrage angenommen. Die Nachfrage-Matrix wird gespeichert, indem sie nach Visum exportiert wird. Genauer wäre es die Radverkehrsnachfrage noch abhängig von der Luftlinienentfernung der Bezirke zu modellieren, sodass der Fahrrad-Anteil an der Gesamtverkehrsnachfrage im Entfernungsbereich zwischen 3 und 15 km auf Null abnimmt. Für die stochastische Umlegung wurden die Relationen auf denen Befahrungen durchgeführt wurden und einige zufällig gewählte Relationen mit einer Nachfrage von Hundert versehen.

A.7.3 Umlegung

Wenn ein Bezirk in Visum über mehrere Knoten angebunden ist, wird der Quell- und Zielverkehr über Verhältniss-Angaben auf die einzelnen Anbindungen verteilt. Wenn man eine Umlegung durchführt, gibt es zwei Möglichkeiten, wie Verbindungen zwischen zwei Bezirken gesucht werden. Entweder wird für jede Relation der Quell- und Zielverkehr nach den Verhältnissen aufgeteilt, oder aber der gesamte Quell- und Zielverkehr wird nach den Verhältnissen aufgeteilt. Diese Einstellungen können unter *Verfahren - Funktionen - IV-Funktionen - gesamten Quell-/Zielverkehr* vorgenommen werden. Da bei der Wegesuche für die Variante mit der Aufteilung für jede einzelne Relation nicht für alle Kombinationen Wege gefunden werden können, wird diese nicht verwendet. Für ein Umlegungsergebnis gilt: Unter *Rechnen - Verfahren* kann man für die „Karteikarte“ *Ablauf* unter *Sonstiges - Attribut ändern - Belastung Fahrzeuge NSeg* dem neuen benutzerdefinierten Attribut die entsprechenden Werte zuweisen. Sie stehen somit für weitere Auswertungen zur Verfügung.

A.7.4 Kenngrößen

Es ist möglich sich in Visum die Kenngrößen einer Relation berechnen zu lassen. Eine wichtige Kenngröße ist zum Beispiel die Luftlinienentfernung, die Reisezeit oder der Widerstand. Auf diese Weise lassen sich Schwachstellen im Netz finden. Ist beispielsweise das Verhältnis von Luftlinienentfernung und Widerstand zwischen zwei Bezirken schlechter, als zwischen vergleichbaren anderen Relationen, so kann dies auf Handlungsbedarf hindeuten. Unter *Rechnen - Verfahren* auf der „Karteikarte“ *Ablauf* kann man Kenngrößenmatrizen berechnen. Als Nachfrage-Segment gibt man nur Radverkehr an. Man kann für diese Berechnung die Wege aus einer zuvor ausgeführten Umlegung verwenden. Die folgenden Einstellungen werden unter *Parameter* vorgenommen. Das Ausgabeformat wird als CSV gewählt, die Daten werden durch Semikolon getrennt. Es sollen nur aktive Bezirke ausgegeben werden.

A.7.5 Zeit-Weg-Diagramm

Mit Hilfe des Programms *Routenauswertung_VISUM_9* kann man sich das vom Modell ermittelte Fahrzeitprofil zwischen zwei Knoten ausgeben lassen. Für die Routensuche wird dabei die im Modell eingestellte Widerstandsfunktion des Verkehrssystems *Rad* genutzt. Das Fahrzeitprofil setzt sich aus den folgenden Größen zusammen:

- Auf der Strecke: Wert des benutzerdefinierten Attributs $T0_Rad$
- Für Abbiegen an Knotenpunkten: Wert des Attributs $T0_PrTSys(V)$
Dabei bedeutet dieser Wert die mittlere Wartezeit an Knotenpunkten für das Verkehrssystem Rad. Diese Wartezeit ist im Modell gleich hoch wie für den motorisierten Individualverkehr, da keine Unterschiede zu erwarten sind.

B. Quellcodes zu den Programmen

B.1 Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Steigung

```
Sub SteigungNachRadGesch()  
  
    Dim db As Database  
    Dim t As Long  
    Set db = CurrentDb  
    Set rs = db.OpenRecordset("STRECKE", dbOpenDynaset)  
  
    rs.MoveFirst  
  
    Do While Not rs.EOF  
        DoEvents  
        If rs!GEFAELLE <= -8 Then  
            rs.Edit  
            rs!RadGeschw = 29  
            rs.Update  
  
            ElseIf rs!GEFAELLE <= 12 And rs!GEFAELLE > -8 Then  
                rs.Edit  
                rs!RadGeschw = -25 / 20 * rs!GEFAELLE + 19  
                rs.Update  
  
            ElseIf rs!GEFAELLE > 12 Then  
                rs.Edit  
                rs!RadGeschw = 4  
                rs.Update  
  
            End If  
            rs.MoveNext  
        Loop  
  
    rs.Close  
    db.Close  
  
End Sub
```

B.2 Reisezeit in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Länge

```
Sub RadgeschwLaengenachReisezeit()
```

```
Dim db As Database
Dim t As Long
Set db = CurrentDb
Set rs = db.OpenRecordset("STRECKE", dbOpenDynaset)

rs.MoveFirst

Do While Not rs.EOF
    DoEvents

    rs.Edit
    rs!t0_Rad = 3600 * rs!Laenge / rs!RadGeschw
    rs.Update

    rs.MoveNext
Loop

rs.Close
db.Close

End Sub
```

B.3 Einbahnstraßen öffnen

```
Sub Einbahnstrassenoeffnen()

Dim db As Database
Dim t As Long
Set db = CurrentDb
Set rs = db.OpenRecordset("STRECKE", dbOpenDynaset)

rs.MoveFirst

Do While Not rs.EOF

    If rs!Einbahnoffen = 1 Then

        DoEvents

        rs.Edit
        rs!t0_Rad = 3600 * rs!Laenge / rs!RadGeschw
        rs.Update

        rs.Edit
        rs!vsysset = "V"
        rs.Update

        rs.Edit
        rs!v0iv = 29
        rs.Update

        rs.Edit
```

```

    rs!KapIV = 200
    rs.Update

    rs.Edit
    rs!t0_Rad = 3600 * rs!Laenge / rs!RadGeschw
    rs.Update

    rs.MoveNext
    Else
    DoEvents
    rs.MoveNext

    End If
Loop

rs.Close
db.Close

End Sub

```

B.4 Einfluss aus mIV-Geschwindigkeit und Verkehrsstärke

```

Sub VerkehrsstaerkeGeschwindigkeitnachRadWidFak()

    Dim db As Database
    Dim t As Long
    Set db = CurrentDb
    Set rs = db.OpenRecordset("STRECKE", dbOpenDynaset)

    rs.MoveFirst

    Do While Not rs.EOF
        DoEvents

        rs.Edit
        rs!RadWidFakQ = 1 + (1 / 20000) * rs!Belastung_RVP_IST
        rs.Update

        rs.Edit
        rs!RadWidFakV = 1 + 0.1 * ((rs!V0IV - 10) / 35) ^ 3
        rs.Update

        rs.MoveNext
    Loop

    rs.Close
    db.Close

End Sub

```

B.5 Verknüpfung von RadWidFakQ und RadWidFakV

```
Sub RadWidFakVundRadWidFakQnachRadWidFak()

    Dim db As Database
    Dim t As Long
    Set db = CurrentDb
    Set rs = db.OpenRecordset("STRECKE", dbOpenDynaset)

    rs.MoveFirst

    Do While Not rs.EOF
        DoEvents

        rs.Edit
        rs!radwidfak = rs!RadWidFakV * rs!RadWidFakQ
        rs.Update
        rs.MoveNext
    Loop

    rs.Close
    db.Close

End Sub
```

B.6 Widerstandsfaktoren für Radverkehrsanlagen

```
Sub HatRadwegnachRadwidfak()

    Dim db As Database
    Dim t As Long
    Set db = CurrentDb
    Set rs = db.OpenRecordset("STRECKE", dbOpenDynaset)

    rs.MoveFirst

    Do While Not rs.EOF
        DoEvents
        If rs!HatRadweg = 1 Then
            rs.Edit
            rs!radwidfak = 1.3
            rs.Update

        ElseIf rs!HatRadweg = 2 Then
            rs.Edit
            rs!radwidfak = 1.5
            rs.Update

        ElseIf rs!HatRadweg = 3 Then
            rs.Edit
            rs!radwidfak = rs!radwidfak * 0.75
            rs.Update

    Loop

End Sub
```

```
    ElseIf rs!HatRadweg = 4 Then
        rs.Edit
        rs!radwidfak = rs!radwidfak * 0.95
        rs.Update
    End If

    If rs!radwidfak < 1 Then
        rs.Edit
        rs!radwidfak = 1
        rs.Update
    End If

    rs.MoveNext
Loop

rs.Close
db.Close

End Sub
```


C. Aufzeichnung zu den Befahrungen

In diesem Kapitel werden die Befahrungen auf den neun ausgewählten Routen dargestellt. Weiterhin sind Screenshots von der Route im Netzmodell und dem jeweiligen „Besten Weg“ aus dem Modell abgebildet. Die Trajektorien aus dem Modell und aus der Aufzeichnung mit dem GPS-Gerät sind ebenfalls dargestellt und können verglichen werden. Lediglich auf der dritten Route wird dieser Vergleich nicht vorgenommen. Es wurde im Modell darauf verzichtet Fußgängerampeln als Element für Radrouten abzubilden. Auf dieser Route musste aber eine solche Fußgängerampel benutzt werden, um die Friedrichstraße überqueren zu können.

