

Energieorientierte Straßennetzbewertung für Routensuchverfahren

DISSERTATION

eingereicht an der
Technischen Universität Graz
Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

Zur Erlangung des Grades
Doktor der Technischen Wissenschaften

vorgelegt von
Karin Kraschl-Hirschmann
geboren am 29. Jänner 1982 in Feldbach, Österreich

Betreuer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf, Technische Universität Graz
Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch, Technische Universität München

Mündliche Prüfung: 22. 3. 2013

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	vii
Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Einleitung und Motivation	3
1.1 Zielsetzung und Abgrenzung des Themengebietes	5
1.2 Inhalt und Aufbau der Arbeit	6
2 Grundlagen und Begriffe	7
2.1 Eco-Driving und Eco-Routing	7
2.2 Verkehrsmodellierung und Netzrepräsentation	11
2.3 Physikalische Zusammenhänge der Fahrwiderstände	14
2.4 Leistungsbedarf und Energiebedarf	17
3 Analyse des Fahrverhaltens und der Energieaufbringung	19
3.1 Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten	19
3.2 Fahrverhaltensmuster auf Strecken	20
3.2.1 Kenngrößen zur Untersuchung von Fahrzyklen	21
3.2.2 Studien zur Bildung von künstlichen Fahrzyklen	23
3.2.3 Zusammensetzung von Fahrverhaltensmustern	25
3.3 Fahrverhaltensmuster bei Abbiegevorgängen	26
3.4 Alternative Antriebskonzepte und Fahrverhalten	29
3.5 Einflussfaktoren auf Energiebedarf	31
3.5.1 Einflüsse durch den Umgebungszustand	32
3.5.2 Einflüsse durch das Fahrzeug	36
3.5.3 Einflüsse durch den Fahrer	36
3.5.4 Einflüsse durch das Verkehrswegenetz	37
3.6 Zusammenfassung der Einflussfaktoren	39
4 Energiebedarf als Gewichtungsgröße	41
4.1 Verfahren zur Streckenbewertung	44
4.1.1 Untersuchung des Fahrverhaltens auf Strecken	45
4.1.2 Verwendung von realen Fahrzyklen	45

4.1.3	Mikroskopische Verkehrsflusssimulation	46
4.1.4	Modellkalibrierung für energierelevantes Fahrverhalten	47
4.1.5	Beschreibung der Simulationsumgebung zur Datengenerierung	49
4.2	Verfahren zur Bewertung von Abbiegerelationen	50
4.2.1	Untersuchung des Fahrverhaltens auf Abbiegern	51
4.2.2	Beschreibung der Messumgebung	51
4.3	Datenanalyse und Entwicklung von Schätzfunktionen	54
4.3.1	Datenauswertung zur Bewertung von Strecken	54
4.3.2	Datenauswertung zur Bewertung von Abbiegebeziehungen	63
4.4	Zusammenfassung zur Bewertung der Netzkomponenten	69
5	Validierung und Anwendung	73
5.1	Validierung der Bewertungsmethodik	73
5.1.1	Streckenabschnitte Stadtautobahn (Streckentyp 10)	73
5.1.2	Streckenabschnitte Hauptstraße (Streckentyp 20) inkl. Knotenüberfahrt . .	79
5.1.3	Streckenabschnitte Verteilerstraße (Streckentyp 30) inkl. Knotenpunkt . .	84
5.1.4	Streckenabschnitte Sammelstraßen (Streckentyp 40) inkl. Knotenpunkt . .	91
5.1.5	Wohnstraße (Streckentyp 50)	95
5.2	Zusammenfassung und Diskussion der Validierung	95
5.3	Verwendung der Bewertungsmethodik bei städtischen Verkehrsnetzen	95
6	Zusammenfassung und Diskussion	99
A	Eckdaten zu den Simulationen der Streckentypen	103
B	Funktionen von HBEFA-Daten	109
C	Auswertung der Abbiegebeziehungen	117
D	Codierungskatalog zur Bewertung eines Netzgraphen	123
	Literaturverzeichnis	125

Abbildungsverzeichnis

2.1	Abstrakte Darstellung eines Straßennetzes	12
2.2	Widerstandsfunktionen in Abhängigkeit des Auslastungsgrades	13
2.3	Energiebedarfsanteile zur Überwindung der Fahrwiderstände	16
2.4	Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit der Zeit und des Weges	18
3.1	v(t)-Diagramm der Zyklen NEDC und FTP75 und einer realen Fahrt	24
3.2	Ergebnisfahrt am Rollenprüfstand	25
3.3	Fahrmodieinteilung von NEDC und realem Fahrverlauf	26
3.4	Fahrmodi von Abbiegevorgängen	28
3.5	Energiebedarf von Fahrverläufen in Abhängigkeit des zurückgelegten Weges	33
3.6	Energiebedarf von Fahrverläufen in Abhängigkeit der Tageszeit	34
3.7	Vergleich des Energiebedarfs bei Streckensteigung und Gefälle	37
4.1	Schematische Darstellung der Gewichtungsmethodik	43
4.2	Eingrenzung eines Abbiegevorganges	53
4.3	Darstellung des hohen Datenrauschens anhand der Beschleunigungsanteile	56
4.4	Auswirkungen der Bandbreitenwahl des Kernelschätzers	58
4.5	Schätzfunktionen der Cruisinganteile des Streckentyps 30	60
4.6	Schätzfunktionen der Beschleunigungsraten des Streckentyps 30	61
4.7	Schätzfunktionen der Verzögerungsraten des Streckentyps 30	62
4.8	Geschwindigkeit ab HL beim Linksabbiegen (LSA) und Linkseinbiegen (ohne LSA)	64
4.9	Reisezeit ab HL bei Abbiegemanövern an LSA	65
4.10	Reisezeit beim Linksabbiegen (LSA) und Linkseinbiegen (ohne LSA)	67
4.11	Geschwindigkeit beim Linksabbiegen (LSA) und Linkseinbiegen (ohne LSA)	68
5.1	Kennzahlen zu Validierungszyklen für Streckentyp 10	75
5.2	Streckentyp 10: Vergleich der EEA- und PHEM-Ergebnisse	76
5.3	Streckentyp 10: Q-Q Plots des Vergleiches der EEA- und PHEM-Ergebnisse	77
5.4	Streckentyp 10: Bland-Altman Plots der EEA- und PHEM-Ergebnisse	78
5.5	Kennzahlen zu Validierungszyklen für Streckentyp 20	79
5.6	Streckentyp 20: Vergleich der EEA- und PHEM-Ergebnisse	81
5.7	Streckentyp 20: Q-Q Plots der Ergebnisse für Streckenbefahrung und Abbiegema- növer inkl. Zuschlag	82

5.8	Streckentyp 20: Bland-Altman Plots für Streckenbefahrung und Abbiegemanöver inkl. Zuschlag	83
5.9	Kennzahlen zu Validierungszyklen für Streckentyp 30	84
5.10	Streckentyp 30: Vergleich der EEA- und PHEM-Ergebnisse	86
5.11	Streckentyp 30: Q-Q Plots des Vergleiches für Streckenbefahrung und Abbiegema- növer inkl. Zuschlag	87
5.12	Streckentyp 30: Bland-Altman Plots für Streckenbefahrung	88
5.13	Streckentyp 30: Bland-Altman Plots für Streckenbefahrung und Abbiegemanöver	89
5.14	Streckentyp 30: Bland-Altman Plots für Streckenbefahrung und Abbiegemanöver inkl. Zuschlag	90
5.15	Kennzahlen zu Validierungszyklen für Streckentyp 40	91
5.16	Streckentyp 40: Vergleich der EEA- und PHEM-Ergebnisse	92
5.17	Streckentyp 40: Q-Q Plots des Vergleiches für Streckenbefahrung und Abbiegema- növer inkl. Zuschlag	93
5.18	Streckentyp 40: Bland-Altman Plot der EEA- und PHEM-Ergebnisse	94
5.19	Darstellung der Streckentypen am Wiener Straßennetz	97
A.1	Verteilungsfunktionen der Simulationen für Streckentyp 10	104
A.2	Geschwindigkeitsverteilungen für Streckentyp 10	104
A.3	Verteilungsfunktionen der Simulationen für Streckentyp 20	105
A.4	Geschwindigkeitsverteilungen für Streckentyp 20	105
A.5	Verteilungsfunktionen der Simulationen für Streckentyp 30	106
A.6	Geschwindigkeitsverteilungen für Streckentyp 30	106
A.7	Verteilungsfunktionen der Simulationen für Streckentyp 40	107
A.8	Geschwindigkeitsverteilungen für Streckentyp 40	107

Tabellenverzeichnis

3.1	Kenngrößen des Fahrverhaltens zur Kategorisierung von Fahrmustern	23
3.2	Definitionen der Fahrmodi	25
3.3	Kenngrößen der Fahrzyklen unterschiedlicher Tageszeiten	33
3.4	Einteilung des Verkehrszustandes aufgrund des Auslastungsgrades	35
3.5	Durchschnittliche Verbrauchswerte der Nebenverbraucher	35
3.6	Energiebedarfswerte je Fahrzeugklasse (Dieselfahrzeug)	36
3.7	Definierte Streckentypen für Untersuchung	38
3.8	Rangdefinition von Abbiegebeziehungen	39
3.9	Parameter zur Energiebedarfsberechnung	39
4.1	Energiebedarf bei verschiedenen Fahrmodi	44
4.2	Simulationen von verschiedenen Streckentypen	50
4.3	Zeitliche Beschleunigungsanteile während des Abbiegevorganges	66
4.4	Ergebnisse der Datenanalyse zur Bewertung von Strecken	70
4.5	Ergebnisse der Datenanalyse zur Abbiegerbewertung an Knotenpunkten	71
5.1	Übersicht der Validierungsstrecken für Streckentyp 10	74
5.2	Übersicht der Validierungsstrecken für Streckentyp 20	79
5.3	Übersicht der Validierungsstrecken für Streckentyp 30	84
5.4	Übersicht der Validierungsstrecken für Streckentyp 40	91
5.5	Bestimmung der Streckentyp für Wien	97
6.1	Übersicht von möglichen Anwendungsgebieten und Anforderungen	100
A.1	Allgemeine Simulationskonfigurationen	103
A.2	Eckpunkte der untersuchten Strecken zu Streckentyp 10	104
A.3	Eckpunkte der untersuchten Strecken zu Streckentyp 20	105
A.4	Eckpunkte der untersuchten Strecken zu Streckentyp 30	106
A.5	Eckpunkte der untersuchten Strecken zu Streckentyp 40	107
B.1	Regressionsergebnisse der HBEFA-Daten für Streckentyp 10	112
B.2	Regressionsergebnisse der HBEFA-Daten für Streckentyp 20	113
B.3	Regressionsergebnisse der HBEFA-Daten für Streckentyp 30	114
B.4	Regressionsergebnisse der HBEFA-Daten für Streckentyp 40, Gesamt	115
B.5	Regressionsergebnisse der HBEFA-Daten für Streckentyp 50, Gesamt	116

TABELLENVERZEICHNIS

C.1 Übersicht der Messungen zu Abbiegerelationen	117
C.2 Verwertbare Abbiegerelationen ohne Störeinflüsse	118

Abkürzungsverzeichnis

Allgemeine Abkürzungen

BEV	Battery Electric Vehicle; batteriebetriebenes Elektrofahrzeug
BPR	Bureau of Public Roads
C2X	Car2X; Kommunikationskanal von oder zu Fahrzeugen
CADC	Common Artemis Driving Cycles
CMEM	Comprehensive Modal Emission Model
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO₂	Kohlenstoffdioxid
EEA	Energy Estimation Algorithm
eFahrzeug	elektrisch betriebenes Fahrzeug
EU	Europäische Union; European Union
FCHEV	Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle; Brennstoffzellenfahrzeug
FFE	Fahrer-Fahrzeug-Einheit
FTP	Federal Test Procedure
GIP	Graphenintegrationsplattform
GNSS	Global Navigation Satellite System; globales Satellitensystem zur Navigation
GPS	Global Positioning System; satellitengestütztes Navigationsverfahren, globales Positionierungssystem
HC	Kohlenwasserstoff
HEV	Hybrid Electric Vehicle; klassisches Hybridfahrzeug
HVAC	Heating, Ventilation and Air Condition; Heizung, Gebläse und Klimaanlage
ICT/IKT	Intelligent Communication Technologies/Intelligente Kommunikationstechnologien
ITS	Intelligent Transportation Systems; Intelligente Transportsysteme
IV	Individualverkehr
LOESS	LOcal regrESSion; lokale Regressionsmethode
LOS	Level of Service
LSA	Lichtsignalanlagen
mIV	motorisierter Individualverkehr
NEDC/NEFZ	New European Driving Cycle/Neuer Europäischer Fahrzyklus
NO₂	Luftstickstoff
NO_x	Stickoxid

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

O₂	Sauerstoff
PA/PN	Partikelanzahl
PHEM	Passenger Car and Heavy Duty Emission Modell
PHEV	Plug-in Electric Vehicle; Plug-in-Hybridfahrzeug
PKE	Positive acceleration Kinetic Energy; kinetische Beschleunigungsenergie
PM	Partikelmasse
REEV	Range Extended Electric Vehicle; Elektrofahrzeug mit Reichweitenverlängerung
RMS	Root Mean Square; quadratischer Mittelwert
RPA	Relative Positive Acceleration; positive kinetische Energie
SAPM	Speed Acceleration Probability Matrix; Geschwindigkeit-Beschleunigung-Matrix
THG	Treibhausgasemissionen
USA	United States of America; Vereinigte Staaten von Amerika
v/c-Ratio	vehicles/capacity-Ratio; Auslastungsgrad
VISSIM	Verkehr In Städten SimulationsModell
VLSA	Verkehrslichtsignalanlagen
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr

Abkürzungen in Formeln

α, β	Formparameter bei BPR-Funktion für Zeitzuschlag bei Abbiegevorgängen
Δt	Zeitdifferenz
ρ	Dichte der Luft
A	Stirnfläche des Fahrzeuges
acc, \bar{acc}	Acceleration; positive Beschleunigung, durchschnittliche Beschleunigung
acc_{turn}	Beschleunigung ab der Knotenpunktseinfahrt
c_w	Luftwiderstandsbeiwert
dec, \bar{dec}	Deceleration; negative Beschleunigung, Verzögerung, durchschnittliche Verzögerung
E	Energie
E	Kantenmenge
e	Kante
E_{acc}	Energiebedarf für Fahrwiderstände während der Beschleunigung
E_{Bed}	Bedarfsenergie der Antriebsräder
E_{cruise}	Energiebedarf für Fahrwiderstände im Cruisingmodus
E_{dec}	Energiebedarf für Fahrwiderstände während der Verzögerung
E_{idle}	Energiebedarf im Fahrzeugstillstand
$E_{linklink}$	Energiebedarfswert eines Abbiegers
E_{link}	Energiebedarfswert eine Strecke (link)
F	Kraft

f_{acc}, f_{dec}	Umrechnungsfaktor für Beschleunigungs-/Verzögerungswert während eines Abbiegevorganges
F_{Bed}	Bedarfskraft der Antriebsräder
F_{Beschl}	Kraft für Beschleunigungswiderstand
$F_{ij,t}$	Verkehrsbeziehung von Quelle i zu Ziel j zum Zeitpunkt t
F_{Luft}	Luftwiderstandskraft
F_{Roll}	Rollwiderstandskraft
F_{Steig}	Kraft für Steigungswiderstand
G	Graph
g	Erdbeschleunigung
K	Knotenmenge
k	Verkehrsdichte
m	Fahrzeugmasse
$m_{inertia}$	Massenträgheitsfaktor
P	Leistung
p	Steigung
p_{acc}	zeitlicher Anteil im Beschleunigungsmodus
P_{Bed}	Leistungsbedarf des Fahrzeuges
p_{cruise}	zeitlicher Anteil im Cruisingmodus
p_{dec}	zeitlicher Anteil im Verzögerungsmodus
p_{idle}	zeitlicher Anteil im Stillstand
psi	Abbiegewinkel
q, q_{max}	Verkehrsstärke, maximale Verkehrsstärke (Kapazität)
$R_{R0}, R1$	Rollwiderstandsbeiwerte
s	Standardabweichung
s	Strecke
t_{acc}, t_{dec}	Zeitbedarf für Beschleunigung/Verzögerung während eines Abbiegevorganges
t_{turn}	Zeitbedarf ab der Knotenpunkteinfahrt
$t_{zuschlag}$	belastungsabhängiger Zeitzuschlag bei Abbiegevorgängen
u, v	Bezeichnung von Knotenpaare in Graphen
$v, \bar{v}, \bar{v}_{run}, \hat{v}$	Geschwindigkeit, durchschnittliche Geschwindigkeit, ohne Stillstand, Maximalgeschwindigkeit
v_{nach}	Geschwindigkeit der nach-Strecke
v_{turn}	Geschwindigkeit ab der Knotenpunkteinfahrt (Abbiegekurve)
v_{von}	Geschwindigkeit der von-Strecke
$w(e)$	Gewichtung einer Kante
$W(P_{od})$	gesamte Gewichtung (Widerstand) eines Weges

Benutzte Software und Equipment

GPS-Receiver	Racelogic Video Box Pro 10Hz Datenlogger
Statistik	GNU R 2.14.1
Validierung	PHEM version 11.2

Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt eine Methode zur schnellen und genauen Energiebedarfsschätzung vor, welche für die Gewichtung der Strecken und der Abbiegebeziehungen eines Straßengraphen herangezogen werden kann. Diese generierten Bewertungsinformationen können aktuelle Verkehrs- und Wetterzustände einbeziehen und als Grundlage für on-board Navigationssysteme und Routenplaner verwendet werden. Damit ist es möglich, dem Fahrzeuglenker die energieeffizienteste Route vorzuschlagen.

Für die Entwicklung der Schätzfunktionen wurden unterschiedliche Verkehrsflussmodelle aufgebaut und hinsichtlich der energierelevanten Kenngrößen, wie Beschleunigung und Verzögerung von Fahrzeugen, kalibriert. Die Ergebnisse der Simulationen (sekündliche Fahrverläufe) wurden nach Streckentyp und Auslastungsgrad kategorisiert und zeigten realitätsgetreue Fahrverhaltensmuster.

Die Methode basiert auf der Annahme, dass der Energieverbrauch von Fahrzeugen direkt im Zusammenhang mit den verschiedenen Fahrmodi (Beschleunigung, Verzögerung, Cruising, Stillstand) und den dabei auftretenden Fahrwiderständen steht. Der zeitliche Anteil jedes Fahrmodus, aber vor allem die Stärke der Beschleunigungsraten, haben die größten Auswirkungen auf den Energieverbrauch. Zusätzlich ist die Kenntnis über die Streckengeometrie von besonderer Wichtigkeit, damit die Fahrwiderstände zur Überwindung einer Streckensteigung berücksichtigt werden können.

Die Verwendung dieser Bewertung des Straßennetzes liefert einen Beitrag zur intelligenten Erweiterung der Nutzung von Fahrerassistenzsystemen. Beispielsweise können automatische Geschwindigkeitskontrollsysteme diese Basisdaten für eine vorausschauende Fahrweise verwenden. Ebenso unterstützen die bewertenden Straßenkomponenten den Einsatz von Range Extendern in Hybridfahrzeugen, um den Einsatz von Lade- und Entladeprozessen der Batterien effizienter zu gestalten.

Generell werden Fahrzeuge mit neuen Antriebskonzepten diese Kartengrundlage mit energierelevanten Informationen benötigen, um den Energieverbrauch so gering wie möglich zu halten.

Diese Methode nutzt die ständige Weiterentwicklung von C2X-Kommunikation, um somit den Applikationen die entsprechend aktuellen Informationen bereitstellen zu können. Unter Einbeziehung von Echtzeit-Verkehrslagedaten, kombiniert mit Wetterdaten, verwendet diese Bewertungsmethode aktuelle Informationen und bringt einen wesentlichen Mehrwert für verschiedene ITS-Anwendungen.

Abstract

This thesis presents an approach for calculating energy consumption, based on the actual energy needed to overcome the driving resistance for each link, and turn relation using current link travel speeds and v/c -ratios. The calculated energy information is used as cost values for links and turns within a graph for road network. The proposed method can be embedded in routing algorithms for on-board navigation systems, as an additional basic information in the route algorithm's generalized cost function, to provide drivers the most energy-efficient route.

For calculating the weighting functions, different microscopic traffic flow models were developed and the energy relevant parameters, as acceleration and deceleration rates, were calibrated. The microscopic data output contains trajectory data of each individual vehicle, such as location and speed over time, in a 1Hz resolution, and is categorized according to road types and v/c -ratios, and represent realistic driving patterns.

The proposed method is based on the concept that vehicle energy consumption is directly related to the driving phase acceleration, deceleration, cruising and idling. The duration of each driving phase depends on driver behavior, trip purpose and travel conditions. In order to estimate energy consumption most accurately these driving phases need to be known, and additional data consists of network information such as roadway gradients and road type.

Driver assistance systems as adaptive speed control can use these road network weights as basic information, to drive in a sustainable way. In the same way the activation of range extender in hybrid vehicles can be remodeled to employ the charging process of batteries more efficiently.

Vehicles with new drive trains will need this weight of energy relevant information to minimize the energy consumption, especially with respect to electrical vehicles. This proposed method uses further development of C2X communication technologies, which provides the possibility to include the current traffic and weather information in real time.

Einleitung und Motivation

In der Europäischen Union steigt der Energieverbrauch im Verkehrsbereich rasanter als in anderen Sektoren. Durch die hohe Nachfrage nach Beförderungsleistung verursacht der Verkehrssektor in Österreich bereits die meisten Treibhausgas-Emissionen¹ (THG-Emissionen) von knapp 27% des gesamten THG-Emissionsaufkommens (Umweltbundesamt 2012) und verzeichnet den stärksten Anstieg um 60% (8,4 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente) seit 1990.

Durch die Verknappung der fossilen Energieträger und der Produktion von Emissionen wird eine bewusste und effiziente Umgangsweise mit Energie benötigt. Dabei lässt sich das größte Reduktionspotential des Energieverbrauchs im Straßenverkehr vermuten, was neue Ansätze zum effizienteren Treibstoffverbrauch und zur geringeren Emissionsproduktion fordert. Technologische Fortschritte in der Fahrzeugindustrie, Treibstoffentwicklung, Flottenzusammensetzung, neue Ansätze bei Verkehrsleitsystemen, aber auch Maßnahmen zur Beeinflussung des Fahrverhaltens werden unternommen.

Faktoren der modernen Mobilität

In Anbetracht der dominierenden Gesundheits- und Klimadiskussionen durch verkehrsbedingte Emissionen wird eine Bewusstseinsänderung der Mobilität prognostiziert. Dabei spielen die Elektrifizierung des Individualverkehrs mit den fahrzeugseitigen Komponenten, die Weiterentwicklung von konventionellen Fahrzeugkonzepten, aber auch Maßnahmen zur Attraktivierung des öffentlichen (ÖV) und zur Steuerung des motorisierten Individual-Verkehrs (mIV) eine wesentliche Rolle.

Bei Fahrzeugantrieben ist ein Technologiewechsel im Gange und Hybrid- und Elektrosysteme sowie Batterie- und Brennstoffzellen-Technologien werden als bedeutende Produktinnovationen

¹Bei der vollständigen Verbrennung von Kraftstoffen in Fahrzeugmotoren (Kohlenwasserstoffe: Benzin, Diesel, Gas) werden Kohlendioxid (CO₂) und Wasserdampf (H₂O) gebildet. Luftstickstoff (N₂) und der überschüssige Sauerstoff (O₂) bleiben unverändert. In der Realität ist die Verbrennung jedoch unvollständig, was zu HC-, Partikel- und CO-Emissionen führt. Die hohen Verbrennungstemperaturen verursachen, dass der Luftstickstoff zu NO und NO₂ oxidiert (NO_x). Neben den verbrennungsbedingten Luftschadstoffen entstehen auch noch Schadstoffemissionen aus der Verdunstung (Kraftstoff) sowie Feinstaubemissionen aus Brems-, Abriebs- und Aufwirbelungsvorgängen. In dieser Arbeit werden unter dem Begriff *THG-Emissionen* oder *Emissionen* nur die verbrennungsbedingten Partikel-Emissionen verstanden.

in den nächsten fünf Jahren bezeichnet. Die Antriebsvarianten werden deshalb mittelfristig signifikant steigen und viele unterschiedliche Fahrzeugkonzepte im Straßenverkehr zur Folge haben.

Integrierte Mobilitätslösungen, die den innerstädtischen Bereich versorgen und dynamisch anpassungsfähig sind, sollten zukünftig das oberste Ziel sein. Dabei ist klar, dass die wachsenden innerstädtischen Verkehrsströme nur mit einem Gesamtsystem und einem reibungslosen Zusammenspiel aller Verkehrsmodi bewältigt werden können. Innovative Verkehrsmanagementsysteme sollen zukünftig die Verkehrsmodi auf Straße und Schiene verknüpfen und Informationssysteme werden dem Fahrgast die persönlich effizienteste Reiseroute aufzeigen.

Ebenso wollen Verwaltungsbehörden den Verkehrsfluss in ihren Verantwortungsgebieten beeinflussen und steuern können. Die Tendenz nach der strategischen Routenführung zur Integration aller Verkehrsträger und damit verbundenen Balance der Verkehrsnachfrage und des -angebots aller Verkehrsteilnehmer wird zu beobachten sein. Dieser Ansatz kann nur durch eine zentrale Rechneinheit realisiert werden, um den übergeordneten Gesamtfokus nicht zu verlieren und den Zugang zur flächendeckenden und lückenlosen Informationsbereitstellung zu gewährleisten. Eine beispielhafte Anwendung dafür könnte die temporär aktivierte *Zero-Emission-Zone* in Stadtgebieten sein, wenn relevante Grenzwerte überschritten sind und nur festgelegte Fahrzeugtypen die Berechtigung zur Einfahrt erhalten. Darüber müssen die einzelnen Verkehrsteilnehmer vor und während der Fahrt informiert werden.