C.1 Route 3: Liederhalle - Mineralbäder

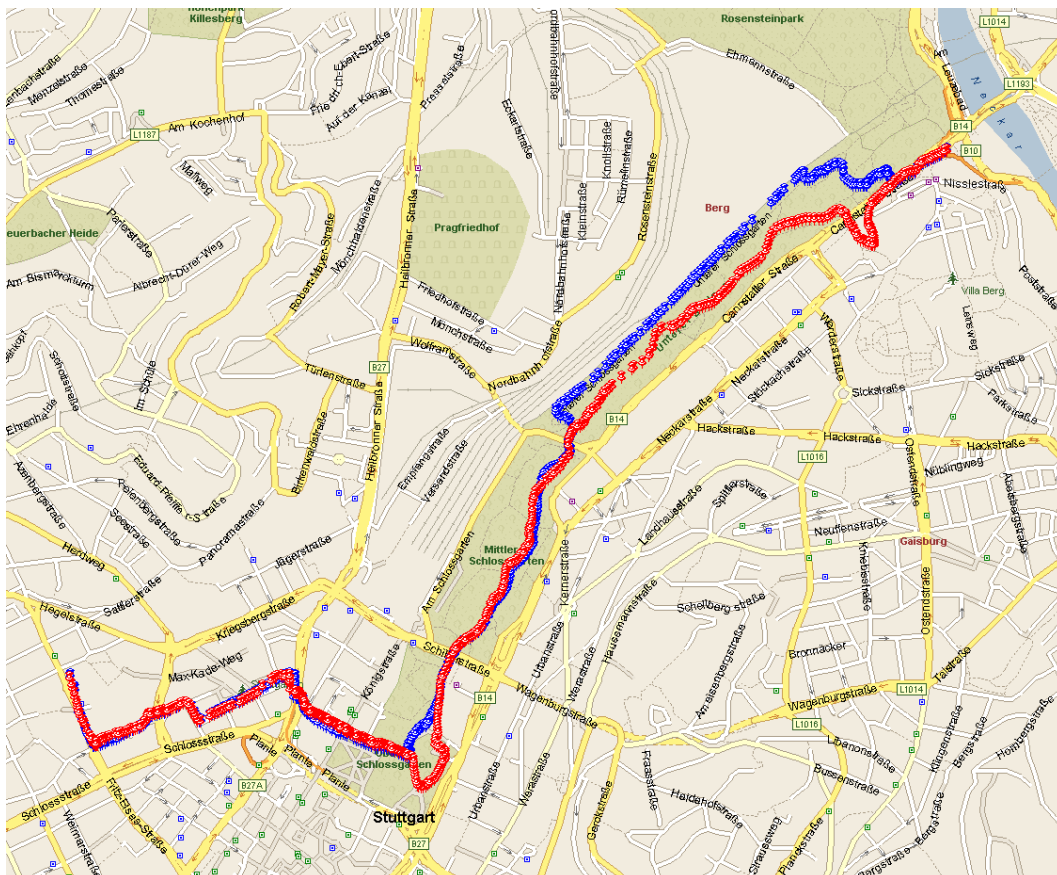


Abbildung C.1: Befahrung Route 3

C.2 Route 1: Hasenbergst. 45 - Liederhalle

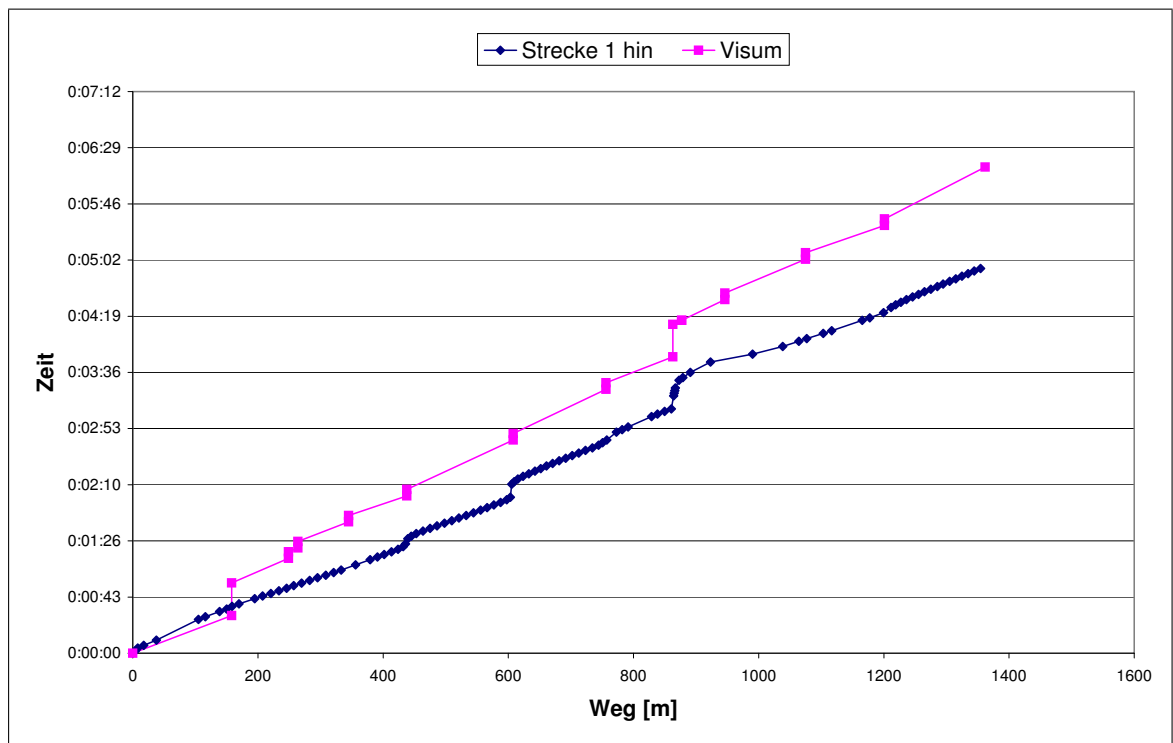
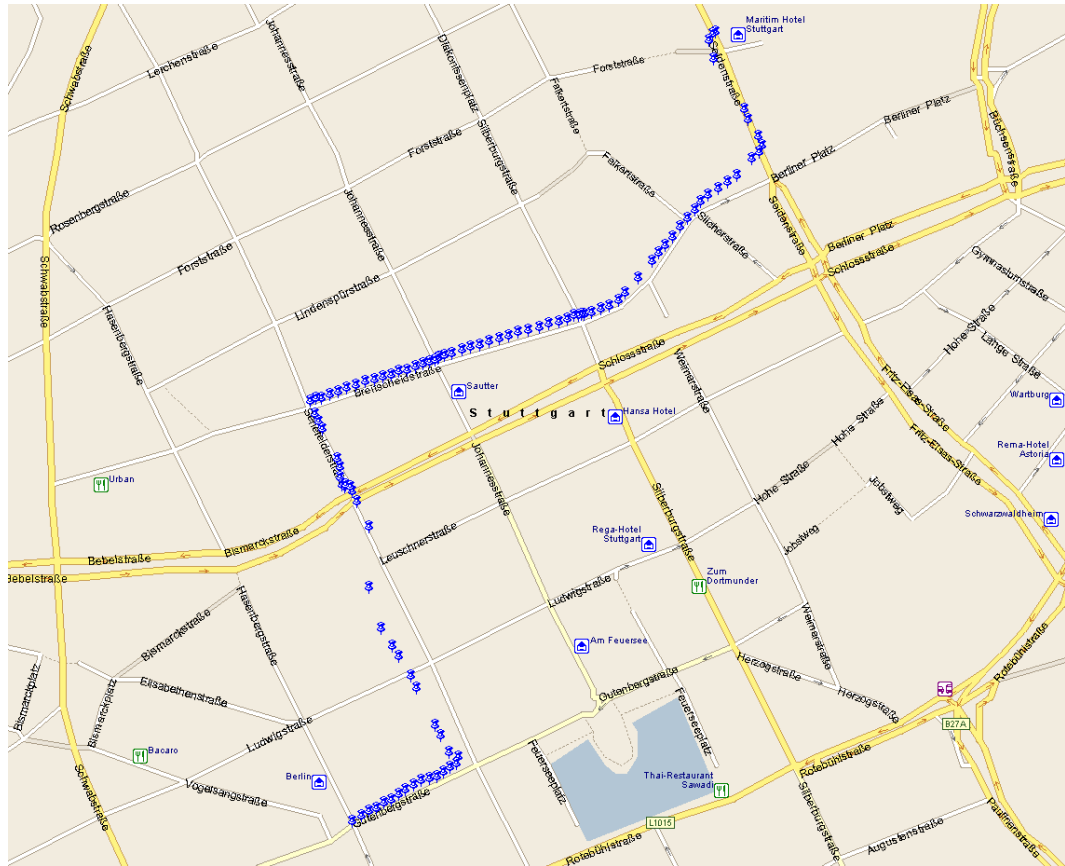


Abbildung C.2: Vergleich Fahrzeitprofil Route 1



Tabelle C.1: Vergleich Routenwahl Relation 1

C.3 Route 2: Burgstallstr. - Hasenbrgstr. 45

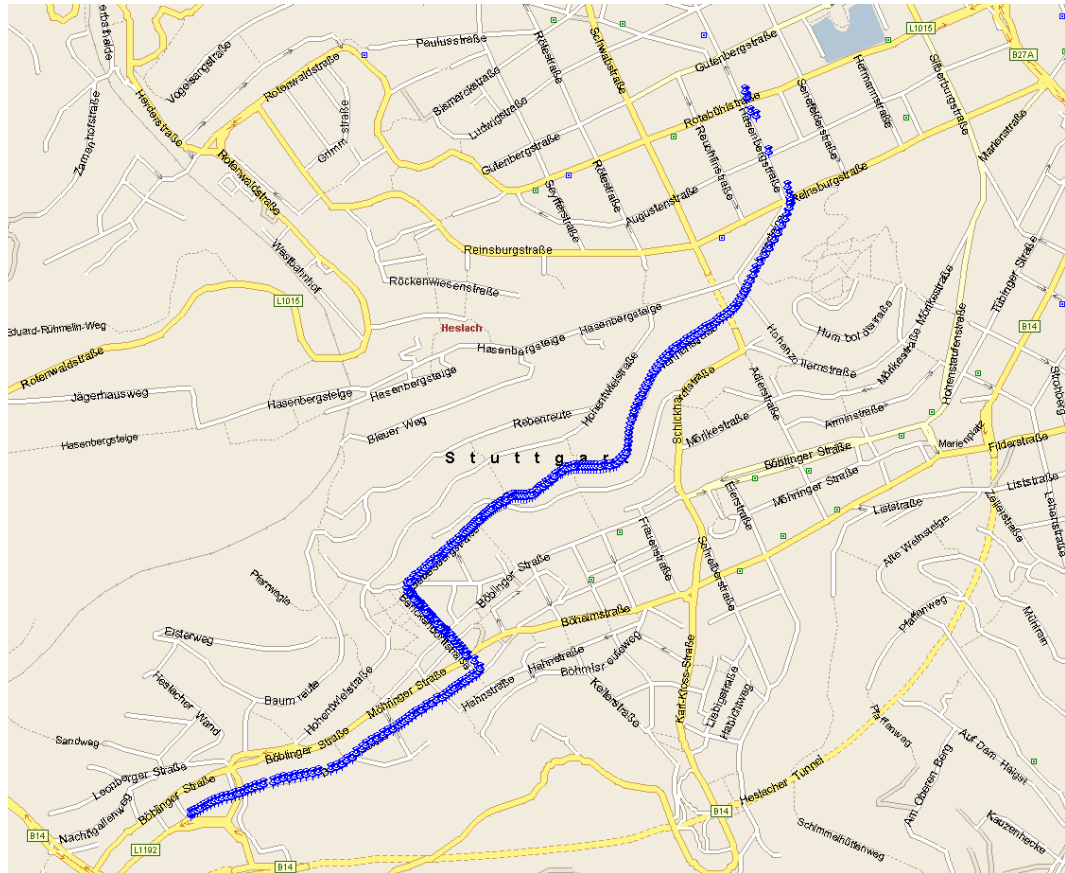


Abbildung C.3: Vergleich Fahrzeitprofil Route 2

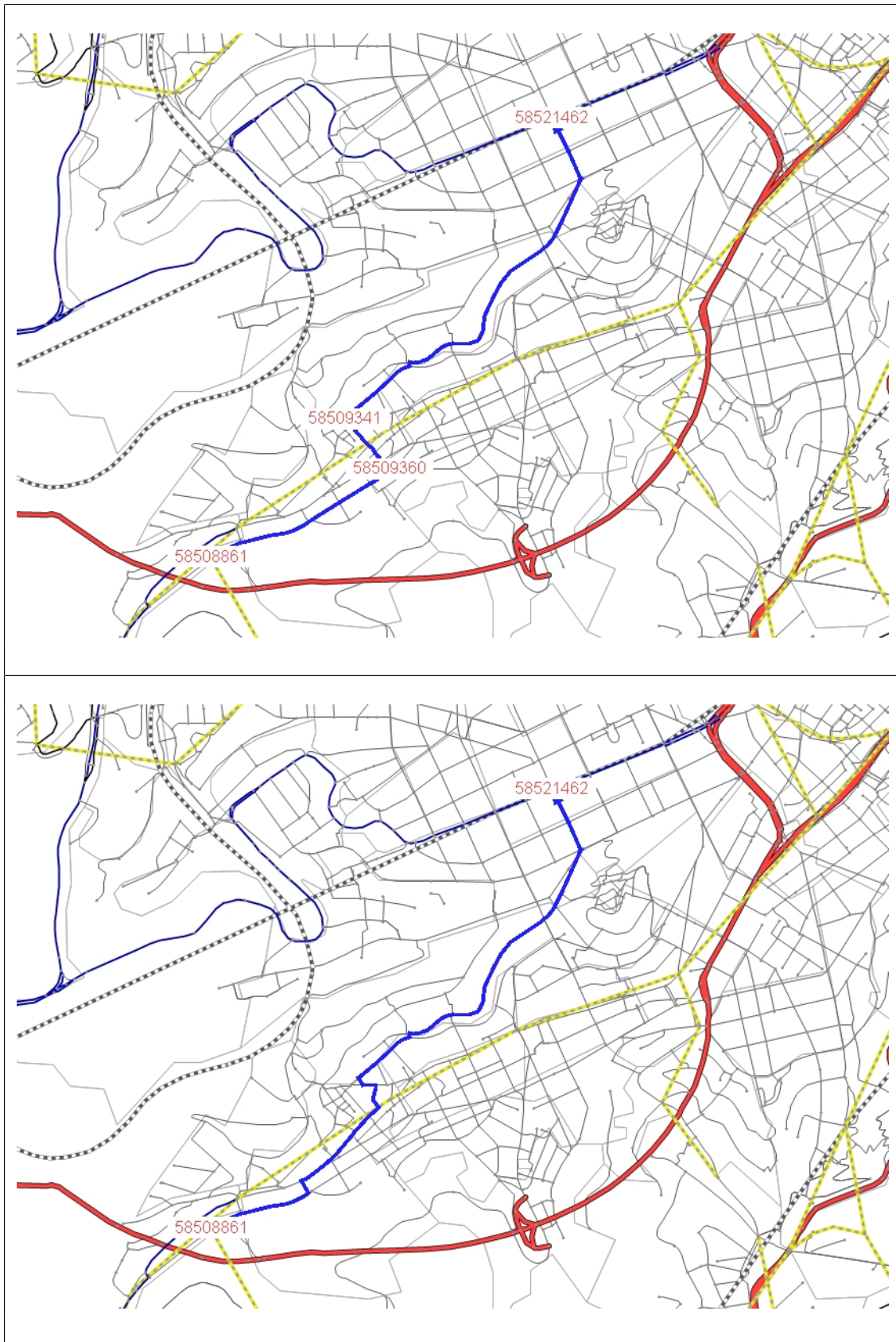


Tabelle C.2: Vergleich Routenwahl Relation 2

C.4 Route 4: Hölderlinplatz - Wilhelmsplatz

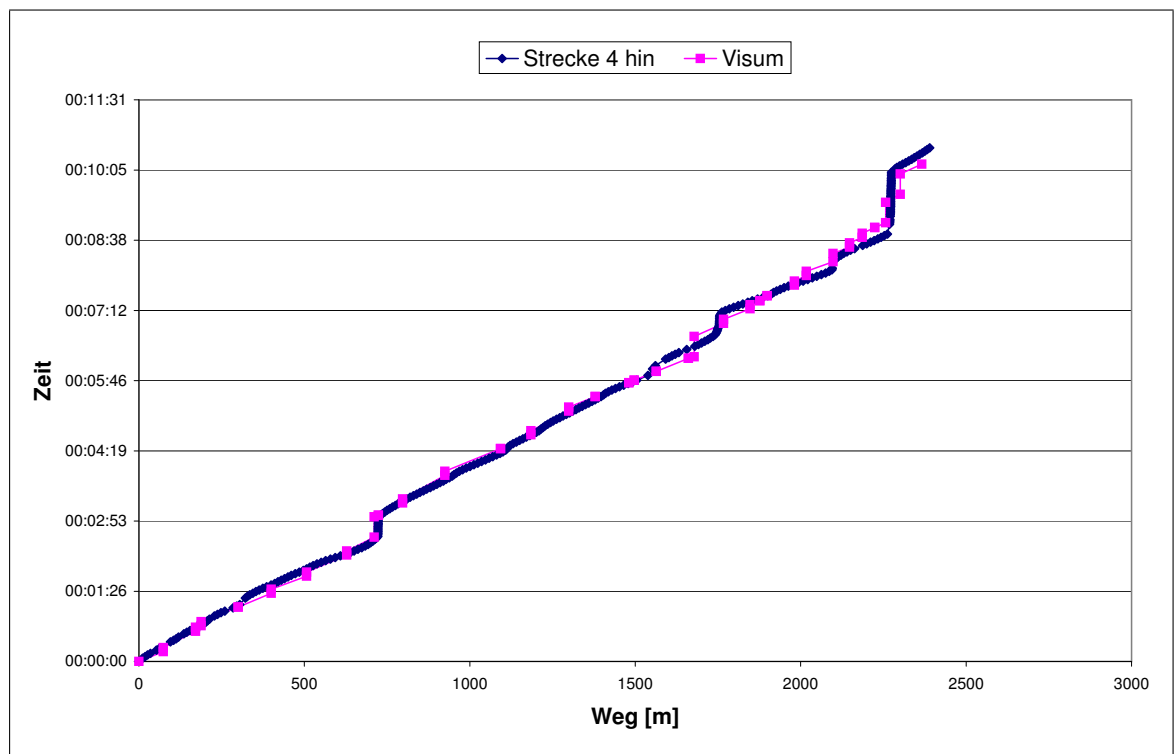
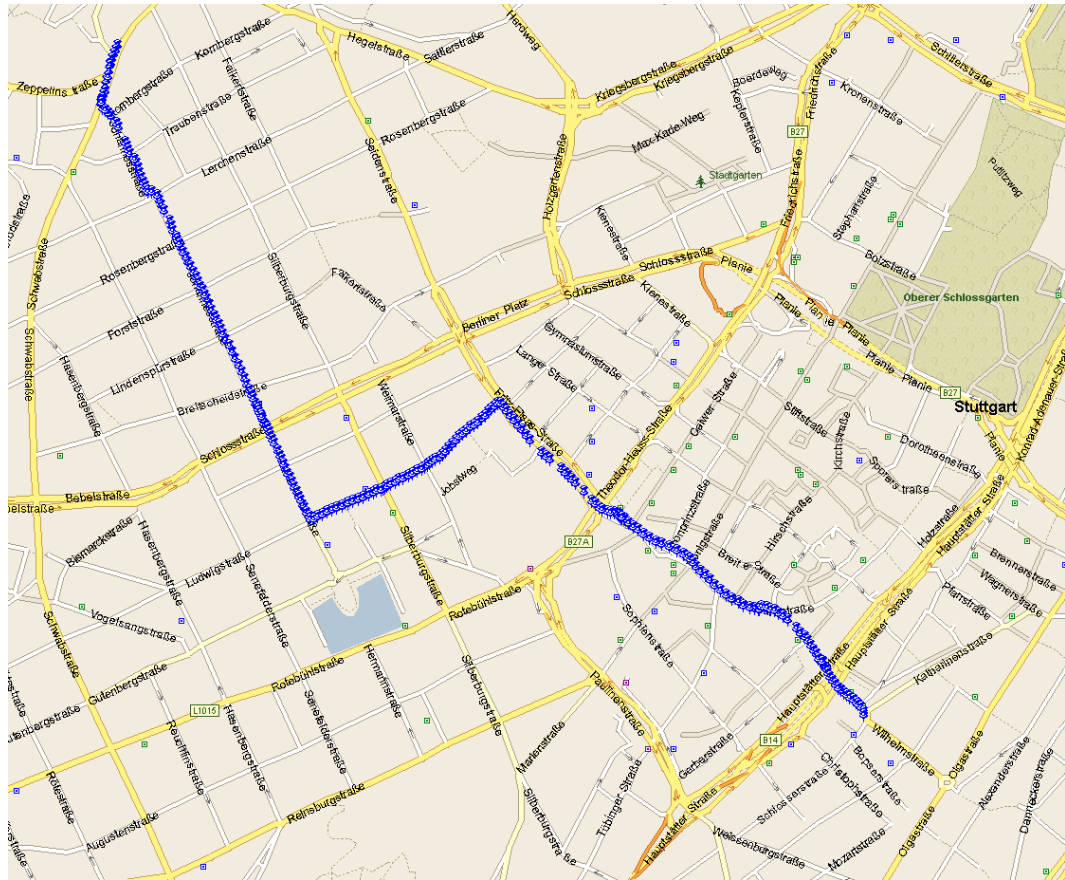