Straßenverkehr bleibt unverzichtbar - Beitrag der Verkehrstelematik

Auch wenn sich die persönliche Mobilität zur multimodalen Wegekette entwickelt, wird die Nutzung des PKWs noch lange einen großen Teil des privaten Transportes ausmachen und der Straßenverkehr für den Versorgungs- und Transportdienst eine wesentliche Rolle spielen. Der Logistikbereich ist mit erheblichen Herausforderungen konfrontiert, welche nicht nur die Emissions- und Lärmbeschränkungen im urbanen Bereich, die zukünftige Versorgung von urban angesiedelten Produktionsunternehmen und urbane Nahversorgung betreffen. Auch mit steigenden Kosten für Unternehmen durch die angedachten *Klima-Zertifikate* kann gerechnet werden. Die Lösungen dazu lassen mögliche Veränderungen der Anforderungen durch den Einsatz von elektrifizierten Transportern mit unterschiedlichen Fahrprofilen und Ladebeschränkungen vermuten.

Grundsätzlich benötigen alle zukünftigen Fahrzeuglenker des motorisierten Straßenverkehrs, unabhängig vom Fahrzeugtyp und Einsatzgrund, die Bereitstellung von relevanten Informationen, um ihr Fahrzeug möglichst *energieeffizient* durch das Verkehrsnetz manövrieren zu können. Dabei sind die dynamischen Umfeldgegebenheiten (Verkehrsaufkommen, Streckennetz etc.) und die damit verbundene Routenwahl für einen unterschiedlichen Energieverbrauch einer Wegstrecke ausschlaggebend.

Die individuelle Routenwahl der einzelnen Fahrer wird in der Realität bisher durch subjektive und objektive Aspekte des Verkehrsteilnehmers oder durch fahrzeugseitige Komponenten, wie dem Navigationsgerät beeinflusst. Bei aktuellen Algorithmen des Routings kommen bereits

prognostizierte Reisezeiten der Strecke, Streckenlänge oder Streckengebühren zur Anwendung. Eine Berücksichtigung der Faktoren um den zusätzlichen Aspekt der *Energieeffizienz* für die Routenberechnung anzubieten, ist besonders bei neuen Antriebskonzepten mit unterschiedlichen Bedürfnissen von wesentlicher Bedeutung. Eine Zielfunktion nach der Route mit minimalster Reisezeit oder kürzester Distanz wird dafür nicht mehr ausreichen - ein neuer Ansatz muss gefunden werden.

Deshalb werden in dieser Arbeit die energierelevanten Daten untersucht, die zur Bildung einer Basisplattform, in diesem Fall der Gewichtung von Streckennetzkomponenten, herangezogen werden können. Diese Informationen sollen möglichst unabhängig von Fahrzeugantriebskonzepten generiert werden, um für unterschiedliche Applikationen verwendet werden zu können. Verkehrstelematische Dienste zur Informationsbereitstellung und -übertragung sind dabei ein wesentlicher Kern und ein Schritt in Richtung *effiziente Mobilität*.

1.1 Zielsetzung und Abgrenzung des Themengebietes

Das Forschungsziel dieser Arbeit liegt in der Erstellung einer Gewichtung (Bewertung) der einzelnen Elemente eines routingfähigen Verkehrsgraphen, welche die *Abschätzung des Energiebedarfs für die Befahrung* darstellt. Dabei werden alle relevanten und realistisch verfügbaren Faktoren, die Auswirkungen auf den Energiebedarf haben, berücksichtigt. Mit den dynamischen Eingangsparametern, wie der aktuell möglichen Reisegeschwindigkeit und des Auslastungsgrades der Strecke, werden die Energiebedarfswerte mittels entwickelter Schätzfunktionen differenziert nach Streckentyp errechnet. Die Abbiegebeziehungen werden ebenfalls in Form eines *Energiezuschlages* berücksichtigt.

Für eine weitere Anwendung müssen die Energiebedarfswerte für die Graphenkomponenten Strecke und Knotenpunkt eines Streckennetzes präzise und dynamisch berechnet werden, um aktuelle Zustände einfließen zu lassen. Der Vorteil der Formulierung als Energiewert liegt in der Anwendbarkeit unabhängig vom Fahrzeugantriebskonzept und ermöglicht auf Fahrzeugseite mit Informationen von motorspezifischen Kennwerten eine Erweiterung der Datenbasis um die tatsächlich benötigte Antriebsenergie des Fahrzeuges.

Die Voraussetzung für eine realistische Abbildung ist eine genaue Kenntnis der Fahrverhaltensmuster der Fahrzeuglenker unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen, um diese mit Hilfe von allgemeingültigen Funktionen in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Verkehrsaufkommen zu beschreiben. Wichtig sind dabei die zeitlichen Verschiebungen der einzelnen Fahrmodi (Cruisen, Beschleunigen, Verzögern, Stillstand) und das Ausmaß der Beschleunigungen während der Fahrt. Deshalb werden im Vorfeld Einzeltrajektorien makroskopisch untersucht, um diese Muster und Zusammenhänge zu erkennen und anwenden zu können.

Die Einflussfaktoren für die Berechnung des Energiebedarfs werden hinsichtlich der praktikablen Anwendung berücksichtigt. Es muss schnell und mit den realistisch verfügbaren Informationen

eine Graphenbewertung durchführbar sein. Der Bezug und die Hinweise zur Anwendung als Basisinformation von Routensuchverfahren stellen lediglich die konkreten Anforderungen an die Gewichtung dar, welche auf verschiedene weitere Anwendungen zutrifft. Bei Routensuchverfahren ist beispielsweise besonders, dass übliche Ansätze wie das Verfahren von (Dijkstra 1959) ausschließlich mit positiven Bewertungen arbeiten. Auch haben die Abbiegebeziehungen einen erheblichen Einfluss und sollten berücksichtigt werden. Andere Anwendungsgebiete, wie die Unterstützung von Energierückgewinnung oder Energieeinsatz während der Fahrt, benötigen erweiterte Informationen, wozu in dieser Arbeit zum Abschluss Stellung genommen wird.

Ein neuer Ansatz zur Informationsbereitstellung, beziehend auf die oben diskutierten Punkte des motorisierten Straßenverkehrs ist zu finden, um individuelle Anwendungen damit zu verknüpfen und intelligente Fahrerassistenzsysteme anbieten zu können.

1.2 Inhalt und Aufbau der Arbeit

Die Gliederung der Arbeit besteht im Grunde aus zwei Bereichen:

1. Mikroskopisch: Untersuchung des Fahrverhaltens auf Strecken und Abbiegebeziehungen mit unterschiedlichen Einflussfaktoren
2. Makroskopisch: Abstraktion der Berechnungen für eine allgemein gültige Anwendung (Funktion)

Kapitel 2 beinhaltet Grundbegriffe und Abgrenzungen, die für diese Arbeit verwendet werden. Darin werden sowohl die Unterscheidung zwischen *Eco-Driving* und *Eco-Routing* als auch die physikalischen Grundlagen beschrieben.

Kapitel 3 erörtert die Grundlagen zum Thema Fahrverhalten aus der Fahrzeugtechnik, welche für die Untersuchungen für Fahrten auf Strecken und Abbiegern herangezogen werden.

Kapitel 4 befasst sich mit der tatsächlichen Gewichtungsmethodik hinsichtlich unterschiedlicher Einflussfaktoren. Dafür wurden sowohl reale Feldmessungen durchgeführt als auch mikroskopische Simulationsmodelle aufgebaut. Das Ergebnis umfasst allgemein gültige Funktionen, welche auf einem Netzgraphen anwendbar sind.

In Kapitel 5 werden real gemessene Strecken mit und ohne Abbiegerelationen und Streckenzüge dazu verwendet, um die entwickelte Schätzmethode zur Darstellung des Energiebedarfs als Ergebnis mit den tatsächlich Berechnungen eines mikroskopischen Emissionsmodells zu vergleichen und zu validieren.

Das letzte Kapitel resümiert die Erkenntnisse und Erfahrungen und erteilt Hinweise zur Anwendung.

Grundlagen und Begriffe

Für diese Arbeit wird eine Abgrenzung zu Begriffen anderer wissenschaftlichen Disziplinen getroffen, die Untersuchungen zur Energieeffizienz im Fahrverlauf anstellen und sich vorrangig auf den Bereich der Fahrzeugtechnik zuordnen lassen. Wesentlich ist dabei eine Unterscheidung zwischen *Eco-Driving* und *Eco-Routing* und das Verständnis, welche unterschiedlichen Zugänge diese beiden Verfahren zur Energiebedarfsreduktion im Fahrverlauf verfolgen und welchen positiven Beitrag diese liefern können. Um die Thematik dieser Arbeit in ihrer Ganzheitlichkeit zu verstehen, wird die Graphentheorie und Verkehrsmodellierung, welche zur Abbildung und Bearbeitung des Verkehrswegenetzes dienen, grundlegend erläutert. Auch wird die Basis zur Berechnung der Begriffe *Energie* und *Leistung* gegeben, welche für die weitere Betrachtung der Bewertung des Straßennetzes von Wichtigkeit ist.

2.1 Eco-Driving und Eco-Routing

Untersuchungen haben gezeigt, dass der Kraftstoffverbrauch eines Kraftfahrzeugs für eine Fahrt unter denselben Umfeldbedingungen von verschiedenen Lenkern sehr unterschiedlich ausfallen kann - Schwankungsbreiten von bis zu 20% des Kraftstoffverbrauches aufgrund unterschiedlicher Fahrweisen werden in der Literatur als üblich angenommen. Evans (1979) wies nach, dass eine harmonische Fahrweise, welche abrupte und aggressive Beschleunigungsvorgänge als auch Haltevorgänge vermeidet, eine Kraftstoffeinsparung von 14% ohne erhebliche Erhöhung der Reisezeit zur Folge hat. Waters & Laker (1980) präsentierten den größten Einfluss des Fahrverhaltens in ihren Versuchen - bis zu 50% an Unterschieden des Kraftstoffverbrauches wiesen in dieser Studie die Fahrer bei persönlich eingeschätzter *normaler* Fahrweise auf. Im Zuge dieses Versuchs wurden die Fahrer zusätzlich gebeten möglichst *ökologisch* zu fahren, was eine Reduktion des Kraftstoffverbrauches von bis zu 15% verursachte. Dabei assoziierten die Lenker die *ökologische* Fahrweise mit niedriger Geschwindigkeit. Die Untersuchung von Van der Voort et al. (2001) zeigte ebenfalls auf, dass 15% des Kraftstoffverbrauches auf das individuelle Fahrverhalten zurückzuführen ist. De Vlieger et al. (2000) zeigte mit der Untersuchung einer Testflotte den Einfluss des individuellen Fahrverhaltens, des Streckentyps und des Verkehrsaufkommens auf den Kraftstoffverbrauch und THG-Emissionen. In diesem Versuch wurde sogar bewiesen dass aggressives Fahrverhalten zu einer Erhöhung des Treibstoffverbrauches um bis zu 40% führen kann.

2. GRUNDLAGEN UND BEGRIFFE

In der Veröffentlichung von Hooker (1988) wurden die relevanten Einflüsse auf den Kraftstoffverbrauch genannt: Schaltverhalten des Fahrers, Geschwindigkeitswahl und das Ausmaß der Beschleunigungs- und Verzögerungsraten. Diese Studie listet verschiedene Maßnahmen auf, um das Fahrverhalten mittels Informationskampagnen über ökologische Fahrweisen bis hin zu informativen und/oder intelligenten Fahrerassistenzsystemen zu beeinflussen, um damit den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren. Somit reicht die Spannweite von Informationsbereitstellung, Schulungen bis zu telematischen Diensten und Fahrzeugtechnologien, um eine Kraftstoffeinsparung zu bewirken.

In dieser Arbeit wird unter *Eco-Driving* eine Operation verstanden, die durch fahrzeugseitige Empfehlungen an den Fahrer während der Fahrt oder direkten Eingriffen in die Fahrzeuglenkung zu einem veränderten Fahrverhalten bei der Geschwindigkeits- und Beschleunigungswahl führt. Diese Aktionen haben den Fokus auf eine verbrauchs- und emissionsarme Fahrweise, welche im Grunde ein energieeffizientes Fahrverhalten zur Folge hat. In unterschiedlichsten Arbeiten wurden Algorithmen und Tools entwickelt, um die Auswirkungen der Eco-Driving Maßnahmen zu evaluieren (Van der Voort 2001, Van der Voort et al. 2001). Eine spezifische Methode, die auf das Beschleunigungsverhalten abzielte, stellten Larsson & Ericsson (2009) vor. Dabei wurden die Empfehlungen dem Lenker in Form eines leichten Widerstandes am Gaspedal bei zu aggressiver Beschleunigung vermittelt. Die Studie zeigte eine wesentliche Reduktion von starken Beschleunigungen im gesamten Fahrverhalten, was erhebliche Emissionseinsparungen bewirkte.

In Klunder et al. (2009) werden *Eco-driver Coaching* und *Eco-driver Assistance* als die beiden effektivsten Maßnahmen eines Rankings zur CO_2 Einsparung von 15% bzw. 10% genannt. Dabei wird unter *Assistance* die Bereitstellung der aktuellen Informationen zum Treibstoffverbrauch, der Energieverwaltung im Fahrzeug und der richtigen Gangwahl verstanden. Dafür werden die fahrzeugseitigen Faktoren der Motorleistung und Wirkungsgrade, Fahrzeuggeschwindigkeit und Beschleunigungsrate berücksichtigt. Es werden die Verbrauchswerte kontinuierlich auf einer onboard-Einheit angezeigt und ggf. wird ein Gangwechsel vorgeschlagen. Das *Coaching* hingegen kann die Empfehlungen des *Assistance* mit erweiterten Kartendaten, wie Streckensteigungen, Kurvigkeit, Geschwindigkeitsbeschränkungen, etc. akkurater berechnen. Die Empfehlungen können sich dadurch um optimale Geschwindigkeitsprofile erweitern, um unnötige Beschleunigungs-, Verzögerungs- und Haltevorgänge zu vermeiden.

An der Universität von Kalifornien wurde der Einfluss der gefahrenen durchschnittlichen Geschwindigkeit auf den Treibstoffverbrauch und aufkommenden Schadstoffen untersucht (Servin et al. 2006). Es wurde ein Versuch gestartet, zwei Fahrten zur selben Zeit durchzuführen, wobei einem Fahrer unterschiedliche Geschwindigkeitsempfehlungen für die Fahrt übertragen wurden, dem anderen Fahrer nicht. Die Analyse der GPS-Trajektorien der zwei Fahrzeuge zeigten zwar über die Fahrt eine ähnliche Durchschnittsgeschwindigkeit, jedoch eine Reduktion des Kraftstoffverbrauches vom informierten Fahrer von ungefähr 13%. Mit diesem Versuch wird die allgemeine Meinung unterstützt, dass das Fahrverhalten den Energieverbrauch einer Fahrt bis zu 20% beeinflussen kann.

Bemerkung zur gesamtheitlichen Betrachtung

Aus den Fachdisziplinen der Fahrzeugtechnik sind Untersuchungen für die Analyse der Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch durchgeführt worden. Unterschiedliche Maßnahmen können für die straßenbedingte Emissionsreduktion, abhängig vom Umsetzungshorizont, aufgezeigt werden: Beeinflussung des Fahrverhaltens, Beeinflussung durch intelligente Verkehrssteuerung, Weiterentwicklung der Motor- und Karosserieeffizienz.

Kritisch sollten Eco-Driving Maßnahmen während der Fahrt im Hinblick auf die Auswirkungen auf den Gesamtverkehr hinterfragt werden. Nicht in allen Bereichen bedeuten Empfehlungen zur sparsameren Fahrweise in Form von *Segeln* an einem lichtsignalgesteuerten Knotenpunkt ohne Berücksichtigung des umliegenden Verkehrsaufkommens ein Optimum in der CO_2 -Bilanz für den Gesamtverkehr und die Leistungsfähigkeit der Straßeninfrastruktur.

Anknüpfend an zahlreiche Eco-Driving Studien und Fahrverhaltensempfehlungen von offiziellen Behörden und Fahrerclubs baute Padiadis (2010) eine Verkehrsflusssimulation auf, welche diese Informationen unterschiedlicher Fahrverhaltenscharakteristika gegenüberstellte. Die Simulation von unterschiedlichen Fahrverhaltensweisen in Kombination mit intelligenter Verkehrssteuerung (in diesem Fall der Verkehrssteuerung durch Lichtsignalanlagen [LSA]) lässt ein Einsparungspotential des Kraftstoffverbrauches von bis zu 20% erahnen. Klar wurde jedoch gezeigt, dass sich die Rückstaulängen um ein Vielfaches vergrößerten.

Im Vergleich dazu bedeutet *Eco-Routing* den Vorschlag eines Navigationssystems für eine Route, welche anstatt der üblichen kürzesten oder schnellsten Routen die Treibstoff-effizienteste Route berechnet. Dabei werden die verfügbaren Streckeninformationen wie Länge, Geschwindigkeit also auch Streckensteigung und Kurvigkeit, für die Berechnung berücksichtigt. Bei einer Echtzeit-Anbindung können auch die Informationen zum Verkehrsaufkommen integriert werden. In einer Studie (Ericsson et al. 2006) in Schweden (Lund) wurde das Potential von verbrauchsoptimierter Routenführung im städtischen Gebiet untersucht. Dabei wurden über 15.000 Datensätze von FCD-Fahrzeugen (floating car data) generiert und analysiert. Der Verbrauch bei normalen Verkehrsbelastungen und zu Spitzenzeiten auf den Strecken wurde mit einem Simulationsmodell ermittelt. Die über 100 Quelle-Ziel-Beziehungen wurden hinsichtlich ihres Verbrauchs untersucht. Dabei war zu sehen, dass 46% der Originalrouten nicht der verbrauchsärmsten Route entsprachen. In diesen Fällen kann durch die verbrauchsärmste Route der Kraftstoffverbrauch durchschnittlich um 8,2% gesenkt werden. Ericsson et al. (2006) erstellte mit ihren Untersuchungen Verbrauchsganglinien für die definierten Kartensegmente und zog diese für die Graphenbewertung heran. Weitere Wechselwirkungen zwischen den Streckentypen wurden nicht untersucht.

Erste Studien von Ahn & Rakha (2008) und Frey et al. (2008) zeigten ebenfalls einen signifikanten Unterschied des Treibstoffverbrauches und der Emissionen bei unterschiedlicher Routenwahl der selben Quelle-Ziel-Beziehung. Darin wurden 39 GPS-Profile einer Quelle-Ziel-Beziehung in Virginia, USA, untersucht, welche Routen auf Autobahnen und Alternativrouten auf Bundesstraßen abdeckten. Der Kraftstoffverbrauch wurde ebenfalls mittels Simulation berechnet und es zeigte sich, dass der Kraftstoffverbrauch für verschiedene Fahrzeugtypen zwischen 4 - 6% reduziert werden kann. Der Veröffentlichung ist zu entnehmen, dass für die Untersuchungen eine

geringe, aber signifikante Stichprobe herangezogen wurde. Jedoch ist nicht angegeben, welcher Verkehrszustand bei den einzelnen Fahrten herrschte oder ob die Fahrten zeitgleich durchgeführt wurden. Trotzdem lassen die Ergebnisse den Schluss zu, dass eine Verbrauchsreduzierung auf der Umfahrung wahrscheinlich ist.

Barth et al. (2007) bewies klar, dass die kraftstoffeffizienteste Route nicht gleich die schnellste oder kürzeste Route bedeutet und somit der Kraftstoffverbrauch einer Fahrt von vielen Faktoren abhängig ist und nicht ausschließlich von der Reisegeschwindigkeit.

Algorithmen zur Routenwahl benötigen für die Berechnungen eine Kostenfunktion für jede Strecke (link) im Verkehrsnetz, im üblichen Falle sind es Streckenlänge und mögliche Reisegeschwindigkeit. Zur Unterstützung des Eco-Routing-Ansatzes werden zusätzliche Kosten pro Abschnitt, wie der Treibstoffverbrauch oder die Emissionen benötigt. Von Barth et al. (2007), Boriboonsomsin & Barth (2009) und Boriboonsomsin et al. (2010) wurde eine Methodik vorgestellt, welche pro Streckentyp in Abhängigkeit der Streckengeschwindigkeit die THG-Emissionen mittels einer generierten Funktion abschätzt. Aufgrund der Tatsache, dass unterschiedliche Charakteristika des Fahrverhaltens, beeinflusst durch das aktuelle Verkehrsaufkommen, dieselbe durchschnittliche Geschwindigkeit aufweisen können, wird eine Unterteilung der Funktionen aufgrund des Auslastungsgrades oder der Verkehrsdichte vorgenommen. So können beispielsweise die höheren Emissionen von Trajektorien im Stop-and-Go-Verkehr jedoch mit derselben durchschnittlichen Geschwindigkeit wie eine harmonischere Fahrt im teilgebundenen Verkehrszustand besser geschätzt werden. Nesamani et al. (2006) präsentierte die Emissionsbestimmung mittels Funktion von durchschnittlicher Geschwindigkeit und eine Unterteilung nach Straßen- und Verkehrscharakteristika. Frey et al. (2008) entwickelte eine Funktion, welche die spezifische Motorleistung des Fahrzeuges aufgrund der durchschnittlichen Geschwindigkeit, Beschleunigung und Steigung der Strecke berechnet, um so eine einfache Art der Schätzung von Emissionen bereitzustellen - ohne zusätzliche Auswahlkriterien zur Funktionsfestlegung und zeigte dabei gute Ergebnisse.

Schlussfolgerungen für diese Arbeit

Aufgrund der Tatsache, dass der Kraftstoffverbrauch und Schadstoffausstoß äquivalent zum Energieverbrauch zu behandeln sind, dienen diese Untersuchungen als Grundlagen. Diese Studien zum Thema Fahrverhalten zeigen klar, dass das Ausmaß von Beschleunigungen den größten Einfluss auf den Verbrauch hat. Das individuelle Fahrverhalten jedes Lenkers beeinflusst wesentlich den gesamten Verbrauch, der jedoch vorrangig durch die Wahl des Ganges und des Schaltverhaltens repräsentiert wird. Diese Berücksichtigung ist vor allem wichtig, wenn die tatsächliche Antriebsenergie im Fahrzeug berechnet werden soll und das spielt für diese Arbeit eine zweitrangige Rolle.

Die Studien zur effizienteren Routenwahl zeigen erhebliches Potential und unterstützen die Investition in der Bereitstellung der Informationsgrundlage. Erst mit einer adäquaten Basisbewertung der Netzkomponenten können realistisch effizientere Routen berechnet werden. Die Wichtigkeit des Themas „Kostenfunktion“ oder „Gewichtung“ eines Streckennetzes erhielt in den letzten Jahren jedoch einen eher geringeren Stellenwert. Das Hauptaugenmerk wurde auf die effiziente

Datenverarbeitung der Routenberechnungen gelegt.

2.2 Verkehrsmodellierung und Netzrepräsentation

Das Verkehrsaufkommen durch einzelne Verkehrsteilnehmer in einem Verkehrswegenetz ist ein höchst dynamischer Prozess. Es treten unterschiedlichste Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern auf, welche sich im selben zeitlichen und räumlichen Ausmaß bewegen. Im mIV werden dadurch die einzelnen Fahrmodi, wie das Beschleunigen und das Bremsen, aber auch das Wechseln des Fahrstreifens direkt beeinflusst. Auch die Wahl der Route aufgrund der Verkehrsbelastung kann sich verändern.

Zur Beschreibung dieser verkehrlichen Abläufe gibt es eine Vielzahl von Ansätzen, die aufgrund der Zustandsgrößen in zwei Gruppen unterteilt werden können:

In *mikroskopischen Verkehrsflussmodellen* werden die Interaktionen zwischen den Verkehrsteilnehmern im Detail nachgebildet. Dabei können diese Verhaltensweisen von Fahrzeugen, Fußgängern und Radfahrern modelliert und Auswertungen durchgeführt werden. In mikroskopischen Verkehrsflussmodellen werden üblicherweise begrenzte Gebietsgrößen und Wegewahlverhalten aufgrund des hohen Interaktions-Detaillierungsgrades und der Rechenzeit analysiert.

Die Beschreibung des Verkehrs im größeren Gebiet wird hingegen in der zweiten Gruppe, der *makroskopischen Modelle*, durchgeführt. Die detaillierte Abbildung des Verkehrsverhaltens wird dabei vernachlässigt und findet die Darstellung in der Kontinuumsbeschreibung. Die dafür notwendigen Zustandsgrößen, wie Verkehrsdichte oder mittlere Geschwindigkeit werden über viele Fahrzeuge gemittelt. Diese abstrahierte Beschreibung erspart erhebliche Rechenzeit, was eine Untersuchung größerer Netze erst ermöglicht, jedoch ist eine Analyse von Einzelfahrzeugen nicht mehr durchführbar.

Als Grundlage für verkehrspolitische Maßnahmen zur Planung und zu Investitionen werden makroskopische Verkehrsmodelle als eine objektive Beschreibung des Verkehrsaufkommens auf Verwaltungsebenen verwendet. Die systemorientierte Betrachtung der generellen Abwicklung von Verkehrsnachfrage (Quelle-Ziel-Beziehung) und -angebot kann damit analysiert und bereitgestellt werden. Dabei können genaue Abbilder von den zeitlich unterschiedlichen Verkehrszuständen berechnet werden, welche die Basis für Verkehrssteuerungsmaßnahmen darstellen. Die räumliche und zeitliche Ausprägung wird in aggregierter Form als Quell- und Zielbezirk der Fahrt und Zeitintervall als Abfahrtszeitpunkt dargestellt. Einzelne Fahrten mit ähnlichem Abfahrts- und Zielort gehören einem Quellbezirk i und einem Zielbezirk j an. Mit einem Abfahrtsintervall t werden diese zu Verkehrsbeziehungen $F_{ij,t}$ zusammengefasst.