Abbildung C.4: Vergleich Fahrzeitprofil Route 4

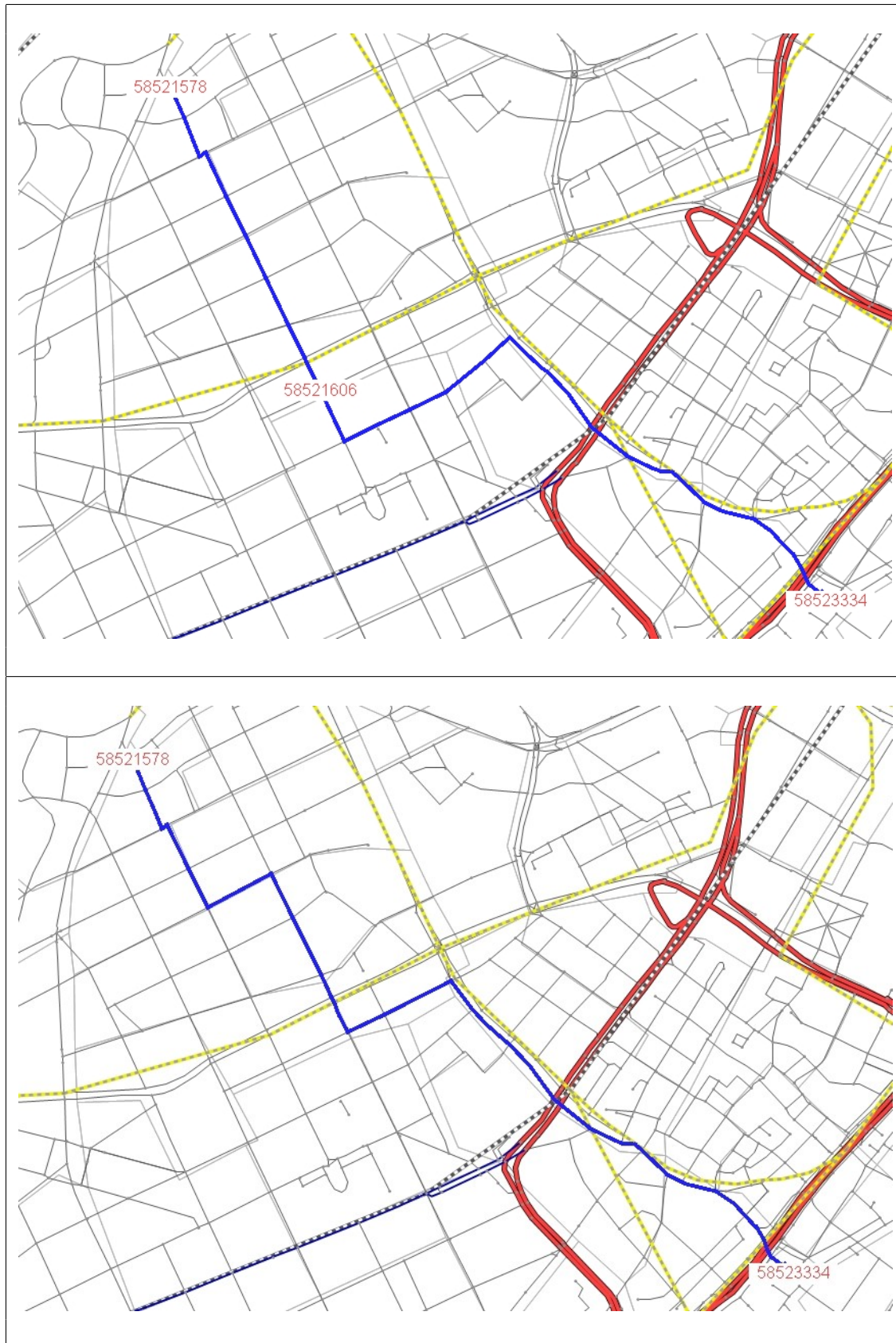


Tabelle C.3: Vergleich Routenwahl Relation 4

C.5 Route 5: Keplerstr. - Traubenstr.

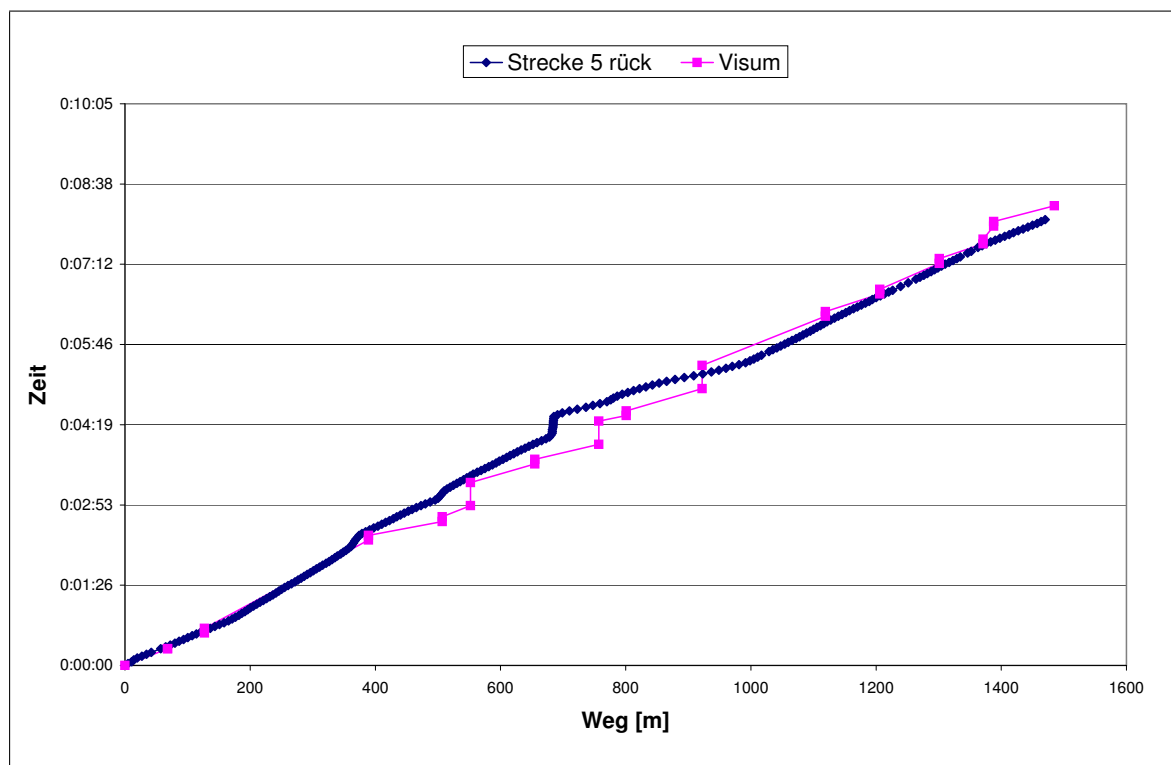
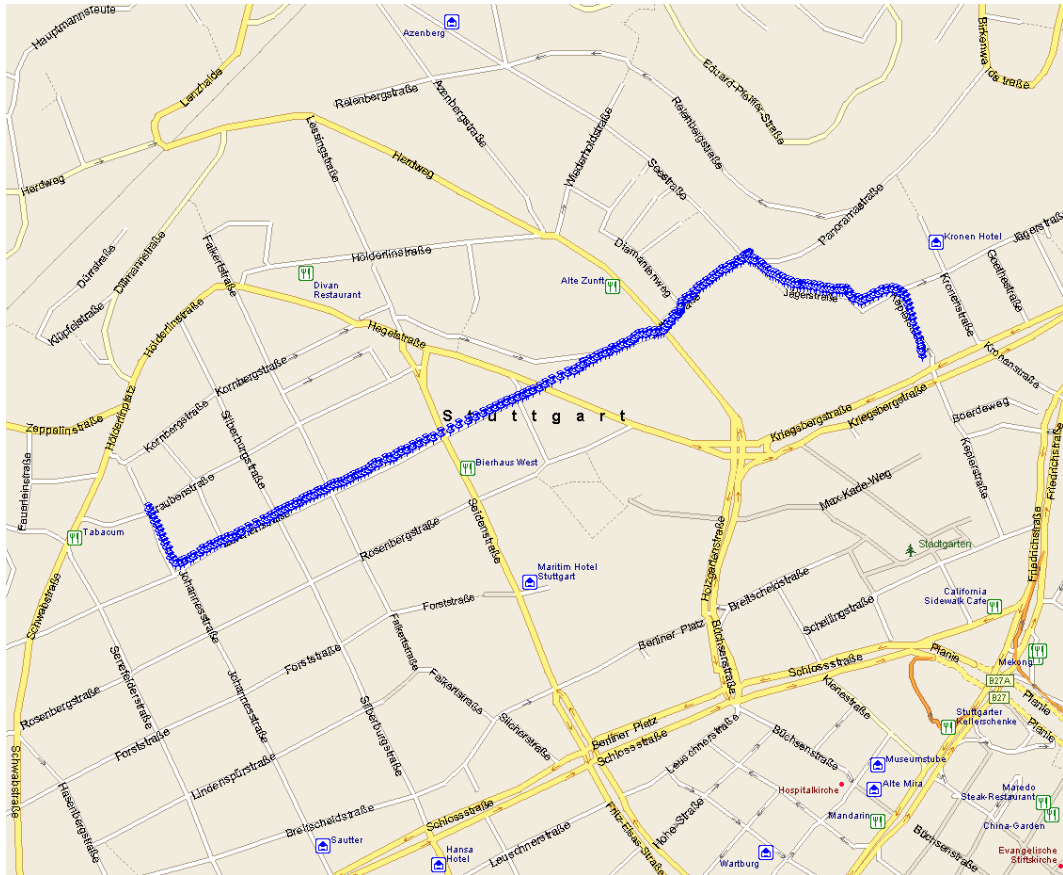


Abbildung C.5: Vergleich Fahrzeitprofil Route 5



Tabelle C.4: Vergleich Routenwahl Relation 5

C.6 Route 6: Sattlerstr. - Kunstakademie

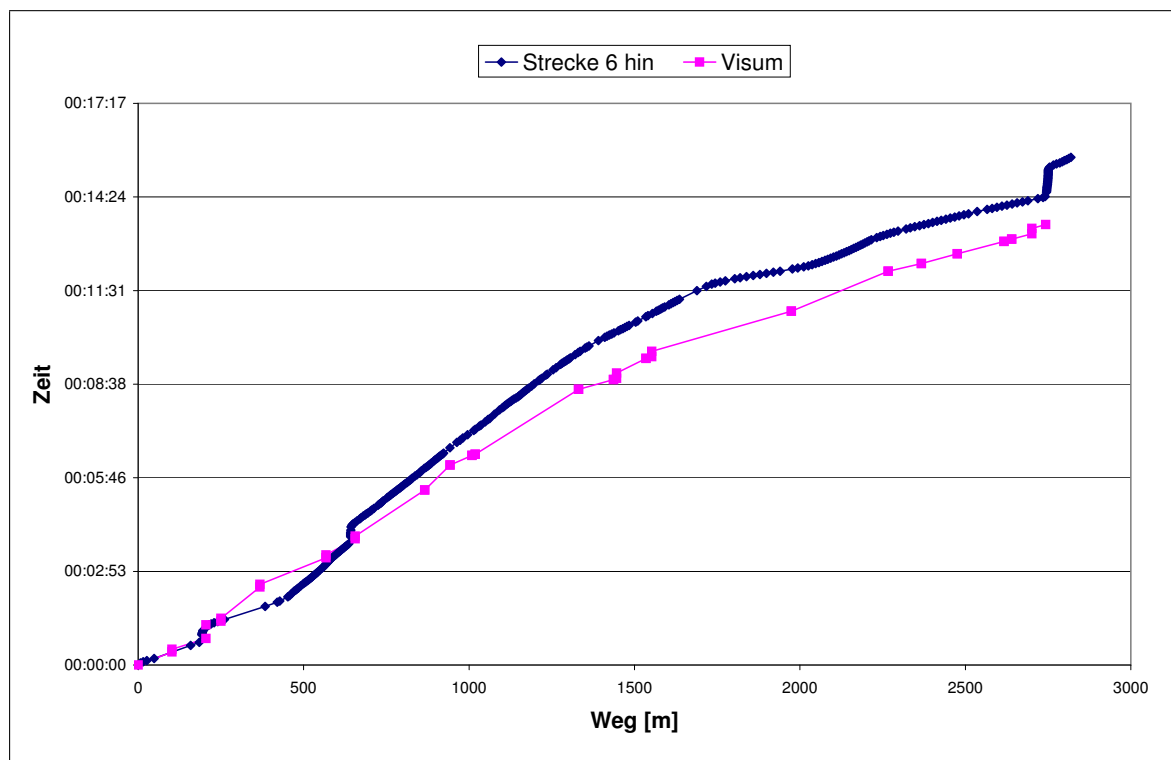
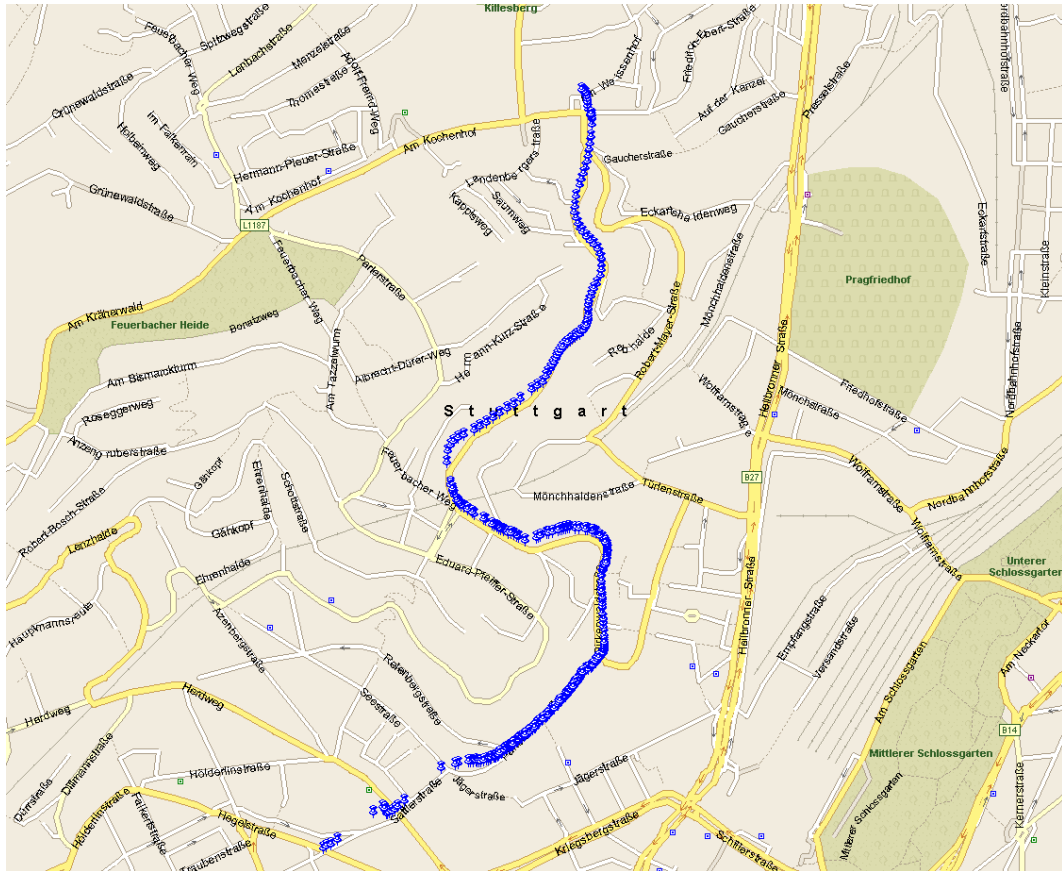