Dabei wird die Anwendung dieser Makromodelle handhabbar und für online-Applikationen einsetzbar. Die mathematischen Berechnungen der Routen zwischen i und j werden durch Bestweg-Verfahren im Umlegungsprozess auf Basis von Widerständen im Netz durchgeführt - der widerstandsminimalste Weg wird berechnet. Die veränderlichen Verkehrsbelastungen auf den Strecken des Netzes verursachen variierende Widerstände und somit unterschiedliche Routenergebnisse.

2. GRUNDLAGEN UND BEGRIFFE

Die Kenntnis von Wegen (Routen) in Verkehrsnetzen ist eine wesentliche Grundlage für viele Entscheidungen im Verkehrswesen. Als Standardlösung für das Problem des kürzesten Weges gilt der Algorithmus von Dijkstra (1959).

Für die effiziente Berechnung der Routen ist die abstrakte Darstellung von Straßen und Kreuzungen notwendig. Dafür wird das Verkehrswegenetz als Netzmodell bezeichnet und in einen Suchgraph aus Strecken (Kanten) und Knotenpunkten umgewandelt, welcher mittels der Graphentheorie bearbeitet wird. Im Falle eines Straßennetzes enthält der gerichtete Graph (Beispiel in Abbildung 2.1) nicht nur die Information der Netzgeometrie sondern auch die Informationen zur Leistungsfähigkeit der einzelnen Netzkomponenten (Strecke, Knoten, Abbieger). Die Elemente des Verkehrsnetzes werden als Netzknoten, Netzstrecken und Netzabbieger bezeichnet, wobei der Straßengraph für die Wegesuche die Bezeichnungen Knoten und Kanten verwendet.

Die Zuordnung der Leistungsfähigkeit erfolgt mit statischen Informationen (Kapazitäten, Ty-

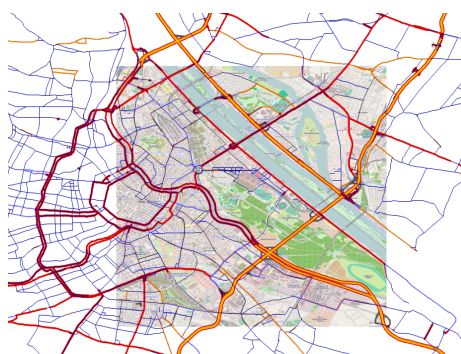


Abbildung 2.1: Abstrakte Darstellung eines Straßennetzes in einem makroskopischen Verkehrsnachfragemodell.

pen, etc.) und über belastungsabhängige Funktionen. Diese Funktionen können für Strecken beispielsweise in Form von $q(v)$ -Funktionen (Verkehrsstärke-Geschwindigkeit) oder Reisezeiten in Abhängigkeit des Auslastungsgrades dargestellt werden. (Abbildung 2.2 (a) zeigt als Beispiel eine Widerstandsfunktion des Bureau of Public Roads (BPR) des Traffic Assignment Manuals (Bureau of Public Roads 1964)). Für Knotenpunkte werden Wartezeiten-Funktionen (b) abhängig von der Abbiegerelation angewendet. Mit diesen vereinfachten Beziehungen, dargestellt in einer Widerstandskurve, lassen sich nicht direkt die realistischen Reisezeiten voraussagen, sondern es wird der Einfluss auf die Wegewahl der Verkehrsteilnehmer berücksichtigt.

Diese dynamischen Leistungsfaktoren pro Netzelement ändern sich je nach Belastung des Netzes. Eine Route verläuft auf dem Weg mit der Summe der geringsten Widerstände (beispielsweise minimalste Reisezeit).

Graphentheorie

Die Routenberechnung in Verkehrsnachfragemodellen bedient sich der Grundlagen der Graphentheorie, welche ebenfalls für die individuelle Routenführung für Fahrzeuge verwendet wird. Die Datenbasis ist in beiden Fällen ein bewerteter oder gewichteter Netzgraph, wofür je nach Zielfunktion die notwendige Bewertungsgröße (Reisezeit, Streckenlänge etc.) für die Routenberechnung

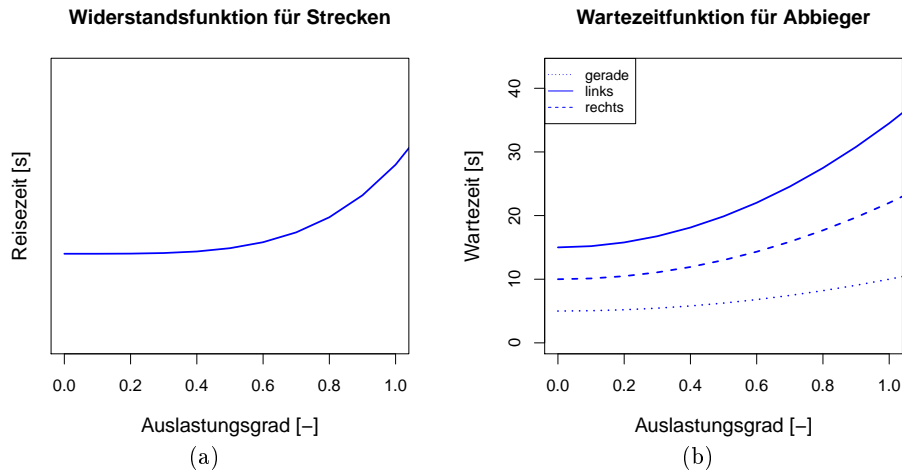


Abbildung 2.2: Widerstandsfunktion für Strecken (a) und Wartezeitfunktionen für Abbiegebeziehungen (b) in Abhängigkeit des Auslastungsgrades

herangezogen wird.

Für die effiziente Bearbeitung der mathematischen Wegeberechnung ist ein Graph $G = (V, E)$ mit der Knotenmenge V (vertices) und der Kantenmenge E (edges) notwendig. Der Abschnitt einer Kante repräsentiert dabei eine Strecke e und wird von zwei Netzknoten (Knotenpunkten) u, v begrenzt. Die Fahrtrichtung wird dabei durch die Reihenfolge der Knoten festgelegt; von u nach v und die Gegenrichtung von v nach u . Die Verbindung dazu wird mit $e = (u, v)$ und $e = (v, u)$ gekennzeichnet.

Anlehnend an Schaechterle (1977) werden folgende Eigenschaften für den Verkehrsgraphen definiert, welche eine Erweiterung in der üblichen Literatur der Graphentheorie (beispielsweise Zimmermann (2008)) darstellt:

endlich Weil der zu untersuchende Straßengraph immer ein definiertes Gebiet (Untersuchungsgebiet, Stadtgrenzen, etc.) ist, sind alle darin befindlichen Komponenten V und E endlich, wobei $E \subseteq \{[u, v] : u, v \in V, u \neq v\}$ gilt.

bewertet Die einzelnen Strecken (auch Links genannt) erhalten eine positive Bewertung (Gewichtung) $w(e_i)$, welche unterschiedliche Bewertungen (Reisezeit, Fahrtkosten, etc.) darstellen kann ($w : E \in \mathbb{R}_0^+$).

gerichtet In der Graphentheorie wird ein gerichteter Graph als Digraph bezeichnet. Die notwendigen Fahrtrichtungen ((u, v) und (v, u)) werden angegeben.

stark zusammenhängend Jeder Knoten ist mit jedem anderen Knoten im Netz verbunden.

unvollständig Nicht jeder Knoten v_i ist mit jedem anderen Knoten v_{i+1} durch eine Strecke $e(u, v)$ verbunden.

dünnbesetzt Jeder Knoten ist im Durchschnitt nur mit bis zu vier anderen Knoten direkt verbunden, welcher eine Kreuzung mit den Armen darstellt.

2. GRUNDLAGEN UND BEGRIFFE

Wenn nun ein Fahrzeug von o nach d fährt, so ist der gewählte Weg (P_{od}) aus G eine Abfolge von Knoten v_i, v_{i+1}, \dots, v_d . Das Gewicht W des Weges wird mit

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

bestimmt. Wenn $W(P_{od})$ die kleinste Summe der Gewichtungen w aller möglichen Verbindungen im Netz aufweist, wird dieser als kürzester Weg bezeichnet. Dabei repräsentiert die Bezeichnung *kürzester Weg* lediglich den *effizientesten Weg, unabhängig von der Optimierungsgröße*.

Um das Verkehrsnetz mit allen Abbiegebeziehungen in der Routenberechnung verarbeiten zu können, muss die Überführung in einen Graphen nicht nur die Knoten und Strecken berücksichtigen, sondern auch die differenzierte Betrachtung der einzelnen Abbiegerelationen mit Gewichten. Basisinformationen zur Integration von Abbiegeinformationen wurden vorrangig aufgrund der notwendigen Darstellung von Abbiegeverböten durchgeführt. Die meisten Ideen basieren auf Caldwell (1961) und Kirby & Potts (1969). Darin werden die gerichteten Graphen nicht mehr als Knoten sondern als Kanten-basierte Graphen bezeichnet. Dies wird in der Regel damit erreicht, dass jede Kante im Graphen einen Knoten darstellt. Damit können die Abbiegekosten über die neuen Kanten berechnet werden.

2.3 Physikalische Zusammenhänge der Fahrwiderstände

Um ein Fahrzeug in Bewegung zu bringen, müssen vom Fahrzeugantrieb die auftretenden Fahrwiderstände überwunden werden. Es wird dabei von der Bedarfskraft F_{Bed} gesprochen (2.1), welche an den Rädern vorhanden sein muss, um voranzukommen. Bei der Untersuchung von Bewegungsvorgängen in Längsrichtung (Fahren, Beschleunigen und Verzögern) wird von longitudinaler Fahrzeugdynamik gesprochen. Bei der Auslegung des Antriebsstranges eines Fahrzeuges sind die auftretenden Fahrwiderstände und der dafür benötigte Energie- und Leistungsbedarf und somit der Kraftstoffverbrauch sowie das Beschleunigungsvermögen ausschlaggebend. Nach Heißing & Ersoy (2008) wird eine Unterscheidung dieser einzelnen Fahrwiderstände nach Fahrzustand getroffen:

stationäre Fahrt Rad-, Luft- und Steigungswiderstände bei konstanter Geschwindigkeit

instationäre Fahrt Rad-, Luft-, Steigungswiderstände und Widerstandskräfte durch Massenträgheit bei beschleunigter Fahrt

$$F_{Bed} = F_{Roll} + F_{Luft} + F_{Beschl} + F_{Steigung} \quad (2.1)$$

$$F_{Roll} = m \cdot g \cdot (F_{r0} + F_{r1} \cdot v) \quad (2.2a)$$

$$F_{Luft} = 0.5 \cdot c_w \cdot \rho \cdot A \cdot (v)^2 \quad (2.2b)$$

$$F_{Beschl} = m \cdot m_{inertia} \cdot a \quad (2.2c)$$

$$F_{Steigung} = m \cdot g \cdot p \quad (2.2d)$$

F_{Bed}	... Bedarfskraft der Antriebsräder [N]
F_{Roll}	... Rollwiderstandskraft [N]
F_{Luft}	... Luftwiderstandskraft [N]
F_{Beschl}	... Beschleunigungswiderstand [N]
$F_{Steigung}$... Steigungswiderstand [N]
m	... Fahrzeugmasse (inkl. Ladung) [kg]
g	... Erdbeschleunigung [m/s ²]
v	... Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]
$F_{R0,R1}$... Rollwiderstandsbeiwerte [-]
c_w	... Luftwiderstandsbeiwert [-]
ρ	... Dichte der Luft [kg/m ³]
A	... Stirnfläche des Fahrzeugs [m ²]
a	... Fahrzeugbeschleunigung [m/s ²]
$m_{inertia}$... Massenträgheitsfaktor [-]
p	... Steigung [/100]

Nach Wallentowitz (1998) treten am Rad zusätzlich zum *Rollwiderstand* des Reifens noch Schwall-, Lager-, Schräglauf- und Fahrbahnwiderstände auf. Aufgrund der Tatsache, dass der Rollwiderstand dem gesamten Radwiderstand bei Geradeausfahrten und trockener Straße gleichzusetzen ist, wird in dieser Arbeit nur der Rollwiderstand berücksichtigt.

Der *Luftwiderstand* beinhaltet die Widerstandsformen der Druckdifferenzen am Fahrzeug als Druckwiderstand, die Reibungswiderstände an der Fahrzeugoberfläche, den inneren Luftwiderstand aufgrund der Durchströmung des Fahrzeuges (beispielsweise Motorkühlung) und den induzierten Luftwiderstand durch die Verwirbelungen in der Umgebung. Diese Widerstandsanteile werden mit dem Luftwiderstandsbeiwert c_w repräsentiert. Die Windgeschwindigkeit (bei Gegenwind wird diese addiert, bei Rückenwind wird sie subtrahiert) beträgt im Mittel $v_{luft} \approx 4.7\text{m/s}$ und ist ein Teil der Anströmgeschwindigkeit v_∞ , welche zum Quadrat in den Luftwiderstand eingeht (Mitschke & Wallentowitz 2005). Die Anströmgeschwindigkeit setzt sich aus Fahrzeuggeschwindigkeit (v_X) und Windgeschwindigkeit (v_L) zusammen $v_\infty = v_X \pm v_L$.

Im beschleunigten Zustand muss eine Kraft aufgebracht werden, um die Trägheit des beschleunigten Körpers zu überwinden - es muss der Trägheits- oder Beschleunigungswiderstand überwunden werden. Die Trägheitskräfte bestehen aus translatorischen und rotatorischen Trägheitswiderständen. Im Verzögerungsbetrieb wird bei Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb die freigesetzte Energie in Wärme umgewandelt. Bei Fahrzeugen, welche die Möglichkeit zur Rekuperation der Bremsenergie haben, kann diese Energie zum Laden des Energiespeichers verwendet werden.

Wird (2.1) mit der aktuellen Geschwindigkeit multipliziert, erhält man die Leistung P_{Bed} , welche vorhanden sein muss, um den Fahrzustand aufrecht zu erhalten. Für die Fahrt über eine Weglänge s_X und die dabei auftretenden Fahrwiderstände $F_{Bed}(s)$ muss an den Antriebsrädern die

2. GRUNDLAGEN UND BEGRIFFE

Energie E_{Bed} umgewandelt werden (2.3).

$$E_{Bed} = \int_0^{sX} F_{Bed}(s) \cdot ds \quad (2.3)$$

Diese Fahrwiderstände setzen sich aus konservativen ($F_{Bed,konverativ}$) und nicht konservativen oder dissipierten Kräften ($F_{Bed,dissipiert}$) zusammen, wobei die konservativen Kräfte nach Möglichkeit des Fahrzeugkonzeptes durch Rekuperation wieder als Energie zurückgewonnen werden können (2.4).

$$E_{Bed} = B_{Bed,konservativ} + E_{Bed,dissipiert} \quad (2.4)$$

$$E_{Bed,konservativ} = \int_0^{sX} [F_{Steigung}(s) + F_{Beschl}(s)] ds \quad (2.5a)$$

$$E_{Bed,dissipiert} = \int_0^{sX} [F_{Luft}(s) + F_{Roll}(s)] ds \quad (2.5b)$$

Die Einzelwiderstände auf unterschiedlichen Streckentypen haben auch unterschiedliche Anteile am Gesamtfahrwiderstand. In Abbildung 2.3 wird beispielhaft gezeigt, in welcher Abhängigkeit zur Geschwindigkeit sich die Energiebedarfsanteile zur Überwindung der Fahrwiderstände befinden (ohne Berücksichtigung der Nebenverbraucher). Die Abbildung stellt eine Fahrt mit einer konstanten Beschleunigung von 0.8m/s^2 auf einer Steigungsstrecke von 1% dar. Dabei ist klar zu sehen, dass die aufzubringende Energie, um das Fahrzeug zu beschleunigen, den Hauptanteil verursacht. Der Luftwiderstand nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit exponentiell zu, wohingegen der Steigungs- und Rollwiderstand auf den Energiebedarf nahezu einen konstanten Anteil ausmachen. Die Energie für Roll- (E_{Roll}) und Steigungswiderstand ($E_{Steigung}$) ist nahezu

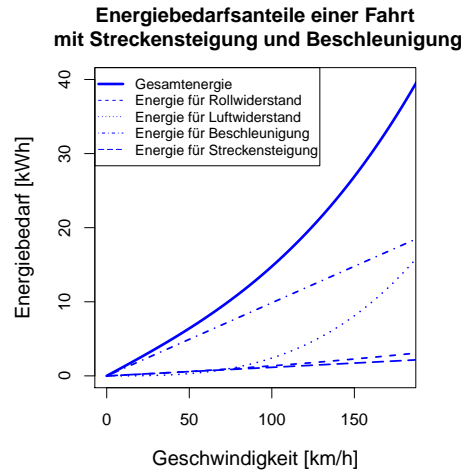


Abbildung 2.3: Energiebedarfsanteile zur Überwindung der einzelnen Fahrwiderstände durch Darstellung einer Fahrt mit Beschleunigung von 0.8m/s^2 und einer Streckensteigung von 1% bei einer Geschwindigkeit von 0 - 180km/h.

unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit. Der Energiebedarf zur Überwindung des Beschleunigungswiderstandes (E_{Beschl}) steigt linear mit der Geschwindigkeit, wobei der Luftwiderstand als quadratische Funktion zur Geschwindigkeit steigt. Damit wird klar dargestellt, dass der Gesamtenergiebedarf in Phasen der niedrigen und hohen Fahrgeschwindigkeiten eingeteilt werden kann.

- Geschwindigkeit $< 80\text{km/h}$: Energie wird überwiegend zur Beschleunigung benötigt.
- Geschwindigkeit $> 80\text{km/h}$: Energie zur Überwindung des Luftwiderstandes und Beschleunigung.

Es gibt unterschiedliche Modelle, im eigentlichen Sinn sind es Simulationsmodelle, welche die Emissionsberechnung und den Kraftstoffverbrauch aufgrund von aufkommenden Fahrwiderständen und Verlusten durchführen. Hausberger (2003) entwickelte an der Technischen Universität Graz das Modell PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model), das die notwendige Motorleistung zur Überwindung der Fahrwiderstände und Verluste am Antriebsstrang für einen gegebenen Fahrzyklus in einer Auflösung von 1Hz-Daten berechnet. Die Motorgeschwindigkeit und ein Gangwahlmodell werden dabei simuliert und die Emissionen werden aus hinterlegten (Motor-)Kennfeldern interpoliert. Die Emissionen und der Kraftstoffverbrauch können in dieser feinen zeitlichen Auflösung bestimmt werden. In Hirschmann et al. (2010) wurde gezeigt, dass mit der Kopplung des Emissionsmodells mit einem mikroskopischen Verkehrsflussmodell die Möglichkeit geschaffen wurde, die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch auf einer mikroskopischen Modellierungsebene durchzuführen. Barth et al. (1999) stellte ebenfalls das Emissionsmodell CMEM (Comprehensive Modal Emission Model) vor, das von der Universität in Californien entwickelt wurde. CMEM berechnet aus physikalischen Zusammenhängen den Leistungsbedarf (in der Fahrzeugtechnik in Form der Motorleistung, siehe 2.4) für eine Fahrt, um den Kraftstoffverbrauch und die produzierten Emissionen zu schätzen. Sowohl PHEM als auch CMEM können spezielle Fahrzeugtypen, Modelle und Produktionsjahre als Datenbasis verwenden.

2.4 Leistungsbedarf und Energiebedarf

Wie in Kapitel 2.3 zu sehen ist, werden die Begriffe *Leistung* und *Energie* nicht klar abgegrenzt verwendet. Grund dafür ist, dass im englischen Sprachgebrauch unter *energy* im Allgemeinen sowohl Leistung als auch Energie verstanden wird. In der Fahrzeugtechnik wird vorrangig von Leistung gesprochen, da diese Angabe für die Auslegung des Fahrzeugantriebes ausschlaggebend ist. In dieser Arbeit sollen diese Begriffe jedoch klar voneinander getrennt werden, dafür werden zuerst die Zusammenhänge von *Energie*, *Arbeit* und *Leistung* beschrieben:

Energie E in $[J]$ oder $[Ws]$ bedeutet in der Physik die Fähigkeit *Arbeit* zu verrichten. Wird eine Energie in mechanische Energie umgewandelt, spricht man von Arbeit. Wirkt eine Kraft entlang einer Wegstrecke, so wird für die Befahrung der Strecke Arbeit verrichtet (Abhängigkeit des Weges). Eine Unterscheidung zwischen Energie und Arbeit wird nicht mehr durchgeführt, da aufgrund des fundamentalen Energieerhaltungssatzes (Summe der Energieformen bleibt im System erhalten) die Differenzierung in den meisten Anwendungsgebieten vernachlässigbar ist.

Leistung P in $[W]$ bedeutet, wie schnell Energie in die andere umgewandelt werden kann (Abhängigkeit der Zeit). Um eine Strecke mit einer bestimmten Geschwindigkeit zu befahren, ist Leistung notwendig.

2. GRUNDLAGEN UND BEGRIFFE

Die Zusammenhänge werden in folgenden Formeln zusammengefasst:

$$E = \int_0^{s_x} F(s) \cdot ds = \int_0^{t_x} P(t) \cdot dt \quad (2.6)$$

$$\begin{array}{lll} \text{Energie} \dots \text{Kraft} \cdot \text{Weg} & E(t) = F(t) \cdot s(t) & [Nm] \rightarrow [J] \Rightarrow [Ws] \\ \text{Leistung} \dots \text{Kraft} \cdot \text{Geschwindigkeit} & P(t) = F(t) \cdot v(t) & \left[\frac{Nm}{s} \right] \Rightarrow [W] \end{array}$$

Auf Basis von (2.6) kann ein wichtiger Zusammenhang der Kraftaufbringung zur Befahrung einer Strecke für diese Arbeit festgelegt werden. Um den Energiebedarf¹ bestimmen zu können, wird entweder eine zeitliche Angabe (Reisezeit) oder eine Distanz (Weglänge) benötigt.

Im Bereich des Verkehrswesens sind die Begriffe Leistung und Energie mit den Darstellungsformen von Geschwindigkeitsverläufen auf Basis der Zeit oder des Weges vergleichbar. In Abbildung 2.4 ist dieser Informationsgehalt in Abhängigkeit der Zeit als $v(t)$ -Diagramm und in Abhängigkeit des Weges als $v(x)$ -Diagramm mittels eines realen Fahrverlaufs dargestellt. Wird die Geschwindigkeit über den Weg aufgetragen so gehen die Informationen über Zeitpunkt der Geschwindigkeit verloren und umgekehrt. Erst die Kombination beider Beziehungen gibt Kenntnis über Reisezeit und Örtlichkeit des Fahrverlaufs.

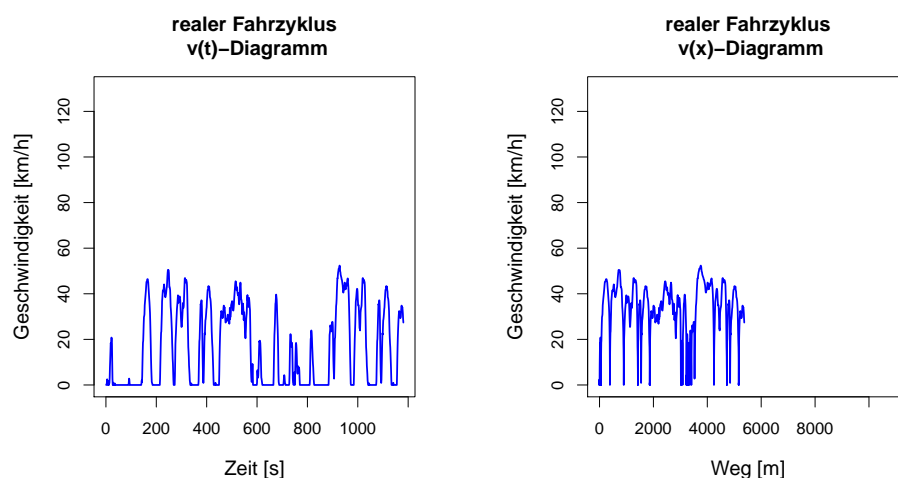


Abbildung 2.4: Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit der Zeit ($v(t)$) und des Weges ($v(x)$) von einer mit GPS-Receiver aufzeichneten Fahrt im Grazer Stadtgebiet, April 2008.

Besteht nun die Forderung nach energieorientierten Routen, muss der Energiebedarf (Kraftaufbringung in Abhängigkeit des Weges) in die Gewichtungsfunktion einzelner Strecken eingehen, welche das Fahrzeug für das Befahren des Streckensegments benötigt. Die zusätzliche Abhängigkeit der Geschwindigkeit lässt die Schwankungen der Verkehrsbelastungen miteinfließen. Ebenfalls werden in diesem Fall die Informationen zur Energieaufbringung bei Abbiegerelationen benötigt, welche ebenfalls in Form einer Gewichtung dargestellt werden müssen.

¹Die Angaben des Energiebedarfs werden in dieser Arbeit in [kWh] angegeben.

Analyse des Fahrverhaltens und der Energieaufbringung

Unterschiedliches Fahrverhalten bewirkt ein unterschiedliches Ausmaß des Verbrauches. Das Fahrverhalten wird durch verschiedene Faktoren, wie das aktuelle Verkehrsaufkommen, beeinflusst. Das ist an Veränderungen im individuellen *Fahrverhaltensmuster* (engl.: driving pattern) zu sehen. Eine Beschreibung der unterschiedlichen Fahrverhaltensmuster und aus der Literatur bekannte Untersuchungen sollen die Begründung für die spätere Anwendung unterstützen. Die ebenfalls in diesem Kapitel angeführte Diskussion des Einflusses von „neuen“ *Antriebssystemen* stellt eine Erweiterung des Themengebietes dar.

Eine abschließende Sensitivitätsanalyse der einzelnen *Einflussfaktoren* auf den Energiebedarf wird durchgeführt, um ein praktikables Bewertungsverfahren eines gesamten Streckennetzes zu entwickeln. Dafür werden die Erkenntnisse für die spätere Anwendung zusammengefasst.

3.1 Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten

Das Fahrverhalten und somit das Fahrmuster einer Fahrt wird von unterschiedlichen Faktoren, wie der Streckengeometrie, der Verkehrssteuerung, dem Verkehrsaufkommen, dem Wetter und nicht zuletzt durch das individuelle Fahrverhalten des Lenkers beeinflusst.

De Vlioger et al. (2000) untersuchte mit einer Testflotte in Antwerpen unterschiedliche Fahrverhalten und den Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch und setzte diese mit streckenspezifischen Kenngrößen in Bezug. Beispielsweise wirkte sich eine hohe Verkehrsbelastung um 20 - 45% stärker auf den Treibstoffverbrauch bei Fahrten auf innerstädtischen Strecken als auf Freilandstraßen aus. Bei Brundell-Freij & Ericsson (2005) hängen die Geschwindigkeit, die Beschleunigung sowie die Gangwahl von diversen Komponenten ab. Den größten Einfluss haben Straßencharakteristika wie die Anzahl von Kreuzungen, Geschwindigkeitsbeschränkungen und die Lage der Straße. Daneben spielt auch die Leistung des Fahrzeuges sowie Geschlecht und Alter des Fahrers eine entscheidende Rolle.

Neben der gefahrenen Geschwindigkeit, der Straßenkategorie und der Verkehrssituation hat auch die Längsneigung der Straße laut dieser Studie einen erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch. In Park & Rakha (1987) wird mithilfe eines mikroskopischen Verkehrssimulationsprogramms ermittelt, dass eine um 1% größere Steigung zu 9% mehr Kraftstoffverbrauch und Emis-

3. ANALYSE DES FAHRVERHALTENS UND DER ENERGIEAUFBRINGUNG

sionen führen kann.

Studien mit unterschiedlichen Untersuchungsfaktoren wurden durchgeführt, jedoch wurden erstmals in Ericsson (2000) die Einflussfaktoren, welche die Variabilität der Fahrverhaltensmuster verursachen, zusammenfassend dargestellt:

Fahrt Faktoren, wie der Zweck der Fahrt, Dauer, Zeit und Routenwahl haben einen wesentlichen Einfluss auf das Fahrverhalten der einzelnen Lenker.

Lenker Unabhängig von den Gegebenheiten der Fahrt, sind der physische Zustand des Lenkers (Alter, Gesundheit) und die Grundvoraussetzung des Fahrverhaltens (aggressiv, moderat, vorsichtig), geprägt durch die Erfahrung und das Geschlecht, von ausschlaggebender Rolle.

Fahrzeug Die Leistungsfähigkeit im Verhältnis zur Fahrzeugmasse, Antriebsart, Fahrzeugtyp und -alter sind zu berücksichtigen.

Straße Die geometrische Ausführung, abhängig vom Funktionstyp der Strecke, beeinflusst den darauf herrschenden Verkehrsfluss maßgeblich.

Verkehr Zustand des aktuellen Verkehrs mit den Kenngrößen Auslastungsgrad, Level-of-Service (LOS), Geschwindigkeiten und Flottenzusammensetzung ist ein wesentlicher Einflussfaktor auf das Fahrmuster.

Wetter Wetterzustand, wie Sichtbarkeit, haben einen direkten Einfluss auf das Fahrverhalten, Temperatur und Niederschlag auf den Zustand der Fahrbahnoberfläche.

Ericsson (2000) zeigt, dass die Straßenklasse den größten Einfluss auf die Fahrmuster haben. Der Einfluss des individuellen Fahrverhaltens spiegelt sich in Form der Beschleunigungsraten wider und zeigt, dass Männer im Allgemeinen stärker beschleunigen und bremsen als Frauen. Es wurde lediglich der signifikante Einfluss auf die Geschwindigkeit durch die Verkehrssituation angegeben und keine Detailinformationen zu den Auswirkungen auf das Fahrverhaltensmuster.

Resümiert aus den angeführten Veröffentlichungen werden in dieser Arbeit die überwiegenden Einflüsse, wie der Umgebungszustand (Verkehr, Wetter) und das Verkehrsnetz (Strecken, Knoten) im Detail untersucht. Die Informationen des Fahrzeuges werden in Form von Kenngrößen von durchschnittlichen Fahrzeugtypen einfließen, jedoch wird die Leistungsfähigkeit des Antriebsmotors aufgrund der nachrangigen Rolle im urbanen Gebiet vernachlässigt.

3.2 Fahrverhaltensmuster auf Strecken

Schon seit den 70er Jahren beschäftigen sich Studien mit Fahrverhaltensmustern von Fahrten auf unterschiedlichen Verkehrsstrecken. Im Speziellen zielten die Untersuchungen auf Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvorgänge ab, welche den Treibstoffverbrauch und die Emissionsproduktion

maßgeblich verursachen und beschreiben. Den direkten Zusammenhang von Fahrverhaltensmustern und Treibstoffverbrauch/Emissionen, der zur Bildung von sogenannten *künstlichen Testzyklen* herangezogen wird, beschrieben Milkins & Watson (1983) mit Verweis auf Watson (1978). Diese Testzyklen werden für die Emissionsbewertung und dem Treibstoffverbrauch von Fahrzeugen zur Neuzulassung verwendet. Studien dazu sind für diese Arbeit von besonderer Bedeutung, da die damit verbundenen Schätzungen und Berechnungen von Emissionen im *direkten Zusammenhang mit dem in dieser Arbeit allgemein formulierten Energiebedarf* stehen.

Verschiedene Fahrmuster wurden von Kenworthy (1986) in seiner Dissertation erläutert und weiterführend von Lyons et al. (1989) erstmals in Bezug zum städtischen Gebiet und den lokalen Gegebenheiten die Abhängigkeiten über die Tageszeit untersucht und beschrieben.

Die notwendigen Kenngrößen zur Beschreibung von Fahrverläufen und die Definitionen von Fahrverhaltensmustern werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

3.2.1 Kenngrößen zur Untersuchung von Fahrzyklen

Für die Beschreibung von Fahrverhaltensmustern wurden in unterschiedlichen Studien verschiedene Kenngrößen vorgestellt. Kenworthy et al. (1983) beispielsweise stellte 30 Kenngrößen vor. Aus diesem Set von Beschreibungsgrößen wurden von Milkins & Watson (1983) die emissionsrelevanten Kenngrößen selektiert und für Analysen verwendet. Diese Kenngrößen bezogen sich auf das Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten (positive und negative Beschleunigung):

Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v} Die durchschnittliche Geschwindigkeit über den gesamten Fahrverlauf ist meist sehr ähnlich und hat als einzige Kenngröße wenig Aussagekraft.

Durchschnittsgeschwindigkeit ohne Stillstand \bar{v}_{run} Die durchschnittliche Geschwindigkeit über den gesamten Fahrverlauf ohne Stillstandsanteile (running speed) ist gerade im städtischen Gebiet bei möglichem Stop-and-Go-Verkehr eine wesentliche Kenngröße.

Maximalgeschwindigkeit \hat{v} Die maximale Geschwindigkeit (Spitzengeschwindigkeit) des Fahrverlaufs gibt vor allem Kenntnis über hochrangige Strecken.

Durchschnittsbeschleunigung \overline{acc} Die durchschnittliche positive Beschleunigung über den gesamten Fahrverlauf ist ein wesentlicher Einfluss auf den Energieverbrauch.

Durchschnittsverzögerung \overline{dec} Die durchschnittliche negative Beschleunigung, besser bekannt unter Verzögerung, über den gesamten Fahrverlauf ist eine Kenngröße, bei der Energie *vernichtet* wird.

Quadratischer Mittelwert der Beschleunigung RMS Der RMS-Faktor (root mean square), also das quadratische Mittel der Beschleunigung gibt, Kenntnis über das sogenannte *Rauschen* der Geschwindigkeit.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_e - v_a)^2}$$

3. ANALYSE DES FAHRVERHALTENS UND DER ENERGIEAUFBRINGUNG

Kinetische Beschleunigungsenergie PKE Die benötigte kinetische Energie pro positivem Beschleunigungsvorgang (Anfangs- und Endgeschwindigkeit (v_a , v_e) und dabei zurückgelegter Distanz s_X beschrieben) wird durch PKE (positive acceleration kinetic energy) abgebildet.

$$PKE = \sum (v_e^2 - v_a^2) / \int_0^{s_X} dx$$

Stillstandsanteil p_{idle} Der prozentuelle Zeitanteil des Stillstandes während der Fahrt gibt einen wesentlichen Einblick in den Stop-and-Go-Verkehr oder im städtischen Gebiet in die Beeinflussung durch Verkehrslichtsignalanlagen (VLSA). Bei den Verkehrsingenieurwissenschaften wird die Anzahl der Halte während einer Fahrt verwendet, wenn Verkehrssteuerungsverfahren verglichen werden.

In Milkins & Watson (1983) wurden Fahrverläufe von vier australischen Städten mit den standardisierten Testzyklen aus den USA, Japan und Europa verglichen. Dabei wurden die Emissionsaufkommen und der Treibstoffverbrauch berechnet und analysiert, ob die Standardzyklen die realen Werte in adäquater Form abbilden. Außerdem wurde in Watson (1978) empfohlen, nicht nur die einzelnen Parameter pro Trajektorie zu berechnen, sondern auch eine Vergleichsmatrix SAPM (Speed Acceleration Probability Matrix) anzustellen, um somit die Charakteristik des einzelnen Fahrverlaufs konkret darzustellen.

Grundsätzlich wird diese Matrix erstellt, indem die Geschwindigkeiten und die Beschleunigungen in äquidistante Abschnitte eingeteilt und die einzelnen Anteile in Prozent pro Abschnitt eingetragen werden. Die Summe der gesamten Matrix beträgt 100 und lässt sich für Vergleiche einzelner Fahrverläufe hervorragend anwenden, was in Milkins & Watson (1983) durch Subtraktion der einzelnen Bereichswerte dargestellt wurde. Je kleiner die Summendifferenz ist, desto ähnlicher sind die Trajektorien.

Hung et al. (2005) erstellte auf Basis von Kent et al. (1978), Kuhler & Karstens (1978), Kruse & Huls (1973) einen Kenngrößenkatalog zur Untersuchung von Fahrverläufen, welcher in Tabelle 3.1 dargestellt wird.

Ergänzend zu den Kenngrößen der Tabelle 3.1 wird auf den Begriff des Beschleunigungsrauschens, den sogenannten *Acceleration Noise*, hingewiesen. Es handelt sich dabei um die Standardabweichung der Beschleunigung (positive und negative Beschleunigung) und wurde speziell im Gebiet der Erstellung von Fahrzeugfolgmodellen verwendet und erstmals von Bester (1981) im Zuge seiner Dissertation erwähnt. Die Grundannahme ist dabei, dass das Beschleunigungsverhalten eines Fahrers normalverteilt ist. Deshalb wird mit dieser Kenngröße das Ausmaß der Geschwindigkeitsveränderungen angegeben. Von Greenwood et al. (2007) wurde dieses Rauschen als eine Zusammenstellung des induzierten Rauschens des Verkehrsflusses und des natürlichen Rauschens aufgrund der Straßen- und Umgebungsgegebenheiten beschrieben.

Ericsson (2000) gab 26 Kenngrößen zur Beschreibung von Fahrverhaltensmustern an, welche sich in zahlreichen ähnlichen Studien widerspiegeln. Die Einteilung der Kenngrößen erfolgte in *Niveaumasse* (level measures), *Schwankungsmasse* (oscillation measures) und *Verteilungs-*

Tabelle 3.1: Auflistung von Kenngrößen für Untersuchungen von Fahrzyklen zur Kategorisierung von Fahrmustern.

Nr.	Kenngröße	Kurzbezeichnung	Einheit
01	Dauer der Fahrt	t	s
02	Ø Geschwindigkeit	\bar{v}	km/h
03	Ø Geschwindigkeit o. Stillstand	\bar{v}_{run}	km/h
04	max. Geschwindigkeit	v_{max}	km/h
05	min. Geschwindigkeit	v_{min}	km/h
05	Ø Beschleunigung	\overline{acc}	m/s ²
07	Ø Verzögerung	\overline{dec}	m/s ²
08	Zeitanteil des Stillstandes (idle)	p_{idle}	%
09	Zeitanteil der Beschleunigung (acceleration)	p_{acc}	%
10	Zeitanteil der Verzögerung (deceleration)	p_{dec}	%
11	Zeitanteil des Cruisings (cruising)	p_{cruise}	%
12	RMS (root mean square)	RMS	m/s ²
13	PKE (positive kinetic energy)	PKE	m/s ²

maße (distribution measures), wobei die *Niveaumasse* die Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Verzögerungen mithilfe der Durchschnittswerte und Standardabweichung beschreiben. Die *Schwankungsmasse*, wie beispielsweise die positive kinetische Energie (RPA - relative positive acceleration) versuchen die Fluktuation der Geschwindigkeitskurve mit minimalen und maximalen Grenzen und den Abweichungen darzustellen. Die *Verteilungsmasse* hingegen geben den jeweiligen Zeitbedarf für die unterschiedlichen Fahrmodi (unterschiedliche Geschwindigkeiten, Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge) an. Fünf Parameter haben laut dieser Studie Einfluss: RPA ($\frac{1}{n} \int va^+$, mit n als Anzahl der Zeitschritte, v als Geschwindigkeit und a^+ als positive Beschleunigung), Anzahl der Beschleunigungen je 100m, prozentueller Zeitanteil mit höherer Beschleunigung als 1,5m/s², prozentueller Zeitanteil der Zeit mit einer Verzögerung zwischen -1,5m/s² und -2,5 m/s² und der prozentuelle Zeitanteil mit einer Geschwindigkeit kleiner als 15 km/h.

Diese Studien haben gezeigt, dass Faktoren für die Beschleunigung, Halte und Geschwindigkeitsschwankungen und die zeitlichen Verteilungen die größten Auswirkungen auf den Verbrauch haben. Aufgrund der Tatsache, dass die in Tabelle 3.1 dargestellten Kenngrößen die energiebedarfsrelevanten Aspekte sehr detailliert beschreiben und bei der Angabe des Acceleration Noise diese relevanten Informationen vermischen, wird diese Kenngröße in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

3.2.2 Studien zur Bildung von künstlichen Fahrzyklen

In der EU wurden seit Beginn der 70er Jahre Emissionsgrenzwerte eingeführt, weshalb die Messung dieser Emissionswerte durch sogenannte Prüfzyklen entwickelt wurden. Diese künstlichen Fahrzyklen stellen im Grunde einen Geschwindigkeitsverlauf über die Zeit dar (Kenworthy 1986)

3. ANALYSE DES FAHRVERHALTENS UND DER ENERGIEAUFBRINGUNG

und werden am Rollenprüfstand unter Messung der Emissionen nachgefahren. Diese Zyklen sollten so gut wie möglich unterschiedliche Gegebenheiten während einer Fahrt abdecken und die Auswirkungen auf das Fahrverhalten repräsentieren.

Grundsätzlich gibt es die Möglichkeit einen Fahrzyklus aus real gemessenen Geschwindigkeitsprofilen (FTP-75, US06, CADC, etc.) oder aus Abschnitten mit konstanten Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Verzögerungen (NEDC) zu generieren. Seit dem 1. Jänner 1996 wird in Europa der PKW-Typprüfzyklus *NEDC* (New European Driving Cycle) oder NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) für Neuzulassungen von Fahrzeugen für den Treibstoffverbrauch und die Emissionen herangezogen. Der Vergleich der Prüfzyklen NEDC und FTP-75 in Abbildung 3.1 zeigt das wesentlich dynamischere Fahrverhalten in den Beschleunigungen und Verzögerungen des FTP-15-Fahrverlaufs, was dem realen Fahrverhalten näher kommt.

Da diese standardisierten Prüfzyklen als Durchschnittszyklen zu verstehen sind, die als vor-

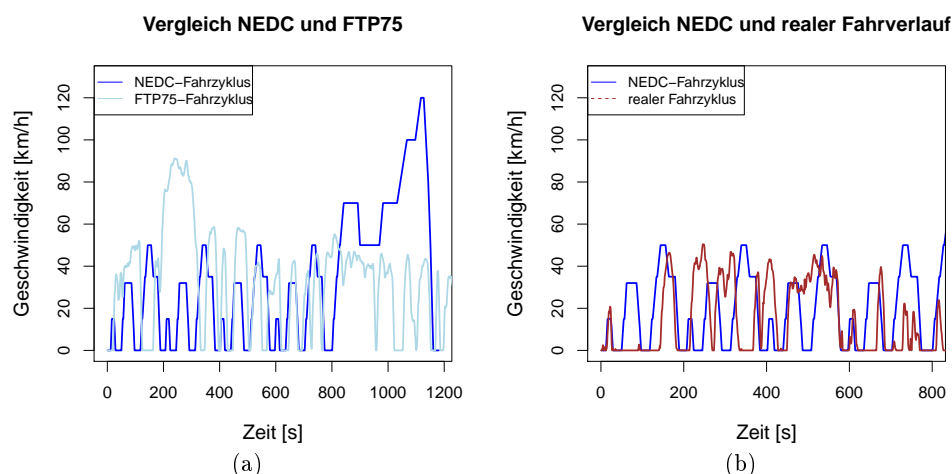


Abbildung 3.1: Geschwindigkeitsganglinien der Normzyklen NEDC und FTP75 und eines realen Fahrverlaufs einer mit GPS-Receiver aufgezeichneten Fahrt im Grazer Stadtgebiet im April 2008. Grafik (a): Vergleich der Normzyklen. Grafik (b): Darstellung des NEDC (städtischer Teil) und eines realen Fahrzyklus.

rangiges Ziel die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Fahrzeuge haben, sind diese Zyklen großer Kritik ausgesetzt. In Abbildung 3.1 (b) sind vergleichsweise die Fahrverläufe des NEDC und einer realen städtischen Fahrt aufgetragen. Der erste Teil des NEDC stellt ein städtisches und der zweite Teil ein Fahrverhalten außerorts dar, weshalb für diesen Vergleich nur die ersten 800 Sekunden herangezogen wurden. Dieser Vergleich lässt schnell die Kritik verstehen, warum vor allem Beschleunigungen und Verzögerungen, die im städtischen Fahrverlauf die Hauptursache für die Emissionen sind, nicht in adäquater Form dargestellt werden.

Für die Messungen werden auf einem Rollenprüfstand die Fahrwiderstände simuliert und der standardisierte Fahrzyklus wird von einem Fahrzeug abgefahren. Die Emissionen werden gemessen und der Treibstoffverbrauch wird daraus berechnet. Bei Elektrofahrzeugen wird hingegen der Batterieladestand gemessen und somit auf den Energieverbrauch geschlossen. In Abbildung 3.2 sind der vorgegebene NEDC und die Ergebnisfahrt am Rollenprüfstand dargestellt, welche nur geringe Abweichungen in den Geschwindigkeiten aufzeigen.

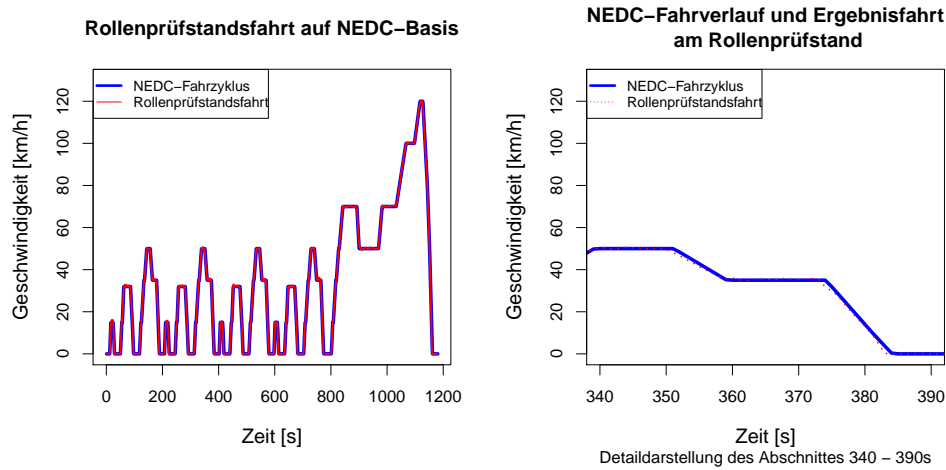


Abbildung 3.2: Darstellung eines Abschnittes des NEDC (blaue, durchgezogene Basislinie) und der nachgefahrenen Fahrt (rote, strichlierte Linie) am Rollenprüfstand zur Messung von Emissionen und des Kraftstoffverbrauches. Linke Grafik: Darstellung des gesamten Normzyklus. Linke Grafik: Detailausschnitt des Abschnittes von 50 Sekunden.

Der NEDC ist charakteristisch für konstante Beschleunigungen und Konstantfahrten, wodurch sich ein nahezu stationärer Fahrverlauf ergibt. Der Wechsel von $a > 0$ zu $a = 0$ ist im Detailausschnitt aufgezeichnet.

3.2.3 Zusammensetzung von Fahrverhaltensmustern

Die wichtigsten Fragen bei der Untersuchung von Fahrverhaltensmustern für diese Arbeit ist die klare Abgrenzung der einzelnen Fahrmodi einer Trajektorie. Wesentlich ist auch die Intensität von Beschleunigung und Verzögerung, der sogenannten *acceleration/decleration rate*. In Matzoros & Van Vliet (1991) wurde zusätzlich der Fahrmodus Kriechen (Creeping) definiert, der mit geringen Beschleunigungen und Verzögerungen vor allem an Abläufen von VLSAs, Portalen mit Zufahrtsbeschränkungen und im Stop-and-Go-Verkehr auftritt.

In Tabelle 3.2 werden die Definitionen zur Bestimmung der einzelnen Fahrmodi dargestellt. Aufgrund der Vollständigkeit wird die Definition des Kriechens angeführt, welche für diese Arbeit jedoch nicht zur Anwendung kommt. Auf Basis von Tabelle 3.2 können klare Abgrenzungen

Tabelle 3.2: Definition der möglichen Fahrmodi bei der Befahrung einer Strecke.

Fahrmodus	Definition
Idle (Stillstand)	$v = 0m/s$ bzw. $v < 0.1m/s$
Acceleration (Beschleunigen)	$acc \geq 0.125m/s^2$
Deceleration (Verzögern)	$dec \leq -0.125m/s^2$
Cruising (Konstantfahrt)	$-0.125m/s^2 < acc < +0.125m/s^2$ $\bar{v} > 15km/h$
Creeping (Kriechen)	$-0.125m/s^2 < acc < +0.125m/s^2$ $\bar{v} < 15km/h$

getroffen werden, welche in Abbildung 3.3 durchgeführt und grafisch dargestellt sind. Dabei

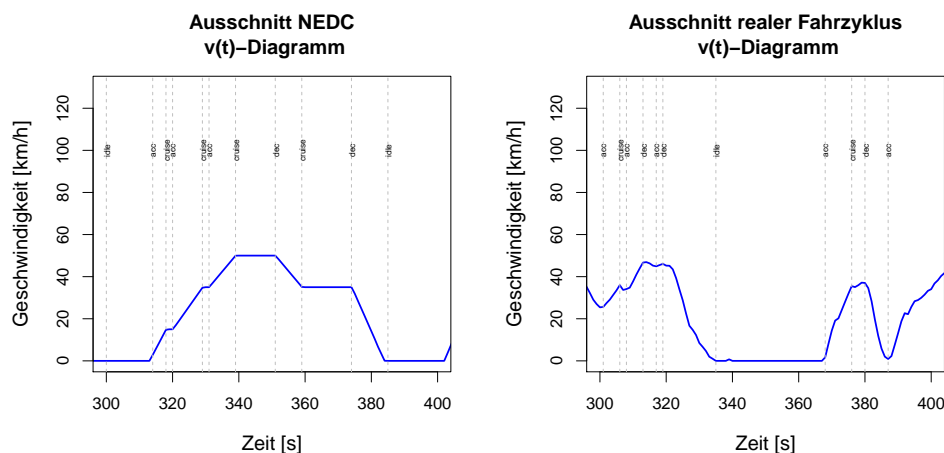


Abbildung 3.3: Einteilung der einzelnen Fahrmodi eines Detailabschnittes von 300 - 400 Sekunden des NEDC und des realen Fahrverlaufs mit GPS-Receiver aufgezeichneter Fahrt im Grazer Stadtgebiet im April 2008.

wurden 100 Fahrsekunden des NEDC und des realen Fahrverlaufs herangezogen und die Fahrmodi kenntlich gemacht.

3.3 Fahrverhaltensmuster bei Abbiegevorgängen

In einem Verkehrsnetz verknüpfen Abbiegebeziehungen (Abbieger) ein- und ausgehende Strecken (in- und out-Strecke) eines Knotenpunktes. Dabei können vorfahrtsregelte und lichtsignalgesteuerte Knotenpunkte unterschieden und sollten auch differenziert behandelt werden (Knotenpunkte in der Ausführung eines Kreisverkehrs werden in dieser Arbeit nicht explizit betrachtet).