Abbildung C.6: Vergleich Fahrzeitprofil Route 6

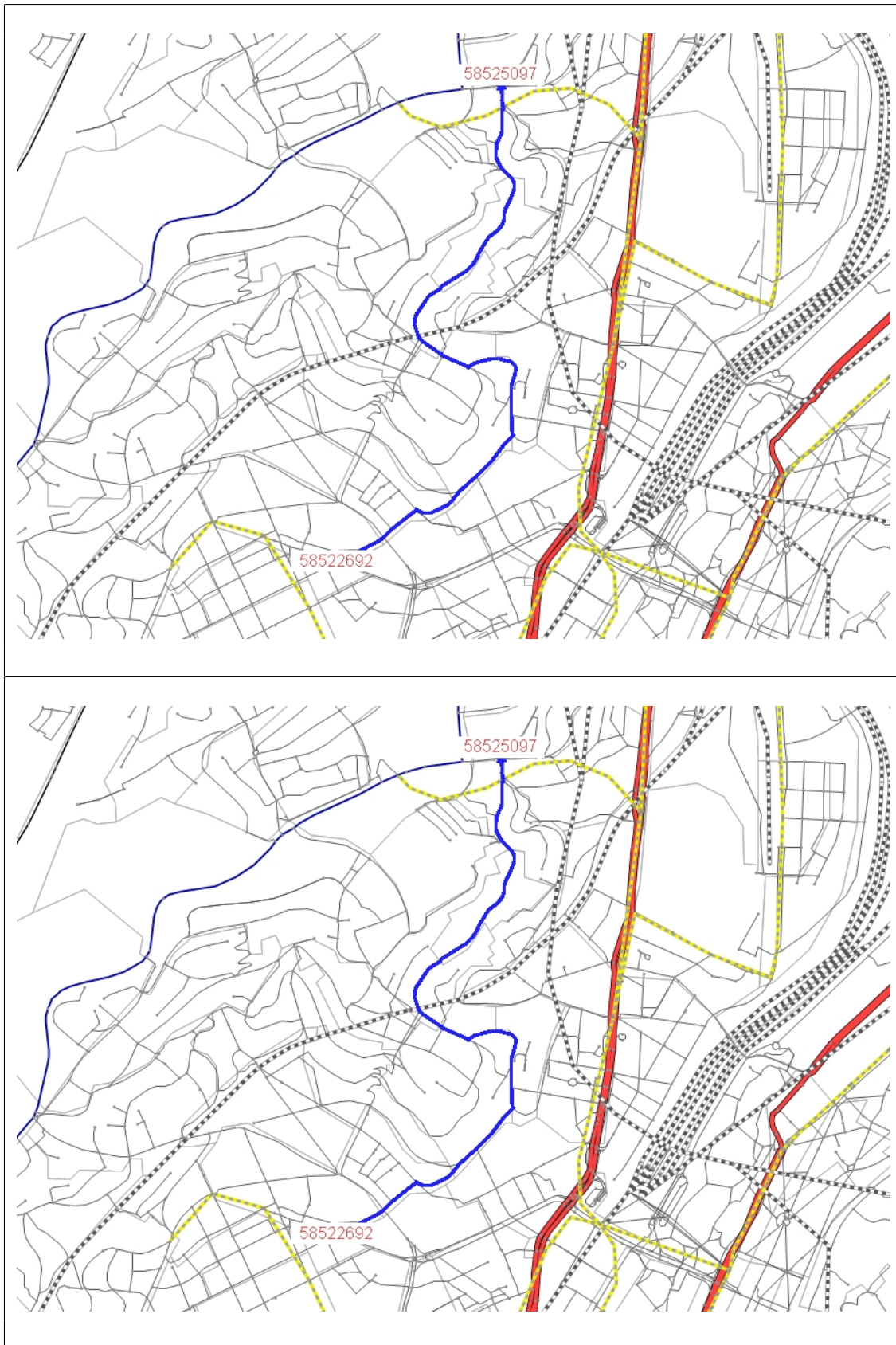


Tabelle C.5: Vergleich Routenwahl Relation 6

C.7 Route 7: Berliner Platz - Marienplatz

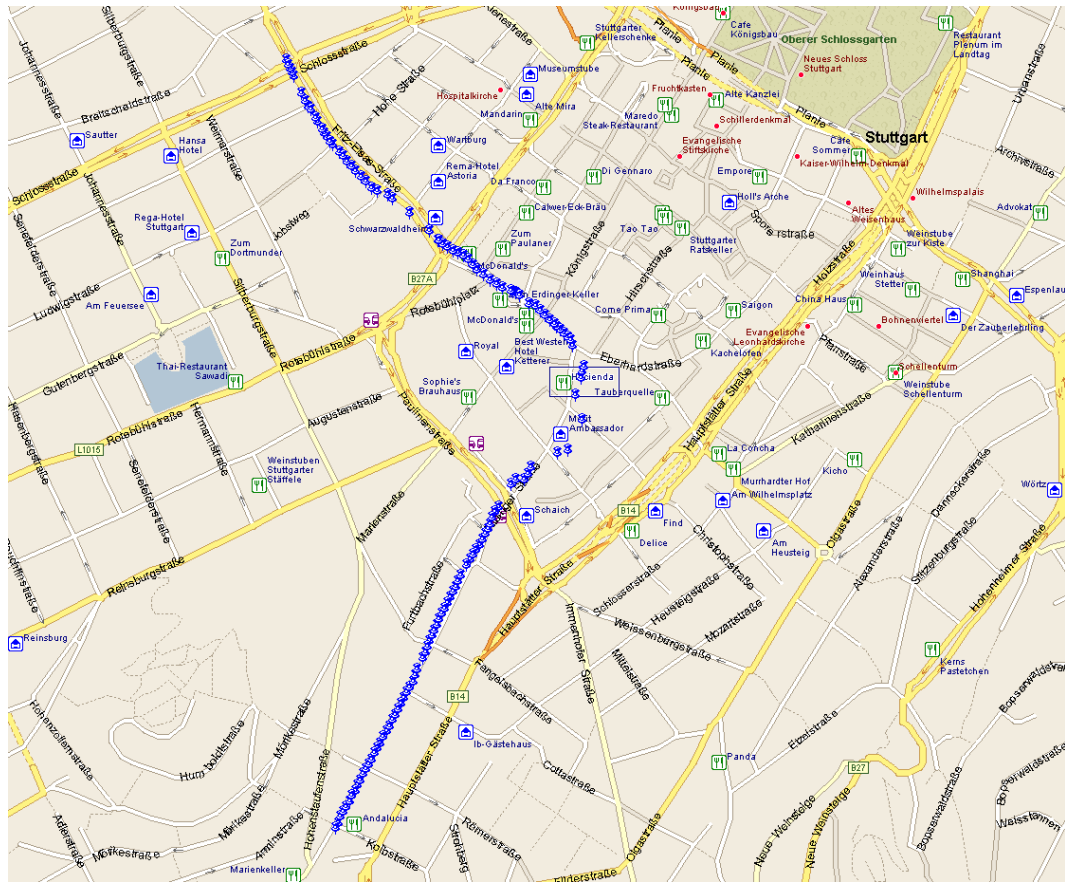