In *makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen* werden Abbieger ohne Längenangaben versorgt. Die Berücksichtigung von Abbiegevorgängen wird mit einem *Zeitzuschlag* belegt, der sich mit zunehmender Verkehrsbelastung erhöht. Eine der gängigsten Funktionen stammt aus dem US-amerikanischen Bureau of Public Roads (BPR) - später Federal Highway Administration (Bureau of Public Roads 1964). Diese einfach anwendbare Funktion (3.1) wird auch für Knotenpunkte herangezogen.

$$t_{zuschlag} = t_0 \cdot \left(1 + \alpha \left(\frac{q}{q_{max}} \right)^\beta \right) \quad (3.1)$$

- $t_{zuschlag}$... belastungsabhängiger Zeitzuschlag [s]
- t_0 ... Abbiegezeitzuschlag bei freiem Verkehrsfluss [s]
- q ... Belastung des Abbiegestroms [Kfz/h]
- q_{max} ... Kapazität des Abbiegestroms [Kfz/h]
- α, β ... zu kalibrierende Formparameter [-]

Für die Berechnung der Wartezeit an VLSA stehen zusätzlich verschiedene Ansätze zur Verfügung. An dieser Stelle sind die Wartezeitformel nach HBS (FGSV 2001) sowie die Berechnung der mittleren Wartezeit an einem Knotenpunkt mit VLSA nach Akcelik (1981) zu nennen. Diese Regelwerke setzen die genaue Kenntnis der Signalplanversorgung (Umlaufzeiten, Freigabezeitanteile, etc.) voraus, um angewendet werden zu können. Im Hinblick auf die praktische Anwendung der Bewertung sind die Daten zur Signalsteuerung üblicherweise nicht vorhanden - es kann lediglich damit gerechnet werden, dass es Informationen über den Steuerungstyp eines Knotenpunktes gibt.

Die Berücksichtigungen von Abbiegezuschlägen von *Routingverfahren* erfolgte in bisherigen Arbeiten nur begrenzt, da sich das Vorgehen der belastungsabhängigen Bewertung als große Schwierigkeit herausstellt. Meist werden lediglich statische Zeitzuschläge für Links- und/oder Rechtsabbieger durchgeführt oder bei geradeausfahrenden Abbiegern, wenn diese über einen Knotenpunkt mit VLSA verläuft.

Wird ein Abbiegevorgang betrachtet, so werden die selben Fahrmodi abgedeckt, welche auch für die Befahrung einer Strecke auftreten (siehe Kapitel 3.2.3). Matzoros & Van Vliet (1991) entwickelten ein Emissionsmodell namens *Saturn*, welches die unterschiedlichen Fahrmodi (Cruise, Queuing \equiv Idling, Acceleration, Deceleration) beim Annähern an einen lichtsignalgesteuerten Knotenpunkt berücksichtigt. Abbildung 3.4 (a) zeigt schemenhaft drei Trajektorien, welche je nach Position vor einem signalisierten Knotenpunkt verschiedene Fahrmodi einnehmen. Das vorderste Fahrzeug (Trajektorie 1) erreicht die Haltelinie bei einem Haltesignal. Dabei beendet es den Cruising-Modus, bremst (Deceleration), wartet an der Haltelinie (Queuing), beschleunigt (Acceleration) nach Umschalten auf das Freigabesignal und erreicht wieder den Cruising-Modus. Weitere Fahrzeuge erreichen den Aufstellungsbereich während der Rot- oder der nächsten Grünphase, halten aber nicht an der Haltelinie, sondern hinter den vor ihnen wartenden Fahrzeugen. Die Beschleunigungsphasen der wartenden Fahrzeuge beginnen somit zeitversetzt. Auch Fahrzeuge, welche während einer Grünphase an das Ende des Rückstaus, treffen aber nicht zum Halten kommen, nehmen unterschiedliche Fahrmodi für das Passieren des Knotenpunktes ein (rechte Trajektorie). Die Abfolge dieses Fahrverhaltens an Knotenpunkten lässt sich ebenfalls auf vorfahrtsregelte Knotenpunkte übertragen.

Abbildung 3.4 (b) zeigt beispielhaft den Fahrverlauf eines Linksabbiegemanövers am signalisierten und am vorfahrtsregelten Knotenpunkt (c) mit Kennzeichnung der Haltelinie. Dabei sind die Phasen des Verzögerns vor der Haltelinie mit dem Stillstand bis zum Freigabezeichen und der beschleunigten Kurvenfahrt bis zur Wunschgeschwindigkeit auf der nach-Strecke zu sehen. Beim Abbiegemanöver am unsignalisierten Knoten ist nach der Haltelinie noch die verzögerte Fahrt in den Knotenpunktsbereich zu erkennen und danach die Beschleunigung auf die Wunschgeschwindigkeit.

Geisberger & Vetter (2011) und Volker (2008) haben Überlegungen zur Bestimmung der zu fahrenden Abbiegegeschwindigkeit, Zeitzuschläge für Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge angestellt, welche in den folgenden Absätzen kurz zusammengefasst sind.

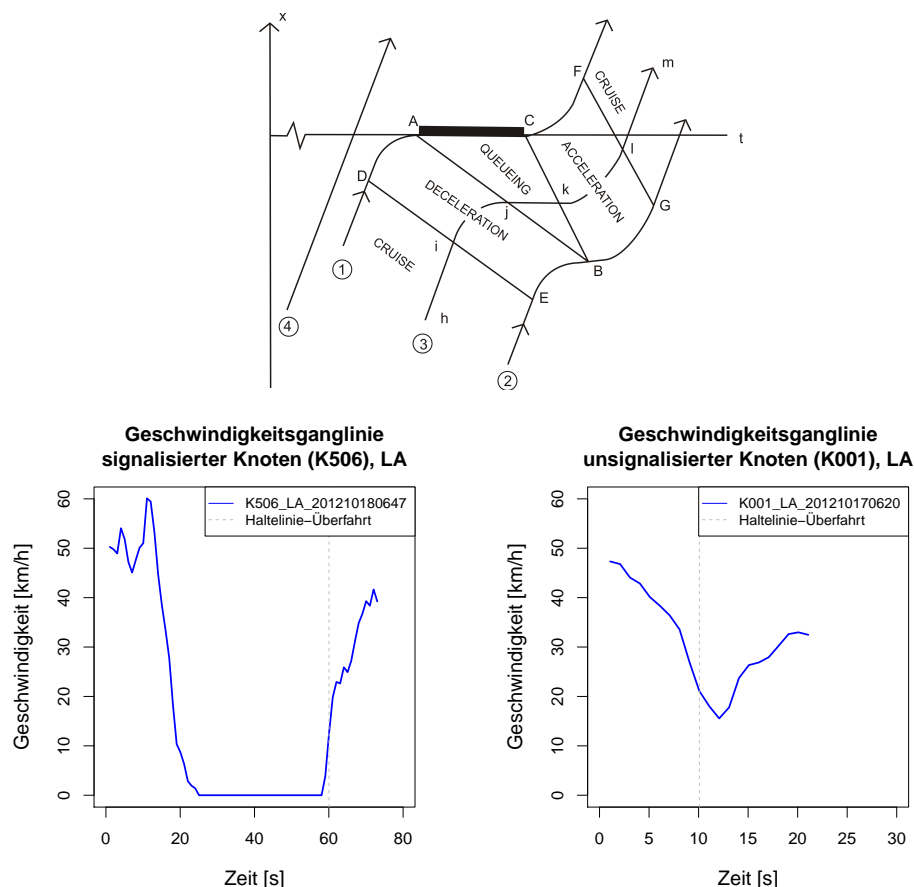


Abbildung 3.4: Darstellung der Fahrmodi an Knotenpunkten. Grafik (oben): Schematische Darstellung der Fahrmodi an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten (Matzoros & Van Vliet 1991). Grafik (unten links): Reale Geschwindigkeitsganglinie eines Linksabbiegers am signalisierten Knotenpunkt. Grafik (unten rechts): Reale Geschwindigkeitsganglinie eines Linksabbiegers am nicht signalisierten Knotenpunkt. GPS-Aufzeichnung der realen Ganglinien mit 1Hz Aufzeichnungsrate im Grazer Stadtgebiet, Oktober 2012.

Abbiegegeschwindigkeit aufgrund des Abbiegewinkels ψ Ein Winkel von $\psi = 0$ bedeutet eine Geradeausfahrt und weist folgenden Wertebereich auf: $-\pi \leq \psi \leq \pi$. Die Geschwindigkeit auf einem Abbieger wird mit folgender Formel bestimmt:

$$v_{winkel} = \left(1 - \frac{|\psi|}{\pi}\right) \cdot \min\{v_{von}, v_{nach}\} \quad (3.2)$$

ψ ... Abbiegewinkel

v_{von} ... Geschwindigkeit der von-Strecke

v_{nach} ... Geschwindigkeit der nach-Strecke

Zeitbedarf für Verzögerungsvorgang t_{dec} Bevor der tatsächliche Abbiegevorgang stattfinden kann, wird wie in Matzoros & Van Vliet (1991) dargestellt, ein Verzögerungsvorgang eingeleitet. Der dafür benötigte Zeitbedarf wird mit folgender Formel bestimmt:

$$t_{dec} = f_{dec} \cdot (v_{von} - v_{turn}) \quad (3.3)$$

t_{dec} ... Zeitbedarf für Verzögerung auf Abbiegegeschwindigkeit

v_{von} ... Geschwindigkeit der von-Strecke

v_{turn} ... Geschwindigkeit während des tatsächlichen Abbiegevorganges

f_{dec} ... Umrechnungsfaktor für Verzögerungswert

Zeitbedarf für Beschleunigungsvorgang t_{acc} Nach der Befahrung des tatsächlichen Abbiegers innerhalb des Knotenbereiches wird auf Geschwindigkeit der Zielgeschwindigkeit beschleunigt, welche gerade für die Energiewertberechnung ausschlaggebend sein kann.

$$t_{acc} = f_{acc} \cdot (v_{nach} - v_{turn}) \quad (3.4)$$

t_{acc} ... Zeitbedarf für Beschleunigung auf Zielgeschwindigkeit

v_{nach} ... Geschwindigkeit der nach-Strecke

v_{turn} ... Geschwindigkeit während des tatsächlichen Abbiegevorganges

f_{acc} ... Umrechnungsfaktor für Beschleunigungswert

Nicht nur die Frage der Bestimmung der Abbiegegeschwindigkeit, abhängig von der tangentialen Beschleunigung (Abbiegekurve) oder des zusätzlichen Zeitbedarfs für das Abbiegemanöver, tritt auf. Auch weitere Kenngrößen, wie das Ausmaß der Beschleunigungen, sind für die Bestimmung der Energiewerte relevant. Deshalb werden zur Untersuchung der Abbiegecharakteristik in dieser Arbeit reale Messungen und Beobachtungen durchgeführt, welche in Kapitel 4.2.1 beschrieben sind. Die in der Literatur angegebenen Einflussfaktoren der Wahrscheinlichkeit, dass Fußgänger den Fahrverlauf unterbrechen können, werden dabei ebenfalls berücksichtigt. Interessant ist zusätzlich der Aspekt, dass Kreuzungspunkte mit mehreren Armen eine höhere Aufmerksamkeit während des Abbiegevorganges benötigen und deshalb der Zeitbedarf mit einem Zuschlag versehen wird. Im Zuge der Messungen wird diese Idee nicht weiter verfolgt.

3.4 Alternative Antriebskonzepte und Fahrverhalten

Die Einführung der Elektromobilität wird von unterschiedlichen Stellen gefordert und unterstützt. Damit sollen erste Maßnahmen gesetzt werden, dem Klimaproblem im Verkehrsbereich entgegenzuwirken ohne die Mobilität der Menschen zu reduzieren. In der Einführung von elektrisch betriebenen ein- und mehrspurigen Fahrzeugen wird das Potential zur Ablöse von Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmotor als auch zur Ergänzung der Nutzung des Öffentlichen Verkehrs gesehen. Im aktuellen Weißbuch der Europäischen Kommission (EC 2011) wird eine 60%ige Reduktion der THG-Emissionen im Verkehrsbereich bis 2050 gefordert.

Betrachtung der Vor- und Nachteile von Elektrofahrzeugen

Ein Elektrofahrzeug ist grundsätzlich ein Fahrzeug mit einem Elektromotor. Es gibt verschiedene Ausführungen, vor allem wenn es sich um Personenkraftwagen (PKW) und leichte Nutzfahrzeuge handelt. Diese weisen Kombinationen mit einem Elektromotor im Antriebskonzept auf - von klassisch batteriegetriebenen Fahrzeugen (BEV) bis hin zu Hybridfahrzeugen aller Art (REEV, HEV, PHEV FCHEV).

Ein Fahrzeug, unabhängig vom Antriebskonzept, muss sich dem Verkehrsfluss anpassen können, somit sind spezifische Mindestanforderungen an die Fahrdynamik aus Gründen der Praxistauglichkeit notwendig und zu erfüllen. Eine wesentliche Limitierung stellt dafür die eingeschränkte Reichweite dar, welche vorrangig durch die Batteriegröße, dem Luftwiderstand, das Gewicht, die Bremsenergieerückgewinnung (Rekuperation), das individuelle Fahrverhalten und die Temperatur der Batterie bestimmt wird.

Ein Elektrofahrzeug weist eine Vielzahl von Vorteilen auf:

- niedriger Wartungsaufwand (weniger mechanische Teile, Bremssystem wird aufgrund der Energierückgewinnung weniger belastet, keine Filterwechsel etc.)
- leiser als bisherige Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmotoren
- im Betrieb werden keine THG-Emissionen produziert
- Rekuperation beim Verzögern, Bergabfahren und Ausrollen
- Laden an der Steckdose möglich
- verschiedenste Möglichkeiten zur Unterstützungen des Energienetzes (als Stromspeicher über die Nachtstunden, zur Überbrückung von Spitzenstunden etc.)
- wenn der Strom aus erneuerbaren Energien gewonnen wird, geht die Produktion von Treibhausgasen im Verkehrsbereich gegen 0.

Es gibt aber auch eine Reihe von Nachteilen:

- geringere Reichweite als bei Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmotoren
- bisher hohe Batteriekosten
- Lebensdauer der Batterie ist um vieles kürzer als Lebensdauer des Fahrzeuges
- lange Ladezeiten
- hohes Gewicht der Batterie
- individuelles Fahrverhalten und Bedürfnisse beeinflussen wesentlich den Stromverbrauch und somit die Reichweite
- aufwändiges Batteriemangement (Kühlung, Heizung etc.) notwendig

Diese genannten Nachteile stellen wesentliche Anforderungen an die Forschung und Entwicklung der Batterietechnologien. Deshalb ist es eine besondere Herausforderung, den Einsatz von Elektrofahrzeugen für den Nutzer möglichst kostengünstig und praxistauglich zu gestalten. An dieser Stelle kann der intelligente Einsatz der Verkehrstelematik, die Einbindung von dynamischen Verkehrsdaten und neuen Ansätzen der Verkehrssteuerung einen wesentlichen Beitrag leisten, mit der begrenzten Reichweite dennoch gewünschte Fahrten zwischen Quelle und Ziele durchführen zu können.

Fahrverhalten von Fahrzeugen alternativer Antriebskonzepte

Das Fahrverhalten von Elektro- und Hybridfahrzeugen wird in hohem Maße durch die Ladekapazitäten und den Verbrauch des Elektromotors bestimmt. Es lässt vermuten, dass sich die Fahrweise und somit die einzelnen Fahrverhaltensmuster in Richtung *Eco-Driving* entwickeln. Eine möglichst sparsame Fahrweise wird angestrebt werden, da auf der einen Seite die gewohnte Vorgangsweise zur Wiederaufladung der Energie (in diesem Fall der Batterien) nicht mehr möglich ist und auf der anderen Seite eine Form des *Wettkampfes* aufkommen wird.

Bisher wurden nur Untersuchungen zum Ladeverhalten angestellt, damit der Bedarf an Ladeinfrastruktur und die Wahl der Aufstellungsstandorte abgeschätzt werden kann. Zum Thema *Fahrverhaltensänderung aufgrund von alternativen Antrieben* hat es bislang noch keine Studien gegeben und diese Aufzeichnungen müssten einer längerfristigen Beobachtung unterzogen werden. Erst danach können Aussagen über eventuelle Veränderungen in den Fahrmustern getroffen werden.

3.5 Einflussfaktoren auf Energiebedarf

Für die Befahrung einer Strecke wird in der Fahrzeugtechnik die fahrzeugspezifische Leistung berechnet, um die aufkommenden Fahrwiderstände (siehe Kapitel 2.3 und 2.4) und die Verluste am Antriebsstrang zu überwinden. Die mikroskopischen Emissionsmodelle PHEM (Hausberger 2003) aus Europa und CMEM (Barth et al. 1999) aus dem US-amerikanischen Raum verwenden diese physikalischen Zusammenhänge für die Berechnung des Kraftstoffverbrauches und des Emissionsaufkommens von einzelnen Fahrzyklen und Fahrzeugtypen. Zur Berechnung werden dafür als Eingangsparameter der Geschwindigkeitsverlauf und die Streckensteigungen und hinterlegte fahrzeug- und motorspezifische Kenngrößen benötigt.

Für diese Arbeit würde eine Berücksichtigung der motorspezifischen Kennwerte *keine* allgemein gültige Formulierung bedeuten. Die Bewertung als *Energiebedarf unter Berücksichtigung von durchschnittlichen Fahrzeugparametern* (wie Fahrzeugmasse, aerodynamische Kennwerte etc.) je definierter Fahrzeugkategorie, wird deshalb angewendet.

Bisher wurden Untersuchungen der Straßennetzbewertung zur Darstellung der Emissionen und des Kraftstoffverbrauches verwendet (siehe Kapitel 2.1). Die ersten und verbreiteten Ansätze zur Schätzung der Emissionen im Straßenverkehr benutzen als Eingangsparameter die durch-

3. ANALYSE DES FAHRVERHALTENS UND DER ENERGIEAUFBRINGUNG

schnittliche Geschwindigkeit und schließen damit direkt auf die Emissionen und den Verbrauch. Diese Ansätze werden stark kritisiert, da die Einflüsse der Umgebung, wie das tatsächliche Verkehrsaufkommen und somit die Auswirkungen auf das Fahrverhalten, nicht berücksichtigt werden. Diese Art der Emissions- und Verbrauchsschätzung wird aus Gründen der Rechenzeit in makroskopischen Modellen angewendet, damit Tendenzen von unterschiedlichen Verkehrsstrategien geschätzt werden können.

Gerade im Hinblick auf häufige, aktive Beschleunigungsvorgänge im niedrigen Geschwindigkeitsbereich aufgrund von erhöhtem Verkehrsaufkommen können die produzierten Emissionen mit diesen Ansätzen nicht adäquat geschätzt werden. Weitere Ansätze haben den unterschiedlichen Streckentyp und den Verkehrszustand in Form von *Level of Service (LOS)* berücksichtigt. Damit wird den realistischen Auswirkungen der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofilen in der durchschnittlichen Schätzung näher gekommen.

Die unterschiedlichen Ergebnisse bei verschiedenen Fahrprofilen zeigt Abbildung 3.5, welche eine Übersicht der Geschwindigkeits- und Energieverläufe für einen durchschnittlichen Euro 4 Diesel Pkw (ohne Berücksichtigung der Nebenverbraucher) darstellt. Dabei werden zwei Zyklen (links NEDC und rechts realer, gemessener Zyklus) gegenübergestellt und der Geschwindigkeitsverlauf als auch der aufsummierte Energiebedarf in [kWh] über den Weg aufgetragen. Es ist zu sehen, dass jeder Beschleunigungsvorgang einen zusätzlichen Anstieg des Energiebedarfs verursacht, bei Verzögerungen und Stillständen der Energiebedarf konstant bleibt und bei Cruisingmanövern der Energiebedarf sich nur leicht erhöht. Im Vergleich der beiden Fahrzyklen ist der Energiebedarf auf der selben zurückgelegten Distanz von 5000 Metern für die reale Fahrt höher als bei dem Normzyklus. In Abbildung 3.5 ist ebenfalls klar zu sehen, dass der NEDC um ca. 35% weniger Energie benötigt, was bei einer Fahrt im Cruising-Modus bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 50km/h eine zusätzlich mögliche Wegstrecke von knapp 900m bedeutet. Dieser signifikante Unterschied bezüglich Energiebedarf und zurückgelegter Distanz ist auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen, welche in diesem Kapitel diskutiert werden.

3.5.1 Einflüsse durch den Umgebungszustand

Verkehrsaufkommen In Abbildung 3.5 wird der höhere Energiebedarf des realen Fahrverlaufs von den Stop&Go-Verhältnissen verursacht. Die Befahrung der Strecke ist mit einem höheren Aufwand durchzuführen, was sich im Energiebedarfswert widerspiegelt.

Unterschiedliche Fahrprofile auf der selben Strecke werden überwiegend durch das umgebende Verkehrsaufkommen und somit der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern und Maßnahmen der Verkehrssteuerung verursacht. Abbildung 3.6 zeigt deshalb vier Fahrverläufe und den berechneten Energiebedarf zur Überwindung der Fahrwiderstände zu unterschiedlichen Tageszeiten und Signalprogrammen (Morgenspitze, Tag, Abendspitze, Nacht). Auf den Abbildungen ist zu sehen, dass für die Befahrung der selben Strecke zu unterschiedlichen Tageszeiten unterschiedlich viel an Energie benötigt wird. Deshalb ist die Information zur *aktuellen Verkehrslage* als wesentlicher Faktor anzusehen und in dieser Arbeit in Form von der möglich zu fahrenden

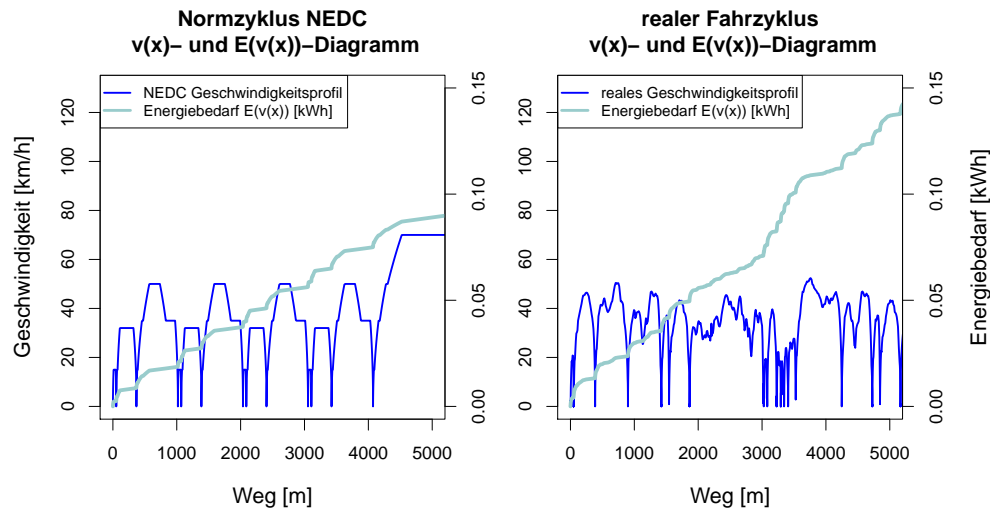


Abbildung 3.5: Darstellung des Energiebedarfs und Geschwindigkeitsprofil des NEDC und eines realen Fahrverlaufs bei einem zurückgelegten Weg von 5000m. Die reale städtischen Fahrt wurde mittels GPS-Technologie im Grazer Stadtgebiet im April 2008 aufgezeichnet. Für beide Fahrzyklen wurde der Energiebedarfswert für ein durchschnittliches Euro 4 Dieselfahrzeug berechnet und aufgetragen.

Geschwindigkeit und den Auslastungsgraden der Strecken zu berücksichtigen.

In Tabelle 3.3 sind die wesentlichsten fahrdynamischen Kenngrößen berechnet und dargestellt. Die zeitlichen Anteile je Fahrmodus während der Fahrt variieren dabei durch unterschiedliche Beeinflussung des Verkehrsaufkommens und der Verkehrssteuerung.

Tabelle 3.3: Kenngrößen der Fahrzyklen aus Abbildung 3.6 unterschiedlicher Tageszeiten mit unterschiedlichen Signalprogrammen.

Kenngröße	Morgen	Tag	Abend	Nacht
Dauer der Fahrt (t) [s]	397	390	386	295
\varnothing Geschwindigkeit (\bar{v}) [m/s]	10.08	10.27	10.36	13.55
\varnothing Geschwindigkeit o. Stillstand (\bar{v}_{run}) [m/s]	11.90	12.48	11.84	13.55
max. Geschwindigkeit (v_{max}) [m/s]	15.84	17.36	17.72	18.06
min. Geschwindigkeit (v_{min}) [m/s]	0.00	0.00	0.00	1.26
\varnothing Beschleunigung (\overline{acc}) [m/s ²]	0.63	0.57	0.68	0.62
\varnothing Verzögerung (\overline{dec}) [m/s ²]	-0.56	-0.54	-0.55	-0.45
Zeitanteil des Stillstandes [%]	13.60	16.67	10.63	0.00
Zeitanteil der Beschleunigung [%]	27.46	29.74	27.20	24.74
Zeitanteil der Verzögerung [%]	29.22	32.05	32.90	31.53
Zeitanteil des Cruisings [%]	29.72	21.54	29.27	43.73

Die Einteilung des Verkehrszustandes wird häufig in Qualitätsstufen, dem sogenannten *Level-of-Service (LOS)*, angegeben. Die Berechnung des LOS basiert dabei auf den Zusammenhängen des Fundamentaldiagramms der Verkehrstheorie von Geschwindigkeit und Verkehrsdichte, wobei die Grenzen vom Anwender selbst definiert werden, und meist nur die Geschwindigkeit als Abgrenzung verwendet wird.

In Modellen, die die aktuelle Verkehrslage bestimmen, wird meist in unterschiedlichen Farben

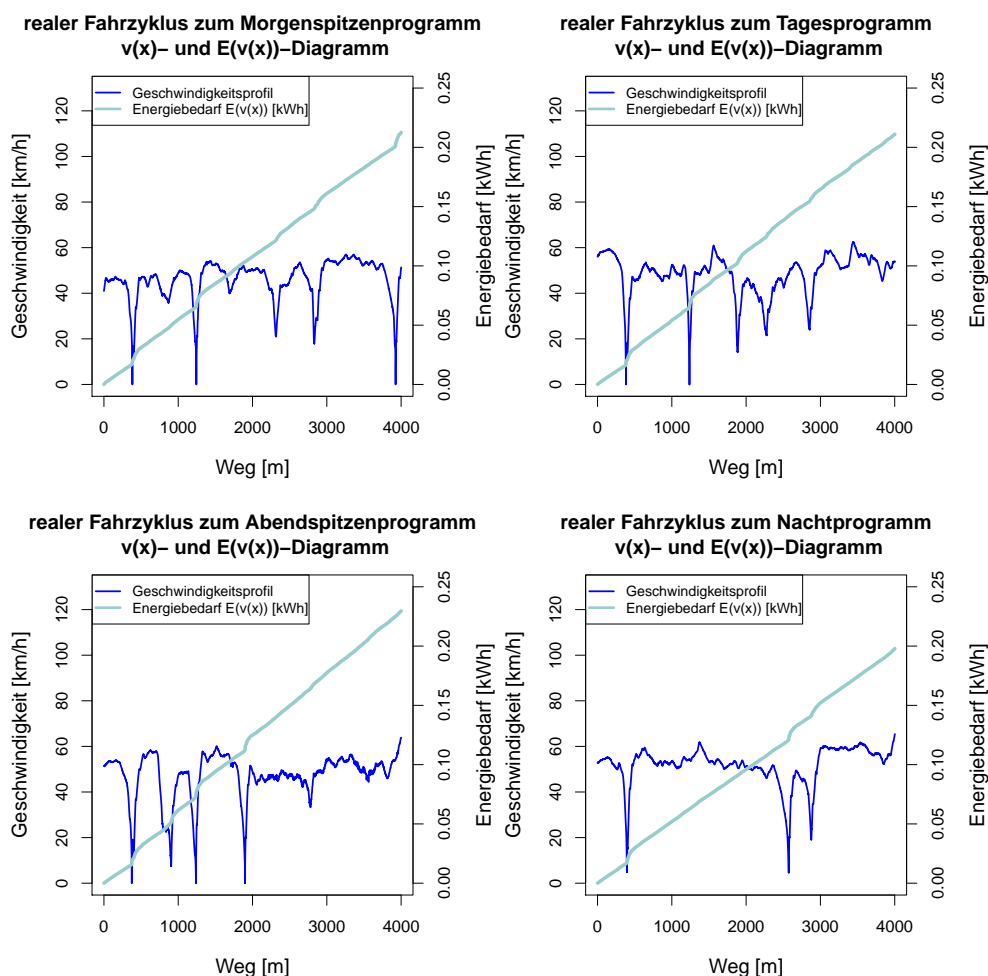


Abbildung 3.6: Energiebedarf von realen Fahrverläufen zu unterschiedlichen Tageszeiten. Die Fahrten wurden im Jänner 2012 mittels GPS-Technologie mit 10Hz Empfangsfrequenz im Grazer Stadtgebiet aufgezeichnet. Die Energiebedarfswerte wurden für ein durchschnittliches Euro 4 Dieselfahrzeug berechnet.

(rot, gelb, grün) der Zustand des Verkehres dargestellt. Die Berechnungsmethodik der Qualitätsangaben sind nicht transparent.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit werden durch Abgrenzung des Auslastungsgrades (aktuelle Gesamtverkehrsstärke durch Streckenkapazität) im stabilen Bereich durchgeführt, damit die Variabilität des Verkehrs bei selbem Verkehrsfluss berücksichtigt werden kann. Der instabile Bereich (Überlastung) wird gemäß der Verkehrstheorie mit dem Auslastungsgrad und Grenzen der Geschwindigkeiten bestimmt. Tabelle 3.4 zeigt die Einteilung der Verkehrszustände aufgrund des Auslastungsgrades, die LOS-Definitionen aus der Verkehrstechnik, dem Highway Capacity Manual (HCM) (TRB 2000), und der Fahrzeugtechnik, dem Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) (INFRAS 2010). In der Fahrzeugtechnik werden vier Verkehrszustände unterschieden und in der Verkehrstheorie sechs Zustände.

Wetter Der Energieverbrauch wird erheblich durch den Einsatz von Nebenverbrauchern gesteigert. In Tabelle 3.5 ist der mittlere Verbrauch der häufigsten Nebenaggregate aufgelistet und zeigt, dass Klimaanlage und Heizung im Fahrzeug den höchsten Verbrauch aufweisen können und somit Problemfälle bei eFahrzeugen sind. Die Information über den aktuellen Wetterzustand

Tabelle 3.4: Einteilung des Verkehrszustandes in Auslastungsgrade und LOS

ID	Wertebereich	LOS nach HCM (2000)	LOS nach HBEFA (3.11)
01	[0.01,0.35)	LOS A	Freeflow
02	[0.35,0.55)	LOS B	Freeflow
03	[0.55,0.77)	LOS C	Heavy
04	[0.77,0.92)	LOS D	Heavy
05	[0.92,1.00)	LOS E	Saturated
06	Überlastung	LOS F	Stop+go

(Windrichtung, Temperatur, Regen, etc.) kann in Form eines Zuschlages für die Nebenverbraucher in der Energiebedarfsberechnung oder durch Kennwertanpassung des Fahrbahnzustandes berücksichtigt werden. Dies hat vor allem Auswirkungen auf die Anwendung einer detaillierten Energieberechnung zur Schätzung von Reichweiten bei eFahrzeugen (Energieverbrauch auch bei Stillstandsphasen!). Bei Berücksichtigung des Energieverbrauches der Nebenaggregate können diese als konstant angenommen werden, sofern sie nicht während der Fahrt abgeschaltet werden. Unterschiedliche Zustände der Fahrbahn können durch Koeffizienten der Fahrbahngriffigkeit, die Einfluss auf den Rollwiderstand haben, eingeführt werden.

Tabelle 3.5: Durchschnittliche Verbrauchswerte der Nebenverbraucher eines PKWs (ÖAMTC 2012)

Aggregat	mittlerer Verbrauch [kW]
HVAC (Heizung, Gebläse und Klimaanlage)	0.1 - 1.5
Scheibenwischer	0.13
Radio	0.02
Navigationssystem	0.01
Abblendlicht	0.12
Sitzheizung Vordersitze	0.20
Heizung Außenspiegel	0.04
Nebelschlussleuchten	0.05
Nebelscheinwerfer	0.11

3.5.2 Einflüsse durch das Fahrzeug

Fahrzeugklassen Die bisherigen Energiebedarfswerte wurden mit den Kennwerten eines typischen Euro 4 Dieselfahrzeuges berechnet. Die physikalischen Zusammenhänge aus (2.2) zeigen, dass das Gewicht eines Fahrzeuges, die Rollwiderstandswerte der Reifen und die aerodynamischen Kennwerte des Fahrzeuges als statische Eingangsgrößen einen Einfluss haben. Tabelle 3.6 lässt die Energiebedarfswerte für unterschiedliche Fahrzeugklassen auf Basis der ersten 5000m des NEDC erkennen. Die Kennwerte für die in Tabelle 3.6 berechneten Fahrzeugklassen wurden

Tabelle 3.6: Kategorien des Energiebedarfs je Fahrzeugklasse (Dieselfahrzeug) des Abschnittes 0 - 5000m des NEDC

Fahrzeugklasse	$E_{roll} + E_{air}$ [kWh]	Δ [%]	E_{acc} [kWh]	Δ [%]	E_{pos} [kWh]	Δ [%]
EURO 0 Diesel	0.0294	0.0	0.0520	0.0	0.0814	0.0
EURO 1 Diesel	0.0295	0.5	0.0538	3.6	0.0834	2.5
EURO 2 Diesel	0.0304	3.4	0.0558	7.4	0.0862	5.9
EURO 3 Diesel	0.0311	5.8	0.0587	13.0	0.0898	10.4
EURO 4 Diesel	0.0317	7.9	0.0621	19.5	0.0938	15.3
EURO 5 Diesel	0.0321	9.3	0.0642	23.6	0.0963	18.4
EURO 6 Diesel	0.0309	5.3	0.0622	19.8	0.0932	14.6

dem mikroskaligen Emissionsmodell PHEM (Hausberger 2003) entnommen. Die darin erstellten Fahrzeugtypen wurden aus zahlreichen Rollenprüfstandsmessungen gebildet und stellen einen Durchschnittstyp pro Klasse dar. In der Tabelle werden die relevanten Energiebedarfswerte für den Roll- und aerodynamischen Widerstand und für die Beschleunigungsvorgänge dargestellt und als E_{pos} , als die aufzubringende Energie am Antriebsstrang, zusammengefasst. Ebenfalls werden die prozentuellen Veränderungen zur Basis der Euroklasse 0 angegeben. Signifikant ist dabei, dass der Energiebedarf in den letzten Jahren gestiegen ist, was auf die größer werdenden Fahrzeuge und das Gewicht zurückzuführen ist. Die Abnahme ab Fahrzeugklasse Euro 5 ist durch die Fortschritte in der Technologieentwicklung des Karosseriebaus bedingt.

Anzumerken ist, dass durch die weiterentwickelten Fahrzeugtechnologien die Effizienz derart verbessert wurde und somit in Summe der Verbrauch trotz des steigenden Gewichtes nahezu gleichbleibend ist.

3.5.3 Einflüsse durch den Fahrer

Fahrerverhalten Wie in Kapitel 2.1 bereits beschrieben wurde, konnte in diversen Studien der erhebliche Einfluss des Fahrverhaltens auf den Kraftstoffverbrauch nachgewiesen werden. Äquivalent dazu ist auch der Energiebedarf zu sehen. Dabei lässt sich der Haupteinflussfaktor auf die Gangwahl und somit die gefahrene Drehzahl reduzieren, welche in der tatsächlichen Leistungsberechnung mit fahrzeugspezifischen Kennwerten, wie Wirkungsgrade der Kraftübertragung und Verluste am Antriebsstrang, ausschlaggebend sind.

Für diese Arbeit ist die Kenntnis über die Verschiebung der Zeitanteile der Fahrmodi durch

den Verkehrszustand von Interesse, die dann eine Verschiebung des Energiebedarfs bewirkt. Im unbelasteten Zustand kommen die Auswirkungen des individuellen Fahrverhaltens im vollen Ausmaß zum Tragen, welche nicht bestimmbar sind. Deshalb werden die Bestimmungen der Fahrmodianteile für niedere Auslastungsgrade von Regelwerken herangezogen, welche auf wenige charakteristische Fahrzyklen zurückgreifen.

Die Berücksichtigung von unterschiedlichem Fahrverhalten könnte in der Energiebewertung nur durch einen definierten *Zuschlag* für extrem aggressive Fahrer durchgeführt werden. Detaillierte Messungen dazu fehlen, um eine Aussage über den Zuschlag treffen zu können.

3.5.4 Einflüsse durch das Verkehrsnetz

Streckensteigungen und -gefälle In Abbildung 3.7 ist der NEDC mit einer Streckensteigung von 0% und 2% und einem Gefälle von -2% dargestellt. Die Energiebedarfsberechnung zeigt, dass für die selbe Befahrung auf einer 2%igen-Steigungsstrecke nahezu 60% mehr Energie benötigt wird als auf einer ebenen Strecke. Würde die Befahrung auf einem Gefälle der Strecke durchge-

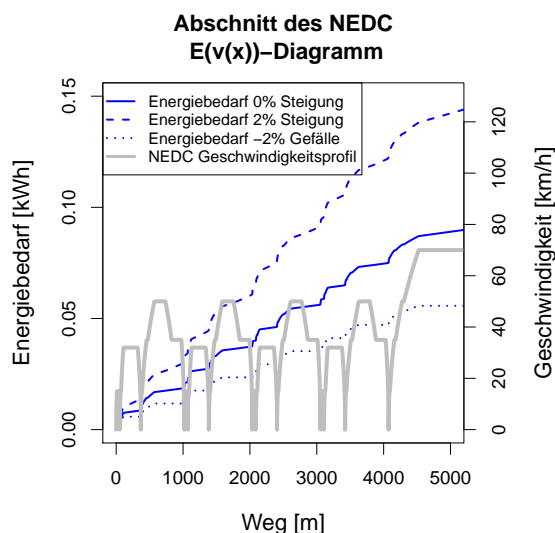


Abbildung 3.7: Vergleich des Energiebedarfs auf 1000m-Abschnitt des NEDC mit den Varianten 0%, 2%, -2%-Streckenlängsneigung. Die Energiebedarfswerte wurden für ein durchschnittliches Euro 4 Dieselfahrzeug berechnet.

führt, wären nur 62% der notwendigen Energie auf ebener Fahrbahn benötigt.

In üblichen Straßenkarten, welche als Basis für die Navigation von Fahrzeugen dienen oder auch als Netzgraph für verkehrstechnische Untersuchungen verwendet werden, sind Steigungen und Gefälle einer Strecke selten bis gar nicht eingepflegt, welche jedoch eine relevante Größe darstellen.

Streckenörtlichkeit Weil auf ländlichen niederrangigen Strecken kaum mit einer hohen Verkehrsbelastung gerechnet werden kann und wenig Alternativstrecken möglich sind, werden in dieser Arbeit nur städtische Straßennetze betrachtet. Hingegen sind im städtischen Gebiet die niederrangigen Strecken von vielen Einflüssen geprägt, wie der Beschilderung, der Verkehrssteuerung an Knotenpunkten oder auch wegen der höheren Wahrscheinlichkeit des Fußgängerverkehrs.

3. ANALYSE DES FAHRVERHALTENS UND DER ENERGIEAUFBRINGUNG

In der Modellierung von Netzen für die Routenplanung oder die Datenaufnahme und -versorgung von Straßenkarten müssen diesbezüglich Abstriche durchgeführt werden und sind deshalb nur im begrenzten Maße vorhanden.

Streckentyp Auf unterschiedlichen Kategorien von Strecken lassen sich unterschiedliche Fahrverhalten beobachten. Somit ist es wichtig die Energiebedarfsschätzung nach Streckentyp differenziert durchzuführen. Eine Unterteilung der Streckentypen nach Tabelle 3.7 ist sinnvoll und wird für die Anwendung vorgenommen.

Tabelle 3.7: Einteilung der zu untersuchenden städtischen Streckentypen in Anlehnung an RVS 03.04.12 (FSV 2001) und HBEFA 3.1 (INFRAS 2010)

Streckentyp	Bezeichnung	räumliche Funktion	Anmerkungen
10	Hochrangige Straße	Durchleiten Verbinden	
20	Hauptstraße	Verbinden Sammeln Erschließen	überwiegend gute LSA-Koordinierung des Hauptstroms
30	Verteilerstraße	Verteilen	starke Nebenströme, Bruch der LSA-Koordinierung notwendig
40	Sammelstraße	Erschließen Sammeln	überwiegend Knotenpunkte ohne LSA
50	Wohnstraße	Erschließen	

Abbiegebeziehung Bei Routenberechnungen, unabhängig, ob Reisezeit- oder Energie-optimiert, sind die Abbiegebeziehungen wesentliche Einflussfaktoren. Deshalb wird die Integration der Abbiegebeziehungen in die Bewertungsmethodik detailliert untersucht. Unterscheidungen nach Steuerungstyp (Knotenpunkt mit/ohne LSA), Abbiegerichtung¹ (geradeaus, links, rechts) und den Ranginformationen bestimmen die Abbiegetypen. In Tabelle 3.8 werden die Rangdefinitionen des Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (FGSV 2001) aufgelistet. In Kapitel 4.3.2 wird geprüft, ob diese Rangeinteilung einen Zusammenhang mit der Bewertungsmethodik aufweist.

Für andere Verwendungen des bewerteten Netzgraphen, wie beispielsweise zur Unterstützung des Energiemanagements in Fahrzeugen, ist zu prüfen, ob die Bewertung von Abbiegerelationen von Wichtigkeit ist.

¹Grundsätzlich wird ein Wechsel von niedrigerem auf höheren Rang als *Einbiegen* und von höherem auf niedrigeren Rang als *Abbiegen* bezeichnet. In dieser Arbeit wird dafür generell der Ausdruck *Abbiegevorgang* verwendet.

Tabelle 3.8: Rangdefinition der Abbiegebeziehungen in Anlehnung an HBS (FGSV 2001)

Rang des Abbiegers	Beschreibung
Rang 1	Geradeausfahrer auf der Hauptstraße Rechtsabbieger von der Hauptstraße
Rang 2	Linksabbieger von der Hauptstraße Rechtseinbieger aus der Nebenstraße
Rang 3	Linkseinbieger aus der Nebenstraße (falls Einmündung) Geradeausfahrer aus der Nebenstraße
Rang 4	Linkseinbieger aus der Nebenstraße

3.6 Zusammenfassung der Einflussfaktoren

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen werden die zu berücksichtigenden Einflussfaktoren in Tabelle 3.9 kategorisch zusammengefasst.

Tabelle 3.9: Empfehlung der zu berücksichtigenden Parameter zur Energiebedarfsberechnung zur Bewertung eines Streckennetzes ohne Kenntnis der fahrzeugspezifischen Informationen wie Lenkerverhalten und Nebenverbraucher.

Umgebungszustand	
Verkehrszustand	variable Geschwindigkeit aus online-Verkehrsmodell
Wetterzustand	variable Koeffizienten zur Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche konstanter Wert für Nebenverbraucher (wird in dieser Arbeit mit 1kWh angesetzt)
Fahrzeug	
Fahrzeugtyp	Kennwerte von durchschnittlichen Fahrzeugtypen
Fahrer	
Fahrerverhalten	bei Etablierung von unterschiedlichen Fahrzeugantrieben, sollten Funktionen angepasst werden
Verkehrswegenetz	
Streckengeometrie	statische Netzinformation (Steigung, Gefälle)
Streckentyp	unterschiedliche Schätzfunktionen der Fahrmodianteile und Raten
Abbiegerelationen	unterschiedliche Schätzfunktionen der belastungsabhängigen und konstanten Parameter

Schlussfolgerungen für diese Arbeit

Werden diese Ansätze zur Emissionsbestimmungen aufgrund von Durchschnittswerten und die Vorgangsweise von mikroskaligen Emissionsmodellen (Hausberger 2003, Barth et al. 1996) in Kombination betrachtet, ergibt sich daraus der gewählte Ansatz:

Aufgrund von Durchschnittswerten der aktuell zu fahrenden Geschwindigkeit und der Zustandsbestimmungen des aktuellen Verkehrsaufkommens werden die unterschiedlichen zeitlichen Fahrmodianteile (Cruising, Beschleunigung, Verzögerung und Stillstand) auf den Strecken mittels generierten Schätzfunktionen bestimmt. Ebenso werden die Raten der Beschleunigung und Verzögerung aus generierten Funktionen festgelegt. Die auftretenden Fahrwiderstände je Fahrmodi werden berechnet, der gesamte Energiebedarfswert für die jeweilige Netzkomponente summiert und in Form einer Streckengewichtung dargestellt.

Darüber hinaus werden die einzelnen Abbiegerelationen ebenfalls mit einer Gewichtung versehen, welche den Energiebedarf der instationären Fahrt im Kurvenverlauf und einen Energiezuschlag als Repräsentant für den zeitlichen Mehrbedarf darstellt.

Die unterschiedlichen Verkehrszustände werden durch Gruppierungen der Schätzfunktionen repräsentiert und können damit berücksichtigt werden.

Energiebedarf als Gewichtungsgröße

Grundsätzlich kann die generierte Datenbasis mit dem entwickelten Bewertungsverfahren für verschiedene ITS-Applikationen für Fahrzeuge im Straßenverkehr verwendet werden, Hinweise dazu werden im Kapitel 5 gegeben. Der Aufbau eines Netzgraphen ist für jede Anwendung gleich, nur die Anforderungen an die Gewichtung, ob positive oder negative Werte oder ein oder mehrere Werte pro Komponente, können unterschiedlich sein.

Um die Methodik der Bewertung validieren zu können, zielt die Bewertung, welche in diesem Kapitel beschrieben wird, auf die Anwendung für Routenberechnungsverfahren ab. Dafür werden die Strecken und Abbieger mit positiven Gewichten vorausgesetzt, welche den Energiebedarf widerspiegeln. Die geschätzte Gewichtung kann somit direkt mit realen Messfahrten verglichen und validiert werden. In den folgenden Kapiteln werden die Annahmen und die Entwicklung dieser Bewertungsmethodik beschrieben.

Damit die Ermittlung des Weges mit üblichen Verfahren zur Routenberechnung durchgeführt werden kann, wird aus einem Verkehrsnetz $V(K, S, A)$ mit Knoten, Strecken und Abbiegern ein Netzgraph mit Strecken, Abbiegebeziehungen und Kosten aufgebaut. Die Kosten einer Route setzt sich aus den Gewichten für das Befahren einzelner Strecken (Kanten l_i) mit der Bezeichnung $w(l_i)$ und den Abbiegemanövern von einer Kante auf eine andere Kante $w(l_i, l_{i+1})$ zusammen. Die gesamten Kosten eines Weges ($W(P_{od})$) mit i als Anzahl der Netzelemente des Weges und w_i als Widerstand des einzelnen Netzelementes i ist wie folgt definiert:

$$W(P_{od}) = \sum_{i=1}^d w_i \implies W(l_1, l_d) = \sum_{i=1}^d w(l_i) + w(l_i, l_{i+1})$$

Welcher Algorithmus auch immer für die Berechnung des Weges angewendet werden soll, Ziel ist es die kostengünstigste Route zwischen der Anfangskante l_1 und der Zielkante l_d zu finden.

$$W(l_1, l_d) = \min \{w(l_i) + w(l_i, l_{i+1})\}$$

Die Unterscheidung in Kanten- und Abbiegegewichtung ermöglicht zusätzlich das Einführen von Abbiegeverboten, indem unendlich hohe Kostensätze auf den Abbieger zugeordnet werden.

In dieser Arbeit stellen die Kosten jeder Strecke den *Energiebedarfswert* zur Überwindung der auftretenden Fahrwiderstände für die Streckenbefahrung dar und ist dieser von der aktuellen Verkehrssituation (vc), der zu fahrenden durchschnittlichen Geschwindigkeit (\bar{v}) als auch vom

4. ENERGIEBEDARF ALS GEWICHTUNGSGRÖSSE

Streckentyp (*linktype*) und der Streckenlänge (*s*) abhängig ($w_i(vc, v, linktype, s)$). Die Kosten der Abbiegebeziehungen werden als *Energiebedarf inkl. Zuschlag* für das Abbiegemanöver $w(k, turntype, vc)$ mit den ebenfalls aufkommenden Fahrwiderständen bezeichnet und werden vom Knotenpunktstyp *k*, Abbiegetyp *turntype*, Verkehrsaufkommen *vc* beeinflusst.

Annahme zur Gewichtungsmethodik Für die entwickelte Methode liegt die Annahme zugrunde, dass sich Fahrverhaltensmuster auf Streckenabschnitten und bei Abbiegemanövern unter ähnlichen Rahmenbedingungen in selber Form wiederholen. Die wesentlichen Beeinflussungen stammen dabei aus der Interaktion mit den umgebenden Fahrzeugen im Verkehrsfluss und den infrastrukturellen Gegebenheiten wie Streckengeometrie, Knotenpunkte und Installationen zur Verkehrsflussregelung.

Ziele der Gewichtungsmethodik

Fahrzeug-Unabhängigkeit Durch Darstellung des Energiebedarfs für Fahrzeugklassen werden durchschnittliche und repräsentative Kenngrößen von Fahrzeugtypen für die Berechnung der Fahrwiderstände verwendet. Somit wird eine Anwendbarkeit unabhängig von individuellen Fahrzeugen, welche die genaue Kenntnis von fahrzeugspezifischen Kenngrößen voraussetzen würde, gewährleistet.

online-Fähigkeit Das Bewertungsverfahren wird entsprechend konzipiert, dass aktuelle Verkehrslagedaten aus online-Systemen als auch aktuelle Wetterdaten verwendet werden können.

Anwendbarkeit Die Bewertungsmethodik soll für weitreichende Netzgrößen anwendbar sein. Im Zuge dieser Arbeit wurde der Algorithmus exemplarisch auf das Wiener Stadtgebiet mit 45.000 Links und knapp 80.000 Abbiegerelationen angewendet.

Arbeitsschritte zur Erfüllung der Ziele

1 - Grundlagen Untersuchung der einfließenden Größen der Energiebedarfsberechnung und Zusammenfassung von Gruppenspezifika.

2 - Aufbau Verkehrsflussmodell Zur Datengenerierung werden verschiedene Verkehrsflussmodelle erstellt und kalibriert. Mit den simulierten Fahrverläufen (gleichzusetzen mit realen GPS-Trajektorien) können die Fahrmodi-Anteile und vor allem die Beschleunigungs- und Verzögerungsraten unter verschiedenen Verkehrszuständen untersucht werden.