Abbildung C.7: Vergleich Fahrzeitprofil Route 7

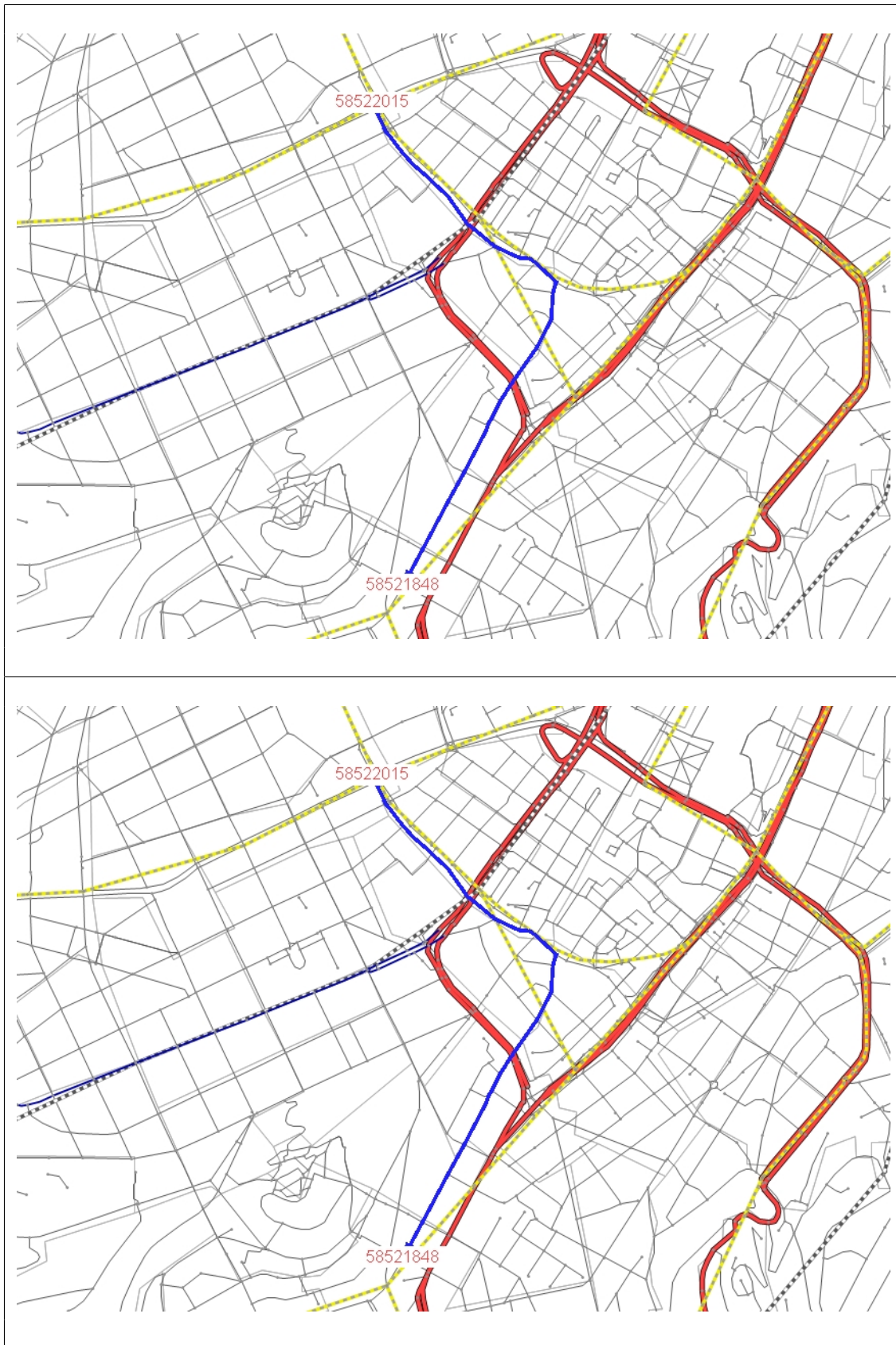


Tabelle C.6: Vergleich Routenwahl Relation 7

C.8 Route 8: Ameisenbergstraße - Wilhelmsplatz

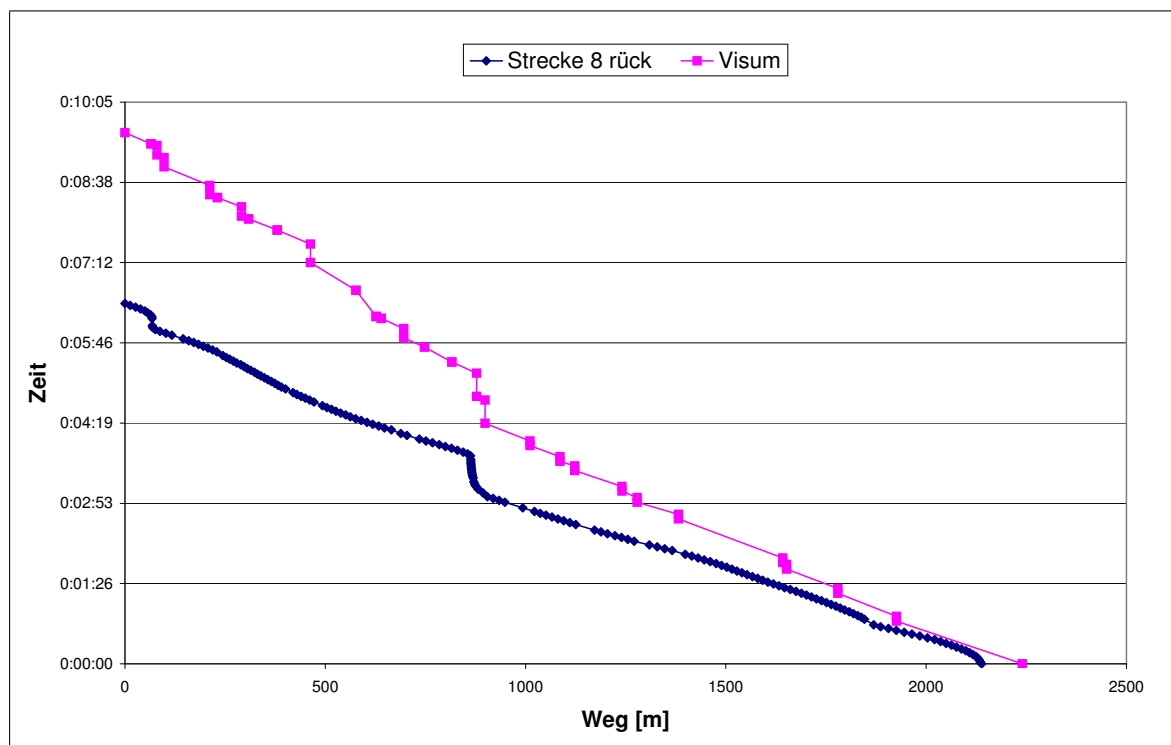
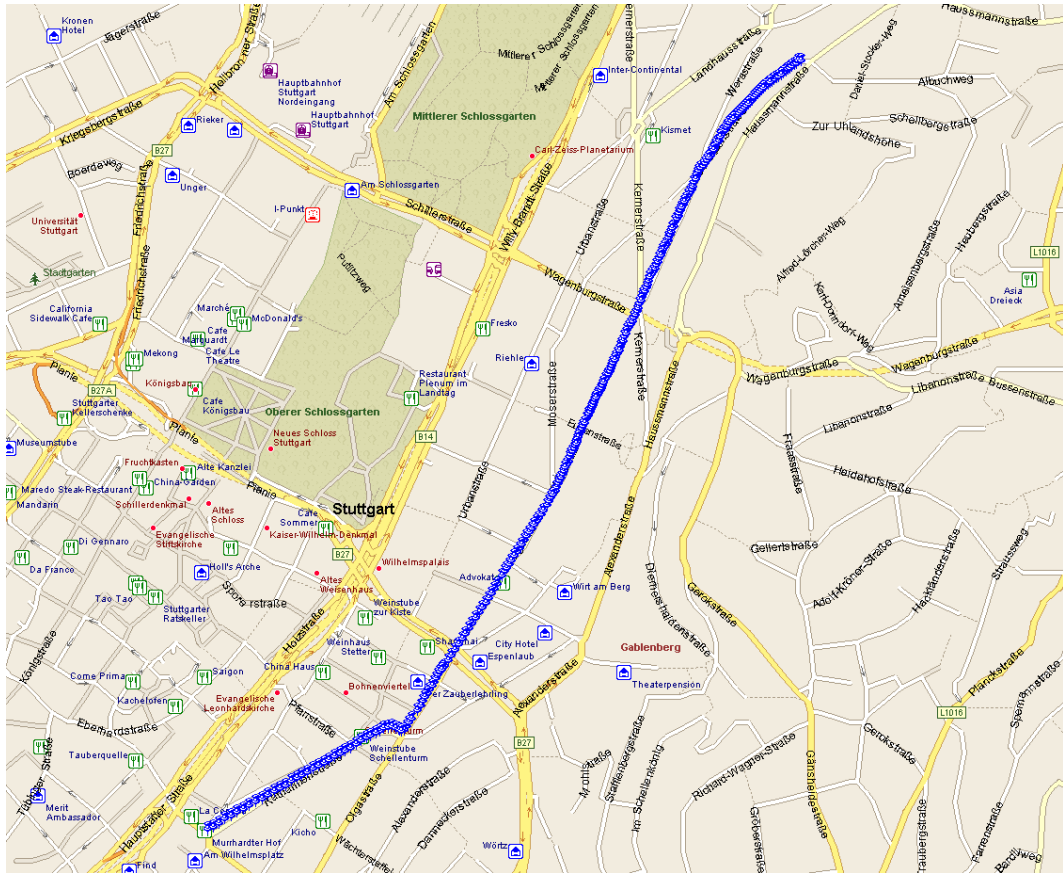