3 - Entwicklung von Schätzfunktionen Die Zusammensetzungen der Anteile von verschiedenen Fahrmodi für unterschiedliche städtische Streckentypen (Stadtautobahn, Hauptstraßen, Verteilerstraßen, Sammelstraßen und Wohnstraßen) mit verschiedenen Verkehrszuständen werden untersucht. Die Trajektorien aus dem mikroskopischen Verkehrsflussmodell und die Datenbasis des Handbuchs für die Berechnungen von Emissionen im Straßenverkehr INFRAS (2010) werden analysiert.

4 - Entwicklung von Abbiegezuschlägen Der Aufwand für jeden Abbiegevorgang abhängig von Abbiegerichtung und Auslastungsgrad, wird untersucht und in Form eines belastungsabhängigen Energiezuschlages integriert. Die Kenngrößen für die Berechnung bei Abbiege- manövern werden aus aufgezeichneten Fahrzyklen einer Messkampagne entwickelt.

5 - Validierung Die Bewertungsmethodik wird für Strecken und Abbiegebeziehungen angewendet und mit den Ergebnissen eines mikroskaligen Emissionsberechnungsmodells verglichen.

Die Bewertungsmethodik für Strecken und Abbieger wird in Abbildung 4.1 dargestellt. Dabei ist der routingfähige Straßennetzgraph mit den notwendigen statischen Informationen der einzelnen Netzkomponenten zugrunde gelegt. Aufgrund der aktuellen Verkehrslage werden die möglich zu fahrende Geschwindigkeit und die Kenngröße zur Festlegung des Verkehrsaufkommens (Auslastungsgrad oder LOS) auf den einzelnen Straßensegmenten festgestellt. Mit den Informationen zum Verkehrsaufkommen und der Streckencharakteristik als Eingangsgrößen lassen sich die entwickelten Schätzfunktionen zur zeitlichen Verteilung der Fahrmodianteile bestimmen. Ebenfalls werden die zugehörigen Beschleunigungs- und Verzögerungsfunktionen zur Feststellung der Raten identifiziert. Durch Kenntnis der Fahrmodianteile, Durchschnittsgeschwindigkeit und Beschleunigung-/Verzögerungsraten lässt sich der Energiebedarf für die Befahrung der Strecke berechnen und kann als Streckengewichtung in den Graphen eingepflegt werden (Kapitel 4.1). Neben den Strecken benötigen auch die Knotenpunkte und somit die einzelnen Abbiegebeziehungen eine Gewichtung. Dafür wurde die Form des *Energiezuschlages* in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens und des Abbiegetypes gewählt. Für die Bewertung der Abbieger werden nicht die einzelnen Zeitanteile der Fahrmodi für die Berechnung herangezogen, sondern eine Kombination aus belastungsabhängigem Zeitbedarf und auftretenden Fahrwiderständen (Kapitel 4.2).

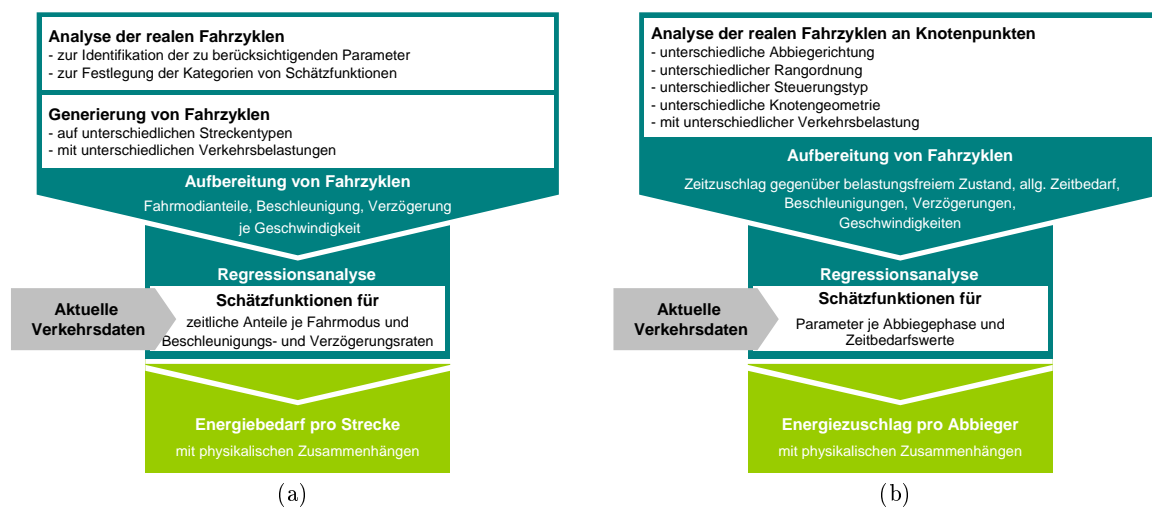


Abbildung 4.1: Konzeptionelle Darstellung der Gewichtungsmethodik für Strecken und Abbiegerelationen. (a) Streckengewichtung, (b) Gewichtung der Abbiegerelationen.

4.1 Verfahren zur Streckenbewertung

Wie in Kapitel 3 bereits diskutiert wurde, besteht eine Fahrt aus unterschiedlichen Fahrmodi, wobei unterschiedliche Fahrwiderstände auftreten. In Tabelle 4.1 werden nochmals diese Fahrverhaltensmuster zusammengefasst und mit der notwendigen Energie zur Überwindung der auftretenden Fahrwiderstandskräfte in Bezug gestellt. Der Fahrmodus *Creeping* wurde aus Gründen der Vollständigkeit angeführt, welches das Herantasten an eine LSA repräsentiert.

Tabelle 4.1: Notwendiger Energiebedarf bei verschiedenen Fahrmodi während einer Streckenbefahrung.

Fahrmodus	E_{roll}	E_{air}	E_{acc}	E_{dec}	E_{grade}	E_{aux}
Cruising	×	×			×	×
Idling						×
Deceleration	×	×		×	×	×
Acceleration	×	×	×		×	×
Creeping	×	×			×	×

Für die Belegung der einzelnen Strecken mit Gewichten müssen die Zeitanteile der jeweiligen Fahrmodi, um ein Fahrzeug in Bewegung zu bringen, mittels entwickelter Funktionen (siehe Kapitel 4.3) bestimmt werden. Die Verteilungen der Zeitanteile je Fahrmodus verschieben sich aufgrund der bereits diskutierten Einflussfaktoren. Die Summe der Energieaufbringung für die jeweiligen Fahrmodi bestimmt den gesamten Energiewert pro Strecke (E_{link}), siehe (2.3) und (4.1).

$$E_{link} = E_{cruise} \times p_{cruise} + E_{acc} \times p_{acc} + E_{dec} \times p_{dec} + E_{idle} \times p_{idle} \quad (4.1)$$

$$E_{cruise} = E_{roll} + E_{air} + E_{grade} + E_{aux} \quad (4.2a)$$

$$E_{idle} = E_{aux} \quad (4.2b)$$

$$E_{acc} = E_{roll} + E_{air} + E_{grade} + E_{acc} + E_{aux} \quad (4.2c)$$

$$E_{dec} = E_{roll} + E_{air} + E_{grade} + E_{dec} + E_{aux} \quad (4.2d)$$

E_{link}	...Energiebedarfswert einer Strecke (link)[kWh]
E_{cruise}	...Energiebedarf für Fahrwiderstände im Cruisingmodus [kWh]
E_{idle}	...Energiebedarf im Fahrzeugstillstand [kWh]
E_{acc}	...Energiebedarf für Fahrwiderstände während der Beschleunigung [kWh]
E_{dec}	...Energiebedarf für Fahrwiderstände während der Verzögerung [kWh]
p_{cruise}	...zeitlicher Anteil im Cruisingmodus [%]
p_{idle}	...zeitlicher Anteil im Stillstand [%]
p_{acc}	...zeitlicher Anteil im Beschleunigungsmodus [%]
p_{dec}	...zeitlicher Anteil im Verzögerungsmodus [%]

4.1.1 Untersuchung des Fahrverhaltens auf Strecken

Die Erstellung von Schätzfunktionen bedarf einer großen Anzahl von Beobachtungsfahrten. Zeitgleich muss die Kenntnis über den aktuellen Verkehrszustand und des Streckentyps vorhanden sein, um eine Klassifizierung der erhobenen Daten durchführen zu können. Weitreichende Messkampagnen mit allen technischen Voraussetzungen und Einbeziehung von infrastrukturell erhobenen Messdaten sind dafür notwendig, was aber mit erheblichen Kosten verbunden und meist nur schwer realisierbar ist. Für diese Arbeit wurden einerseits Daten aus aufgezeichneten Messfahrten herangezogen (teilweise von Regelwerken), welche die Qualitätsansprüche und Abdeckung der Umgebungsdaten erfüllen, aber eine geringe Datenbasis aufweisen. Andererseits wurde eine mikroskopische Verkehrsflusssimulation zur Generierung zusätzlicher Daten aufgebaut.

4.1.2 Verwendung von realen Fahrzyklen

Aufgrund der technologischen Entwicklungen werden in der Verkehrsflussanalyse fahrdynamische Aufzeichnungen immer häufiger mittels GNSS-Technologie (Global Navigation Satellite System) durchgeführt. Dabei wird die durch stationäre Messstationen beschränkte Möglichkeit zur Aufnahme von fahrdynamischen Kenngrößen überwunden und ein wesentlicher Beitrag in der Steigerung der Untersuchungsqualität durch Generierung weiterer Beobachtungsgrößen geleistet. Bei dieser Technologie sind jedoch Einschränkungen in der Empfangsqualität abhängig von verschiedensten Gegebenheiten, wie Bebauungsgrad der Bereiche neben der Fahrbahn und der Wetterzustand, der Fall. Um Fahrverhaltensuntersuchungen anzustellen, ist eine lückenlose Aufzeichnungsrate von mindestens 1Hz auf unterschiedlichen Streckentypen und verschiedenen Verkehrszuständen notwendig. Um diesen Qualitätsansprüchen gerecht zu werden, ist eine Datenaufzeichnung im Feld sehr schwierig.

Für diese Arbeit werden die Fahrzyklen des *Handbuchs für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA)* (INFRAS 2010) der Version HBEFA 3.1 untersucht, welche als Berechnungsbasis für die Emissionen dienen und im Januar 2010 in der aktuellen Version veröffentlicht

wurden. Diese Fahrzyklen stellen unter Messprogrammen durchgeführte Fahrten dar, die unterschiedliche Fahrer und Fahrzeuge absolvierten, um den Einfluss von verschiedenem Fahrverhalten mit einzubeziehen. Die aufgezeichneten Rohdaten wurden verarbeitet und die Emissionswerte gebildet. Diese können abhängig von Emissionsart, Fahrzeugkategorie sowie -größe, Verkehrssituation, Streckentyp und Längsneigung angewendet werden. Bei der Emissionsart wird zwischen Emissionen im betriebswarmen Zustand, Kaltstart- und Verdampfungsemissionen unterschieden. Bei der Fahrzeugkategorie stehen sowohl Personenkraftwagen als auch Nutzfahrzeuge oder Zweiräder in diversen Varianten zur Verfügung. Die vorgegebenen Verkehrssituationen spiegeln sowohl unterschiedliche Streckentypen als auch unterschiedliche Verkehrsbelastungen und Fahrverhalten wider. Auch Längsneigungen der Strecken können zwischen -6% und +6% differenziert berücksichtigt werden. Diese Rohdaten der einzelnen Fahrverläufe ergeben knapp 1.200 Zyklen jeweils für PKW, leichte Nutzfahrzeuge, LKW und einspurige motorisierte Fahrzeuge.

Bei Untersuchung der HBEFA-Zyklen zeigt sich, dass die Anzahl der unterschiedlichen Fahrverläufe je Kategorie (Streckentyp und LOS) sehr gering ist. Jedoch weisen diese Zyklen eine hohe Qualität auf, um die Grundgesamtheit des Verkehrsaufkommens möglichst gut abzubilden. Vorallem die Raten für Beschleunigungen und Verzögerungen, welche die Haupteinflussfaktoren der Emissionsberechnung darstellen, sind sehr signifikant.

Um eine größere Stichprobe für die Untersuchungen zu erhalten, wurden weitere Fahrverläufe in Form der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation durchgeführt. Gerade im Hinblick auf die erhöhte Datenmenge und das Spektrum der Geschwindigkeiten können die Randbereiche bei Erstellung von Schätzfunktionen besser abgedeckt und signifikante Aussagen getroffen werden. Die Simulation wurden mit den qualitativ hochwertigen Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten der HBEFA-Zyklen kalibriert.

4.1.3 Mikroskopische Verkehrsflusssimulation

In einer Simulation bewegen sich Fahrzeuge nicht nach physikalischen Gesetzmäßigkeiten, sondern unter Berücksichtigung der Antriebstechnologie, menschlicher Wahrnehmung und Verhalten bzw. Ziele der einzelnen Fahrer. Die mikroskopische Verkehrsflusssimulation stellt wesentliche Vorteile bei der Analyse von Verkehrssteuerungsstrategien dar, vor allem, wenn unterschiedliche Varianten getestet werden sollen. Wenn das Verkehrsflussmodell kalibriert ist, kann es realistische Fahrzyklen produzieren (Fellendorf & Vortisch 2001). Die Fahrzeuge in der Simulation werden durch die Fahrzeugposition und Geschwindigkeit, den Abstand zu den umgebenden Fahrzeugen, den aktuellen Fahrstreifen und eine Route mit hoher Auflösung aufgezeichnet und repräsentiert. In Hirschmann et al. (2010) wurden mittels Simulation die Auswirkungen einer veränderten Signalsteuerung im städtischen Gebiet auf die Produktion der Emissionen untersucht und einem internationalen Publikum vorgestellt. Das dabei entwickelte Werkzeug bestand aus einer Kopplung eines mikroskopischen Verkehrsflussmodells, eines mikroskopischen Emissionsmodells und einem emulierten Steuerungskern eines adaptiven Verkehrssteuerungsverfahrens. Die bislang

bekanntem Kalibrierungsmaßnahmen zur Anpassung des Fahrverhaltens verlangten eine neue Betrachtungsweise für die emissionstechnische Bewertung. Der Schwerpunkt wurde auf die umweltwirksamen Größen wie der Beschleunigung, Verzögerung und Beobachtung des Energieabbaus durch abrupten Stillstand gelegt. Am Beispiel der Beschleunigung war klar zu sehen, dass die Standardbelegung der Beschleunigungsverteilung in der Simulationssoftware für eine Nachbildung des Fahrverhaltens zur Messung von umweltwirksamen Kenngrößen unbrauchbar ist. In üblichen Verkehrsmodellen wird versucht, ein möglichst breites Spektrum an Fahrweisen abzubilden. Diese Implementierung mag für sehr viele Anwendungsfälle ausreichend sein, doch nicht, wenn Einzelfahrzeuge und -zyklen untersucht werden. Um die Standardbeschleunigungen des Modells dem tatsächlichen Fahrverhalten anzupassen, wurden in dieser Studie Aufzeichnungen von Messfahrten herangezogen und verglichen.

Weitere Untersuchungen, wie in Kraschl-Hirschmann et al. (2011) vorgestellt, haben die Erfahrungen zur Kalibrierung von Verkehrsflussmodellen, um möglichst realistische Fahrverläufe zu simulieren, erheblich erweitert.

Für das Simulieren von Fahrverläufen wird das Simulationsmodell *VISSIM* (PTV AG 2011) gewählt. *VISSIM* (Verkehr In Städten SimulationsModell) ist ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell, welches den Individualverkehr, den Öffentlichen Verkehr sowie Rad- und Fußgänger simulieren kann. Das Fahrverhalten der Fahrzeuge im städtischen und Außerortsbereich kann durch unterschiedliche Parametersätze des psycho-physischen Wahrnehmungsmodells nach (Wiedemann 1974) beeinflusst werden.

In diesem Modell werden die Fahrzeuge im Netz als Fahrer-Fahrzeug-Einheiten (FFE) bezeichnet und haben stochastisch zugeteilte Charakteristika, wie Fahrzeuglänge, Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigungsvermögen aber auch psycho-physische Wahrnehmungsgrenzen des Fahrers, wie Schätzvermögen, Sicherheitsempfindungen und Risikobereitschaft, die das Fahrverhalten bestimmen. Zusätzlich können Parametersätze zum allgemeinen Fahrverhalten modifiziert werden und Verteilungsfunktionen der Beschleunigungs- und Verzögerungsraten vorgegeben werden.

Dabei ist zu beachten, dass die Stochastik des Verkehrsverhaltens in der Simulation ein großes Datenrauschen verursacht, wodurch eine Vorverarbeitung zur Generierung von Funktionen gefordert wird. Kapitel 4.3 beschäftigt sich mit diesem Thema im Detail.

4.1.4 Modellkalibrierung für energierelevantes Fahrverhalten

In *VISSIM* sind bereits Beschleunigungs- und Verzögerungsfunktionen für die jeweiligen Fahrzeugklassen hinterlegt. Das Forschungsprojekt *GAVe* (Grazer Adaptive Verkehrssteuerung) zeigte klar, dass bei emissionstechnischen Untersuchungen die Kalibrierung von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen einen besonderen Stellenwert erhalten müssen (Hirschmann et al. 2009).

Aufgrund der Implementierungen der Algorithmen zum Fahrverhalten in *VISSIM* hat die aktuelle und zu erwartende Verkehrssituation Einfluss auf die Wahl der Beschleunigung oder Verzögerung jeder FFE. Das bedeutet, dass die Abstände und Relativgeschwindigkeiten zu allen Nachbarfahrzeugen (stromaufwärts und stromabwärts auf dem eigenen Fahrstreifen und den Nachbarstreifen),

4. ENERGIEBEDARF ALS GEWICHTUNGSGRÖSSE

die Spurwechselsituation (sowohl während eines Spurwechsels als auch davor und eine gewisse Zeit danach), die Route des Fahrzeugs (mit bevorstehenden Langsamfahrbereichen, Querverkehrsstörungen, Konfliktflächen, Signalgebern, Stoppschildern, Verbindungsstrecken) und ggf. Haltestellen oder Parkplätze für die Wahl berücksichtigt werden.

Im Modell werden sowohl zwischen Maximal- und Wunschbeschleunigung als auch Maximal- und Wunschverzögerung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit unterschieden. Im Benutzerhandbuch von VISSIM (PTV AG 2011) sind diese vier Verteilungsfunktionen folgendermaßen definiert:

Maximale Beschleunigung stellt die technisch machbare Beschleunigung dar und gibt eine Begrenzung nach oben hin an. Relevant wird diese Funktion, wenn die Geschwindigkeit gleich bleiben soll und es aufgrund von Steigungen höhere Beschleunigungen als in der Wunschbeschleunigung angegeben, notwendig ist.

Wunschbeschleunigung wird in allen Fahrmanövern in Abhängigkeit der Geschwindigkeit verwendet.

Maximale Verzögerung stellt die technisch machbare Verzögerung dar und gibt eine Begrenzung nach oben hin an. Bei Steigungen und Gefälle einer Strecke wird die Verzögerung um $\pm 0.1m/s^2$ je 1% Steigung oder Gefälle angepasst.

Wunschverzögerung wird bei allen Fahrmanövern in Abhängigkeit der Geschwindigkeit verwendet. Falls diese niedriger als die maximale Verzögerung ist, kann diese Funktion als obere Grenze für folgende Fälle angesehen werden: bei Wunschgeschwindigkeitsentscheidungen, beim Aufrücken auf das Vorderfahrzeug im Stop&Go-Verkehr, bei Nothalteposition bei Verbindern, bei zu geringem Seitenabstand beim Überholmanöver am selben Fahrstreifen und beim kooperativen Bremsen.

Die *Verteilungsfunktion der Maximalbeschleunigung* gibt eine Obergrenze für die FFE Beschleunigung eines Fahrzeugtyps vor, welche abhängig von der aktuellen Geschwindigkeit bestimmt und in Abhängigkeit von einer Steigung reduziert oder bei Gefälle erhöht wird. Die *Wunschbeschleunigungsfunktion* wird analog verwendet, aber ohne Einfluss der Steigung. Die volle Maximalbeschleunigung (bzw. das Minimum von Wunschbeschleunigung und Maximalbeschleunigung) kommt im Grunde nur bei einer freien Beschleunigung ohne jegliche Behinderung oder abzusehende Verzögerung innerhalb der maximalen Vorausschauweite zum Einsatz. Das ist der Fall, wenn sich eine FFE im Interaktionszustand *frei* befindet und mindestens 10% außerhalb des Wunschsicherheitsabstands und die Geschwindigkeit noch merklich unterhalb der Wunschgeschwindigkeit liegen. Nur die Steigung oder das Gefälle einer Strecke haben einen Einfluss auf Maximalbeschleunigung und Maximalverzögerung - das bildet den grundlegenden physikalischen Zusammenhang ab. Alle sonstigen Einflüsse auf die Wahl der Beschleunigung/Verzögerung gehören zum Verhalten des Fahrzeugfolgemodells.

Um eine stochastische Verteilung für das Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten zu erhalten, besteht jede Funktion zusätzlich aus zwei Teilfunktionen, welche die Bandbreiten kennzeichnen. Somit besteht jede Verteilungsfunktion aus dem Median und der maximalen und minimalen Begrenzungslinie. Die Standardbelegungen der maximalen Beschleunigungsverteilung in VISSIM

entsprechen mit geringen Adaptionen den Werten im Verkehrsflussmodell von Wiedemann (Wiedemann 1974) und wurden 2004 im Rahmen des Forschungsprojektes RoTraNoMo (Road Traffic Noise Model) für PKWs (EC 2002) verglichen. Die Verteilungsfunktionen für den LKW-Verkehr wurden mittels den Daten aus dem CHAUFFEUR 2-Projekt (Automated road transport and vehicles under electronic control) kalibriert. An dieser Stelle ist aus Gründen der Vollständigkeit zu erwähnen, dass die Funktionen der Straßenbahnen und Busse von den Daten der Karlsruher Verkehrsbetrieben aus dem Jahre 1995 generiert wurden.

In der Bandbreite (durch maximale und minimale Funktion begrenzt) können die Beschleunigungen bei einer bestimmten Geschwindigkeit liegen. Aufgrund der Stochastik des Verkehrs und ebenso abgebildet im Modell, wird der Beschleunigungswert aufgrund eines Zufallswertes jeder FFE festgelegt. Dieser Zufallswert ist normalverteilt mit Mittelwert 0.5, einer Standardabweichung von 0.15 und einer Begrenzung von $[0.1, 1.0]$. Das bedeutet, dass der Abstand zwischen dem Median und der minimalen und maximalen Funktion das 3.333-fache der Standardabweichung darstellt. Wenn dieser Wert kleiner als 0.5 ist, wird er linear auf den Bereich zwischen Minimum (0.0) und Median (0.5) interpoliert, wenn der Wert größer als 0.5 ist, linear zwischen Median und Maximum (1.0). Im Anschluss daran wird der Wert der Steigung oder des Gefälles angepasst. Bei LKW-Beschleunigungen werden keine Zufallswerte verwendet, sondern der Beschleunigungswert wird aufgrund des Verhältnisses von Leistung zu Gewicht bestimmt.

Für die Entwicklung einer Verteilungsfunktion für Beschleunigungen von niederrangigen Strecken im städtischen Gebiet wurden bereits in Hirschmann et al. (2009) die aufgezeichneten, sekundlichen Fahrverlaufsdaten von über 40 Stunden herangezogen. In Hirschmann & Zallinger (2009) werden Ergebnisse des Vergleichs der berechneten Emissionen aus den Fahrverläufen der realen Messfahrten mit den Emissionen der simulierten Fahrten der FFE beschrieben. Dabei konnte gezeigt werden, dass mit einem kalibrierten, mikroskopischen Verkehrsflusssimulationsmodell wie VISSIM, realistische Fahrverläufe gut abbildbar und energierelevante Untersuchungen durchführbar sind.

4.1.5 Beschreibung der Simulationsumgebung zur Datengenerierung

Auf Basis der HBEFA-Zyklen wurden Verteilungsfunktionen für Beschleunigungen und Verzögerungen für jeden untersuchten Streckentyp entwickelt und für die jeweiligen Simulationsläufe herangezogen. Auf Basis der auftretenden sekundlichen Beschleunigungen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit $a(v)$ wurden Segmente von 5km/h-Geschwindigkeitsraster gebildet und die durchschnittlichen positiven und negativen Beschleunigungen berechnet. Die Bildung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Werte pro Geschwindigkeitssegment wurden mit den 50-80-99%-Quantilwerten für die positive Beschleunigung und die 1-2-5%-Quantilwerten für die Verzögerung durchgeführt. Die Festlegung der Quantile hat sich aufgrund von zahlreichen Forschungsarbeiten in der Simulationskalibrierung als die effektivste Verteilung bei Fahrverlaufuntersuchungen und Emissionsauswirkungen herauskristallisiert. In Anhang A werden die entwickelten Funktionen der unterschiedlichen Streckentypen dargestellt.

4. ENERGIEBEDARF ALS GEWICHTUNGSGRÖSSE

Für die Kalibrierung des mikroskopischen Fahrverhaltens der FFE wurden zusätzlich die Parameter des *Fahrzeugfolgmodells*, wie in Hirschmann et al. (2009), angepasst. Außerdem wurden die *Langsamfahrbereiche* an Knotenpunkten und *Wunschgeschwindigkeiten* je nach Untersuchungsgebiet festgelegt.