Abbildung C.8: Vergleich Fahrzeitprofil Route 8



Tabelle C.7: Vergleich Routenwahl Relation 8

C.9 Route 9: Nordbahnhof - Schlossgarten

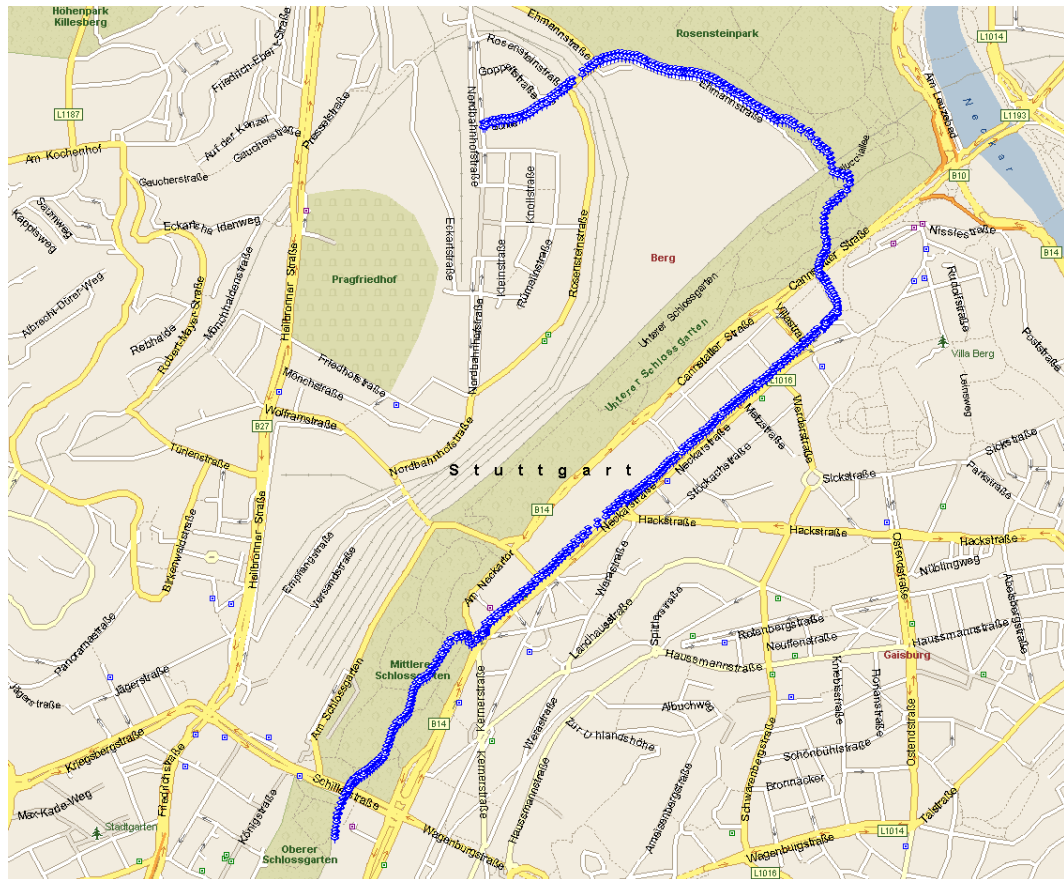


Abbildung C.9: Vergleich Fahrzeitprofil Route 9

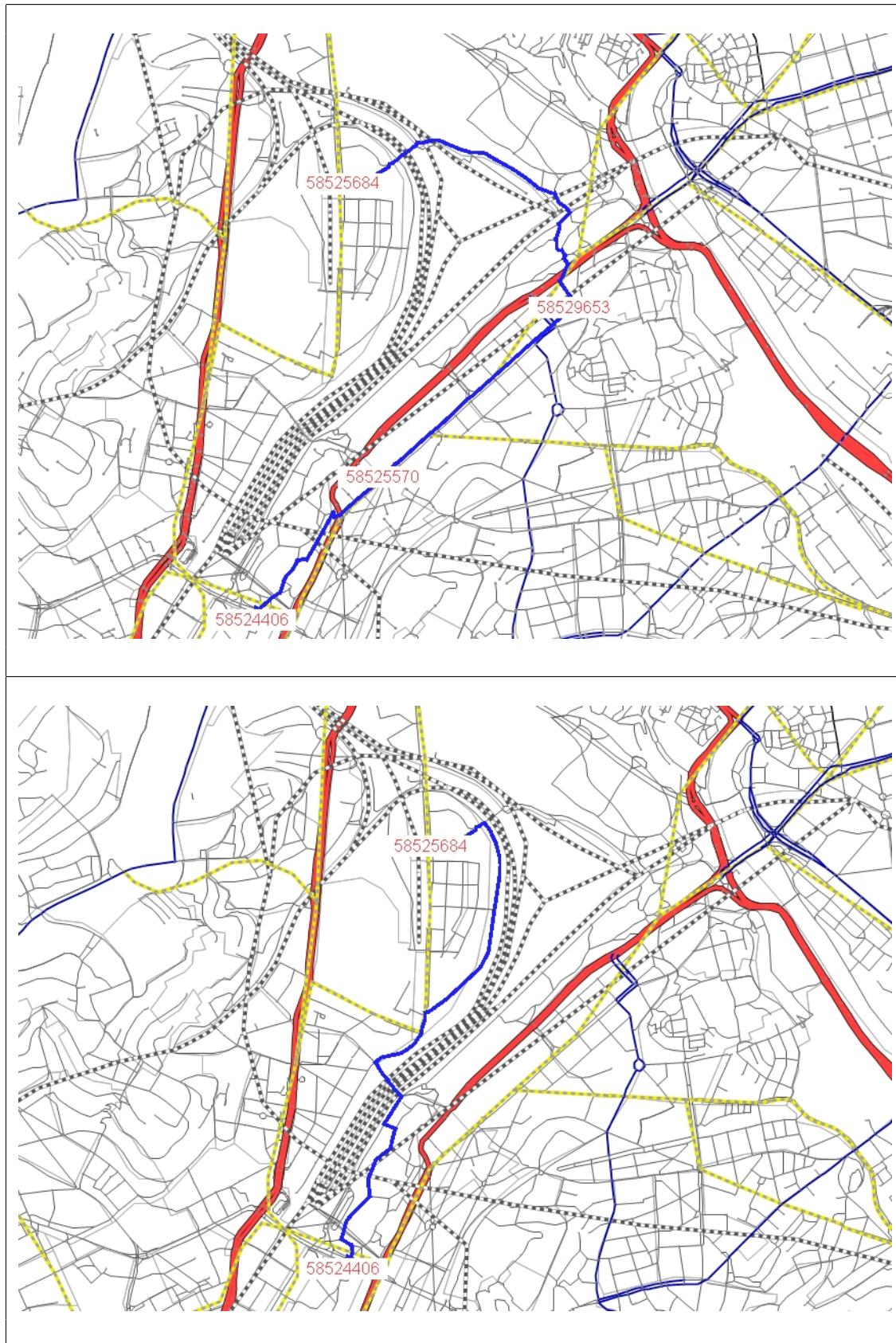


Tabelle C.8: Vergleich Routenwahl Relation 9

Literaturverzeichnis

- [1] Stehzeuge
Hermann Knoflacher
Böhlau Verlag
Wien, 2001
- [2] Radverkehr in der Praxis
Jörg Thiemann-Linden, Peter Gwiasda, Gernot Miller
Entwurf zur BMVBW-Reihe „direkt“
Köln, 2004
- [3] Intergovernmental panel on climate change - Bericht 2007
<http://www.ipcc.ch>
- [4] Routenplaner des „Transport for London“
http://journeyplanner.tfl.gov.uk/user/XSLT_TRIP_REQUEST2?language=en
- [5] Radfahren entgegen der Einbahnrichtung
Landeshauptstadt Stuttgart
Amt für öffentliche Ordnung
Birgit Wöhrle
- [6] Simultane Modellstruktur für die Personenverkehrsplanung
Klaus Walther, Andreas Oetting, Dirk Vallé
Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen
Aachen, 1997
- [7] Grundlagen der Straßenverkehrsplanung
Werner Schnabel / Dieter Lohse
Verlag für Bauwesen
Berlin, 1997
- [8] Radverkehr in Stuttgart - mit System!
ADFC, BUND, NABU, Naturfreunde, VCD
Peter Viebahn
- [9] Radwege in Stuttgart
Landeshauptstadt Stuttgart
Amt für Stadtplanung und Stadterneuerung
Claus Köhnlein
- [10] 3x3 Lawinen - Risikomanagement im Wintersport
Werner Munter
Verlag Pohl & Schellhammer Edition VIVALPIN
Garmisch-Partenkirchen, 2003
- [11] Skripte Verkehrsplanung I/II
Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich
Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart
Stuttgart, 2005

- [12] Amtlicher Stadtplan Stuttgart
Maßstab 1:20000
Landeshauptstadt Stuttgart Stadtmessungsamt 2002
- [13] Freizeit- und Radwegekarte
Maßstab 1:25000
Landeshauptstadt Stuttgart Stadtmessungsamt 2006
- [14] Die falsche Berücksichtigung des induzierten Verkehrs
Gert Marte, August 2001
- [15] Digitaler Radlstadtplan
Johann Patsch, Rolf Annecke
Stadt München, Amt für Gesundheit und Umwelt
<http://maps.geo.arch.tu-muenchen.de/cgi/M3.cgi?rm=Radlstadtplan&map=radlmap.dfo.map>
- [16] Informationssystem zur Fahrradstreckenplanung
Slaven Resić
TU Berlin, Fachbereich Informatik
Diplomarbeit, Berlin, 1999
<http://bbbike.radzeit.de/cgi-bin/bbbike.cgi?begin=1>
- [17] Modell zur Abschätzung des Radverkehrs in der Region Stuttgart
Andreas Hiller
Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart
Studienarbeit, Stuttgart, 1997
- [18] Bewertung der Attraktivität von Radverkehrsanlagen
Dankmar Alrutz, Wolfgang Bohle, Elke Willhaus
Bundesanstalt für Straßenwesen
Bergisch Gladbach, 1998
- [19] Nutzerbasierte Adaptation des Fahrradrouutenplanungsprozesses im Internet
Katrín Stroemer
Institut für Geoinformatik und Fernerkundung der Universität Osnabrück
Zeitschrift für Geoinformationssysteme, Ausgabe 9/2006
- [20] Wikipedia
<http://www.wikipedia.org>
- [21] Visum 9.44
Copyright PTV AG
- [22] L^AT_EX- MikTeX 2.5
L^AT_EX- TeXnic Center 1 Beta 7.01
- [23] Microsoft Excel 2000
Copyright Microsoft Corporation
- [24] Microsoft Access 2000
Copyright Microsoft Corporation
- [25] Microsoft MapPoint 2004
Copyright Microsoft Corporation

Abbildungsverzeichnis

1.1	Wilhelmsplatz und Rotebühlplatz	1
1.2	Hasenbergstraße und Hauptbahnhof	2
2.1	CO ₂ -Konzentration in der Atmosphäre [3]	5
2.2	Rosensteinpark und Nordbahnhofstraße	6
2.3	Beispiel Routenplaner London [4]	8
3.1	Einbahnstraßen und Fußgängerzone	11
3.2	Staffel und Fußgängerzone	11
3.3	Abbiegebeziehungen an Knotenpunkten	12
3.4	Kreuzung am Neckartor	13
4.1	Zeit-Weg-Diagramm	16
4.2	Zusammenhang Steigung - Geschwindigkeit	17
4.3	Wolframstraße und Stuttgarter Westen	18
4.4	Einfluss der Geschwindigkeit im Kfz-Verkehr	19
4.5	Einfluss der Verkehrsstärke im Kfz-Verkehr	20
4.6	Kriterium zur Anlage von Radwegen	21
4.7	Radfahrstreifen und Bordsteinradweg	22
4.8	Radfahrstreifen und linker Radweg	23
4.9	Flussdiagramm zur Wirkung straßenbegleitender Radwege auf den Widerstand	24
5.1	Spezielle Strecken und Abbiegebeziehungen	25
5.2	Alternative Wege durch eine stochastische Umlegung	26
5.3	Vergleich Modell - Realität	28
6.1	Radweg in Fußgängerzone und Stellplätze für Berufspendler	30
6.2	Umlegung 5% des Pkw-Verkehrs	32
C.1	Befahrung Route 3	49
C.2	Vergleich Fahrzeitprofil Route 1	50
C.3	Vergleich Fahrzeitprofil Route 2	52
C.4	Vergleich Fahrzeitprofil Route 4	54
C.5	Vergleich Fahrzeitprofil Route 5	56
C.6	Vergleich Fahrzeitprofil Route 6	58
C.7	Vergleich Fahrzeitprofil Route 7	60
C.8	Vergleich Fahrzeitprofil Route 8	62
C.9	Vergleich Fahrzeitprofil Route 9	64

Tabellenverzeichnis

5.1	Vergleich von vier alternativen Routen	27
6.1	Kandidaten für Zone-30	31
A.1	Eingefügte und geänderte Strecken	34
A.2	Geöffnete Einbahnstraßen	37
A.3	Falsche geöffnete Einbahnstraßen	37
A.4	Geöffnete Fußgängerzonen	37
C.1	Vergleich Routenwahl Relation 1	51
C.2	Vergleich Routenwahl Relation 2	53
C.3	Vergleich Routenwahl Relation 4	55
C.4	Vergleich Routenwahl Relation 5	57
C.5	Vergleich Routenwahl Relation 6	59
C.6	Vergleich Routenwahl Relation 7	61
C.7	Vergleich Routenwahl Relation 8	63
C.8	Vergleich Routenwahl Relation 9	65