Nach den Kalibrierungsvorgängen wurden Simulationen zur Untersuchung der unterschiedlichen Streckentypen wie in Tabelle 4.2 dargestellt, durchgeführt. Vor allem im städtischen Gebiet sind

Tabelle 4.2: Aufgebaute Simulationsumgebungen zur Untersuchung des Fahrverhaltes auf unterschiedlichen städtischen Streckentypen

Nr	Streckentyp	Simulationsumgebung
10	hochrangige Straße	städtische Autobahn (80 - 100 km/h)
20	Hauptstraße	mehrstreifiger Streckenzug inkl. LSA (bis 60 km/h)
30	Verteilerstraße	viel befahrener Streckenzug inkl. verkehrsabhängiger und festzeitgesteuerter LSA (bis 50 km/h)
40	Sammelstraße	städtische Nebenstraßen (bis 40 km/h)
50	Wohnstraße	kein Aufbau einer Simulationsumgebung

die Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten schwer zu identifizieren. Knotenpunkte mit VLSA und meist geringem Abstand zueinander beeinflussen den Verkehrsfluss wesentlich und somit auch den individuellen Fahrverlauf. Deshalb ist bei der Generierung der Datenbasis zur Entwicklung der Schätzfunktionen darauf zu achten, dass der überwiegende Einfluss der VLSA-Steuerungen nicht miteinbezogen wird. Die Daten müssen deshalb möglichst unbeeinflusst von LSA-Aktionen aufgezeichnet werden, aber im Gegenzug das Verkehrsaufkommen noch realistisch repräsentieren.

4.2 Verfahren zur Bewertung von Abbiegerelationen

Bereits in Kapitel 2.4 wurde darauf hingewiesen, dass für die Energieberechnung entweder die zeitliche oder räumliche Information vorhanden sein muss. Die Abbiegebeziehungen in Verkehrsnetzen werden ohne Längenangaben versorgt (siehe Kapitel 3.3), weshalb das Berechnungsergebnis als *Energiezuschlag* zu verstehen ist.

Der gesamte Abbiegevorgang (Verbindung einer von-Strecke und nach-Strecke) mit den auftretenden Fahrwiderständen und teilweise belastungsabhängigen Kenngrößen für die Energiebedarfsberechnung muss ermittelt werden. Vor allem die Beschleunigungen auf die Geschwindigkeit der nach-Strecke im Zuge des Abbiegevorganges müssen im Hinblick auf den Energiebedarf einfließen.

Im zentralen Abbiegevorgang ist die aufgrund des Kurvenradius α maximal möglich zu fahrende Geschwindigkeit v_{turn} und die Beschleunigung auf die Wunschgeschwindigkeit ausschlaggebend. Der dabei aufgewendete Energiebedarf E_{turn} wird mit der belastungsabhängigen Geschwindigkeit v_{turn} , des Zeitbedarfs t_{turn} und der positiven Beschleunigungsrate acc_{turn} mit den auftretenden Fahrwiderständen einer instationären Fahrt ermessen.

Die belastungsabhängige Reisezeit inkludiert die Halte- und Wartezeiten bis zum Knotenpunkt

und wird maßgeblich von der Verkehrsbelastung und des Steuerungstyps des Knotenpunktes beeinflusst. Der daraus resultierende zusätzliche Zeitbedarf fließt in Form eines Energiezuschlages in die Bewertung ein. Die Summe der Energieaufbringung für die instationäre Fahrt nach Knotenpunktseinfahrt und der Energiezuschlag aufgrund der zusätzlichen Reisezeit bestimmen den gesamten Energiewert pro Abbieger ($E_{linklink}$) (4.3).

$$E_{linklink} = E_{turn}(v_{turn}, t_{turn}, acc_{turn}) + E_{add}(\bar{v}, \Delta t) \quad (4.3)$$

$E_{linklink}$... Energiebedarfswert eines Abbiegers [kWh]

v_{turn} ... durchschnittliche Geschwindigkeit ab der Knotenpunktseinfahrt [km/h]

t_{turn} ... Zeitbedarf ab der Knotenpunktseinfahrt [s]

acc_{turn} ... durchschnittliche Beschleunigung ab der Knotenpunktseinfahrt [m/s²]

\bar{v} ... durchschnittliche Geschwindigkeit für gesamten Abbiegevorgang [km/h]

Δt ... zusätzlicher belastungsabhängiger Zeitbedarf für gesamten Abbiegevorgang [s]

4.2.1 Untersuchung des Fahrverhaltens auf Abbiegern

In den Kartengrundlagen sind üblicherweise keine Informationen über geometrische Gestaltungen und Verkehrsregelungen von Knotenpunkten oder der Signalprogrammversorgung vorhanden. Im besten Fall sind Informationen, ob eine Kreuzung signalisiert ist, eingepflegt. Für diese Arbeit werden deshalb Messfahrten durchgeführt, um diese zwei Gruppen von Knotenpunkten (LSA, ohne LSA) analysieren und die (belastungsabhängigen) Kenngrößen aus den einzelnen Abbiege- manövern definieren zu können. Die Analyse der Fahrverhalten, kategorisiert nach unterschiedlichen Abbiegebeziehungen, kann mit einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation nicht adäquat abgebildet werden. Deswegen werden reale Messungen im städtischen Gebiet durchgeführt.

4.2.2 Beschreibung der Messumgebung

Im Zuge einer Messkampagne wurden an drei Tagen mit zeitgleicher Aufzeichnung des Verkehrsaufkommens an 17 Abbiege- und Einbiegerelationen, mit und ohne Signalisierung, GPS-Fahrten mit einer reinen Fahrtzeit von über 19 Stunden aufgezeichnet. Der Zeitrahmen der Messungen wird festgelegt, das tageszeitabhängige Verkehrsaufkommen erfassen zu können. Hierfür sind Messungen zu mindestens einer Tageszeit mit Spitzbelastung (Morgen und/oder Abendspitze), zu den Schwachlastzeiten am Vor- und Nachmittag und zu den weniger belasteten Randzeiten am späten Abend oder in der Nacht durchgeführt worden. Aus den Randzeitmessungen werden jene Kenngrößen ermittelt, welche nur aufgrund von Geometrie, Größe und Art der Vorfahrtsregelung des Knotenpunktes abhängig sind, ohne den Einfluss anderer Verkehrsteilnehmer. Diese Daten dienen als Bezugswerte für Relativauswertungen.

Um den Einfluss des Verkehrs auf die Kenngrößen der Abbiegevorgänge bestimmen zu können,

4. ENERGIEBEDARF ALS GEWICHTUNGSGRÖSSE

sind die Verkehrsstärken erhoben worden. An Knoten mit Lichtsignalanlagen konnten Zähldektoren verwendet werden und an unsignalisierten Knoten wurden händische Zählungen durchgeführt.

Abbiegerelationen an signalisierten Knotenpunkten

K504 _LA Linksabbiegen; separater Linksabbiegestreifen

K505 _LA Linksabbiegen ; separater Linksabbiegestreifen

K505 _RA Rechtabbiegen

K506 _GE gerades Überfahren des Knotens

K506 _LA Linksabbiegen; gemischter Fahrstreifen

K506 _RA Rechtsabbiegen; gemischter Fahrstreifen

K513 _RE Rechtseinbiegen; keine Zählraten vorhanden, deswegen nicht ausgewertet

Abbiege-/Einbiegerelationen an unsignalisierten Knotenpunkten

K001 _LA Linksabbiegen; separater Linksabbiegestreifen, Vorrangstraße

K001 _LE Linkseinbiegen; 1 Fahrstreifen, Stopp

K001 _RA Rechtsabbiegen; geteilter Rechts- und Geradeausfahrstreifen, Vorrangstraße

K001 _RE Rechtseinbiegen; 1 Fahrstreifen, Stopp

K002 _LE Linkseinbiegen; 1 Fahrstreifen, Vorrang geben

K002 _RE Rechtseinbiegen; 1 Fahrstreifen, Vorrang geben

K003 _GA gerades Überfahren des Knotens; 1 Fahrstreifen, Rechtsregel

K003 _GE gerades Überfahren des Knotens; 1 Fahrstreifen, Rechtsregel

K003 _LA Linksabbiegen; 1 Fahrstreifen, Rechtsregel

K003 _RA Rechtsabbiegen; 1 Fahrstreifen, Rechtsregel

Die Fahrzyklen für jede Relation werden an einer definierten Startposition auf der von-Strecke und Endposition der nach-Strecke geschnitten. In Abbildung 4.2 sind die auftretenden Phasen eines Vorganges abgebildet. Aus der freien Fahrt (1) wird der Verzögerungsvorgang (2) eingeleitet, um den eigentlichen Abbiegevorgang (3) fortzusetzen. Nach dem Wechsel von der von- auf die nach-Strecke wird die Beschleunigungsphase (4) auf die Wunschgeschwindigkeit der nach-Strecke durchgeführt.

Es sind an jedem Knotenpunkt für die untersuchten Abbiegerelationen drei räumliche Grenzen festgelegt worden. Neben einer Start- und Endlinie handelt es sich dabei um die Haltelinie, die falls nicht als Bodenmarkierung vorhanden, als sinnvoll angenommen worden ist. Nach den in

Abbildung 4.2 dargestellten Definitionen ist der dreiteilige Abbiegevorgang über zwei Abschnitte angenähert worden.

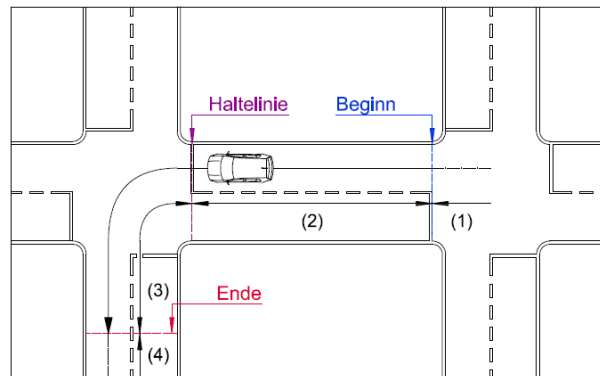


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung eines Abbiegevorganges mit Kennzeichnung der einzelnen Phasen der freien Fahrt (1), freie Fahrt und Verzögerung (2), Kurvenfahrt und Beschleunigung (3) und freien Fahrt (4).

Der Endpunkt wird anhand der mittleren Geschwindigkeit der Endphasen der aufgezeichneten Abbiegetrajektorien aus den Randzeitmessungen definiert. Ab einer glatten aufgezeichneten Trajektorie wird jener Punkt herangezogen, welcher diese mittlere Geschwindigkeit erreicht hat und als Endposition für die Auswertung sämtlicher übrigen Durchläufe verwendet. Bei zu niedrigen Geschwindigkeiten werden häufige Positionssprünge aufgezeichnet, weshalb eine genaue Positionsbestimmung des Schnittpunktes nicht möglich ist.

Somit entstehen pro Abbiegerelation zwei Phasen: vor und nach der Haltelinie. Dementsprechend werden folgende Kenngrößen für den gesamten Fahrverlauf, der Phase vor und der Phase nach der Haltelinie in Bezug auf den Auslastungsgrad untersucht:

- Reisezeiten (inkludieren Halte- und Verzögerungszeiten)
- Geschwindigkeiten
- Beschleunigungen

Die Datensätze sind auf Satellitenausfälle, Ungenauigkeiten des Systems im Bereich niedriger Geschwindigkeiten (meist handelt es sich dabei um starke GPS-Drifts nahe der Haltelinie) und andere Fehler kontrolliert und gegebenenfalls ausgeschieden worden. Einen Gesamtüberblick der fehlerfreien Trajektorien gibt Tabelle C.1 in Anhang C.

Jene Fahrzyklen, welche von Störungen, wie Fußgänger, stehende/einparkende Fahrzeugen oder ruhender Verkehr, beeinflusst wurden und zu zusätzlichen Haltephasen führten, werden nicht in die Analyse miteinbezogen. Eine Auswertung nach dem Ausscheiden der gestörten Fahrzyklen ist in Tabelle C.2 im Anhang C zu entnehmen. Darauf ist klar erkennbar, dass es zwar geringe Störfälle gibt, jedoch bei Rechtsabbiegevorgängen die Fußgänger der Hauptverursacher sind. Wären im Netzgraphen die Informationen von Abbiegerelationen mit bedingt verträglichen Verkehrströmen vorhanden, könnte somit an signalisierten Knotenpunkten ein Reisezeitzuschlag für das gesamte Abbiegemanöver angewendet werden.

4.3 Datenanalyse und Entwicklung von Schätzfunktionen

Um die Belegung der Strecken und Abbieger mit Energiebedarfswerten effizient durchführen zu können, müssen kontinuierlich belastungsabhängige Parameter bestimmt werden, wozu mathematisch beschreibbare Funktionen notwendig sind. Bei der Funktionserstellung ist darauf zu achten, welche Eingangsparameter bei einer realen Anwendung zur Verfügung stehen, dabei sind die Informationen von Strecken und Abbiegern sehr unterschiedlich verfügbar. Der wesentliche Unterschied liegt dabei in der Längeninformation: Bei Strecken ist die Streckenlänge vorhanden und Abbiegebeziehungen werden mit der Streckenlänge von 0 Metern in Netzgraphen versorgt.

Strecken

- Bestimmung der zeitlichen Fahrmodianteile (Cruising, Stillstand, Beschleunigung, Verzögerung) und der Beschleunigungs- und Verzögerungsraten.
- *Datengrundlage*: Simulierte Fahrzyklen für unterschiedliche Streckentypen.
- *Eingangsparameter*: Aktuell zu fahrende Geschwindigkeit aufgrund der Verkehrslage, Auslastungsgrad der Strecke, Streckentyp, Länge und Steigung der Strecke.
- *Ausgangsparameter*: Zeitliche Anteile der einzelnen Fahrmodi, Beschleunigungs- und Verzögerungsraten.

Abbieger

- Bestimmung der durchschnittlichen Geschwindigkeit und Beschleunigung für Abbiegemanöver und belastungsabhängigen Wartezeitzuschlag.
- *Datengrundlage*: Aufgezeichnete GPS-Fahrzyklen unterschiedlicher Abbiegerelationen.
- *Eingangsparameter*: Aktuell zu fahrende Geschwindigkeit der von- und nach-Strecke, Auslastungsgrade der von- und nach-Strecke, Rang der Abbiegebeziehung.
- *Ausgangsparameter*: Durchschnittliche Beschleunigungsrate und Geschwindigkeit des Abbiegemanövers und zusätzlicher belastungsabhängiger Zeitbedarf.

4.3.1 Datenauswertung zur Bewertung von Strecken

Die Ausgabedaten der Verkehrsflusssimulation sind sekundliche Aufzeichnungen jeder FFE im Netz, welche Aufschluss über das einzelne Fahrverhalten geben. Daraus müssen mathematische Schätzfunktionen generiert werden, um die zeitlichen Fahrmodi-Anteile und Beschleunigungs-/Verzögerungsraten über die durchschnittliche Geschwindigkeit definieren zu können. Dafür wird das statistische Werkzeug der Regressionsanalyse herangezogen.

Grundlagen der Regression Bei der Regressionsrechnung werden zwei Messgrößen daraufhin untersucht, ob ein funktionaler Zusammenhang besteht und in welcher Art. Dieser Zusammenhang zwischen einer Zielgröße und einer oder mehreren Ausgangsgrößen (erklärenden Größen) wird mit einer Näherungsfunktion ($Y = f(X_1, \dots, X_n)$) beschrieben. Der Zusammenhang zwischen Y und X kann linear, exponentiell, quadratisch oder auch durch andere Funktionen beschrieben werden. In dieser Arbeit wird pro FFE-Fahrverlauf die durchschnittlich gefahrene Geschwindigkeit (unabhängige Größe) gebildet, die Fahrmodianteile (Zeitanteile der einzelnen Fahrmodi als abhängige Größen) werden berechnet und die Beschleunigungs- und Verzögerungsraten (jeweils als abhängige Größen) bestimmt. Weil die Daten schon vor der Analyse hinsichtlich Streckentyp und Auslastungsgrad unterteilt werden, gibt es nur eine Einflussgröße (Geschwindigkeit), Regressor genannt, und es kann von einfachen Regressionen gesprochen werden.

Es liegt eine *parametrische Regressionsfunktion* $f(x)$ vor, wenn zu Beginn der Typ des Regressionsmodells definiert wird (linear, quadratisch, polynomial oder ein anderer funktionaler Zusammenhang). Der Vorteil von parametrischen Regressionen liegt in der sehr gut untersuchten Theorie zur Schätzung der Parameter. Jedoch ist es in den meisten Fällen der Untersuchung von realen Datensätzen nicht möglich, die Art des funktionalen Zusammenhangs im Vorhinein gesichert festzulegen.

Bei *nicht-parametrischen Regressionsfunktionen* werden im Gegensatz dazu keine funktionalen Annahmen getroffen, es besteht lediglich eine *Glattheitsbedingung*. Dadurch werden möglich erzeugte Fehler durch die falsche Wahl der Funktionsklasse durch eine Funktionsschätzung vermieden. Bei der nicht-parametrischen Regressionsrechnung sind jedoch Parameter zu wählen, die das Verfahren des Schätzers erheblich beeinflussen. Bei einem Kernschätzer beispielsweise sind die Bandbreite der zu betrachtenden Nachbardaten und die Kernfunktion (beispielsweise Rechtecks-, Dreiecks-, Gauß- oder Epanechnikov-Kern) von Bedeutung. Dabei wird für jede Stelle von x ein Funktionswert auf Basis der festgelegten Bandbreite und mit der Form des Kernes geschätzt, indem eine gewichtete parametrische Regression durchgeführt wird. Der Ordinatenwert ist somit das Resultat der Schätzfunktion an der Stelle x .

Zu den nicht-parametrischen Regressionsverfahren zählen *Kernschätzer*, *Reihenschätzer* und *Spline-Schätzer* (Pilz 2005). Ist eine Regressionsfunktion ein Polynom festen Grades, so wird dieses auch *lokaler, polynomialer Schätzer* genannt.

Abbildung 4.3 zeigt beispielhaft die zeitlichen Anteile der Beschleunigungsraten über die durchschnittliche Geschwindigkeit pro simuliertem Fahrverlauf bei einem Auslastungsgrad v/c $(0,0.35]$. Diese Abbildung soll auf die Unterschiede einer parametrischen und nicht-parametrischen Regression hinweisen. Dabei ist auf der linken Grafik ein konvexer, quadratischer Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit (exogene Variable) und Zeitanteil im Beschleunigungsmodus (endogene Variable) zu vermuten. In der rechten Grafik wurde eine quadratische Regressionsfunktion mittels Kleinste-Quadrate-Methode berechnet und zeigt einen konkaven Funktionsverlauf, der vor allem an den Randbereichen große Abweichungen aufweist. Zusätzlich ist in der rechten Grafik ein lokaler, polynomialer Kernschätzer nach Wand & Jones (1995) aufgetragen. Die Funktion

4. ENERGIEBEDARF ALS GEWICHTUNGSGRÖSSE

zeigt einen gleich starken Anstieg, flacht dann etwas ab und steigt danach bis etwa 30km/h wieder stark an. In diesen Bereichen liegen die quadratische und die nicht parametrische Schätzung dicht beieinander. Ab 40km/h entstehen jedoch deutliche Abweichungen voneinander. Speziell an diesem Randbereich zeigen sich unrealistisch hohe Werte bei der quadratischen Regression, wobei der Kernschätzer diesen gut beschreibt.

Die Arbeit von Maier (2010) stellt ein Verfahren zur abschnittswisen Regression dar, wobei eine lineare Regressionsanalyse angewendet wird, um Schätzfunktionen zu generieren. Ebenfalls sind dabei die Randbereiche problematisch, welche durch das Datenrauschen nicht adäquat abgebildet werden können.

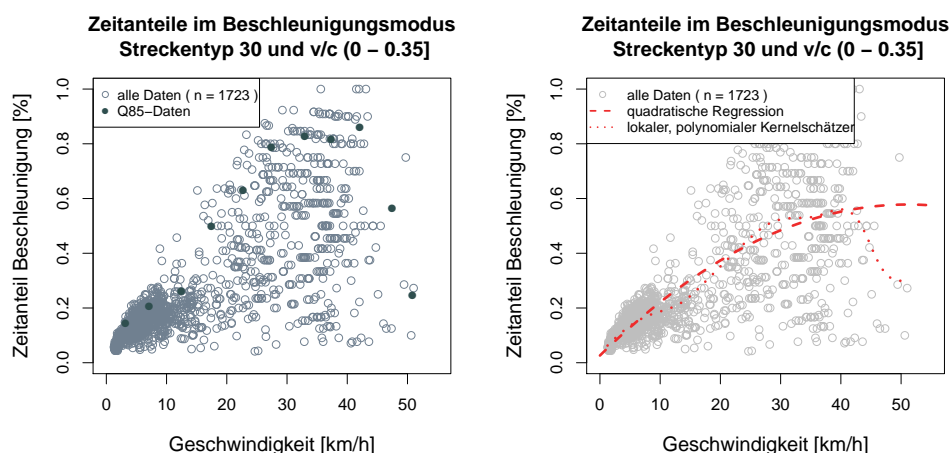


Abbildung 4.3: Daten der zeitlichen Anteile der Beschleunigung des Streckentyps 30 und v/c (0,0.35]. Linke Grafik: Punktwolke der Beschleunigungsanteile in Abhängigkeit der durchschnittlich gefahrenen Geschwindigkeit von Einzelfahrten und Darstellung der Beschleunigungswerte mit Q85-Werten. Rechte Grafik: Quadratische Regression (gepunktete Linie) und lokale, polynomiale Kernschätzfunktion (gestrichelte Linie) mit einer Bandbreite von 3 und einem normalverteilten Kern zu den Daten.

Diese flexible Art der Regression ermöglicht die Anpassung der Daten in einer detaillierteren Form gegenüber einer globalen Regression, ohne wesentliche Charakteristika zu unterdrücken. Mit diesen angepassten Daten (geglättete Daten) aus der nicht-parametrischen Funktion kann der Versuch gestartet werden, eine einfache parametrische Funktion zu finden, die diese Daten passend beschreibt. Diese Vorgangsweise wurde bereits in Fahrmeir et al. (2009) erwähnt.

Glättung der Daten - Smoothing Weil gerade das Verkehrsverhalten ein höchst dynamischer Prozess ist und Simulationsmodelle in abstrakter Form versuchen, dieses zu repräsentieren, resultiert ein hohes Datenrauschen der einzelnen fahrdynamischen Parameter, weswegen auf den berechneten Parametern einer *gewichtete Glättungstechnik* angewendet werden muss, um auf allgemeingültige Beschreibungen schließen zu können. Im Verkehrsbereich erhalten bei der Trassen-Projektierung die Q85-Werte einen hohen Stellenwert, da diese die Grenze für die Dimensionierungen vorgeben und somit das System für 85% der Fahrzeuggeschwindigkeiten ausgelegt wird.

In Abbildung 4.3 wird beispielhaft die Berechnung der 85%-Quantil-Werte (Q85) bei 5km/h-Schritten und die Anwendung der Kernelregressionsmethode dargestellt. Es ist bei dieser Abbildung klar zu sehen, dass die Q85-Werte sehr hoch gegenüber den geglätteten Daten des Kernelalgorithmus ausfallen und somit nur die Anwendung von gewichteten, geglätteten Daten als Datenbasis für die Funktionserstellung verwendet werden können.

In Bratt & Ericsson (2000) wurde die *lokale, polynomiale Kernelschätzmethode* zur Reduktion des Beschleunigungsrauschens verwendet, um von beobachteten Geschwindigkeiten auf Beschleunigungsraten zu gelangen. Diese Regressionsmethode wird vorrangig bei Beobachtungen mit hohem Datenrauschen verwendet und ist ein nicht-parametrisches konzeptuelles Modell: $\hat{y} = f(x) + \epsilon$ (mit Fehlerterm (Rauschen) ϵ). Die Form der Funktion $f(x)$ ist dabei nicht festgelegt. Solche penalisierte Verfahren führen zu der Summe von quadrierten Residuen zusätzlich einen Strafterm (meist abhängig von der Distanz) ein, um eine zu starke Anpassung an die Daten zu verhindern. Der Vorteil ist eine bessere Angleichung an die Daten im Falle nichtlinearer Zusammenhänge. Ziel der Methode ist es, das Rauschen der Messdaten in Bezug auf die Geschwindigkeiten mit einer abstandsabhängigen Gewichtung zu minimieren und klare Profile zu erhalten.

Es wurde viel in der Literatur zur nicht-parametrischen Regression veröffentlicht, vertiefende Informationen zur Kernelregression sind Fan & Gijbels (1996) und Wand & Jones (1995) zu entnehmen.

Die Datenglättung ist die Grundlage für die Anwendung der nicht-parametrischen Regressionsmethoden, damit die generierte Funktion die Darstellung der Daten gegenüber einem Scatterplot verbessert, und die Abhängigkeit des Responses y durch den Prädiktor x gezeigt wird.

Um die Datenglättung für die Fahrmodiuntersuchungen anwenden zu können, ist die Wahl der jeweils zu betrachtenden Bandbreite des *Kernel-Smoother*s zu definieren. Der Schätzer aus der Kernelregression stellt einen lokal konstanten Schätzer dar, der durch die Wahl der Bandbreite begrenzt wird. Je kleiner die Bandbreite gewählt wird, desto mehr werden die geglätteten Daten von Ausreißern beeinflusst. Ein glattes Erscheinungsbild wird durch eine größere Bandbreite erzielt, jedoch gehen eventuell wichtige Detailinformationen verloren. Idealerweise wird die Bandbreite klein genug gewählt, um Detailinformationen darzustellen, aber auch groß genug, um das Datenrauschen zu eliminieren. Abbildung 4.4 zeigt die Auswirkungen von unterschiedlichen Bandbreiten bei dem lokal, polynomialen Schätzer von Wand & Jones (1995). Dabei ist zu sehen, dass vor allem am Randbereich die Wahl der Bandbreite von 5 ein geglättetes Bild produziert, jedoch noch wesentliche Merkmale beinhaltet. Diese Dateneinteilung von Abschnitten für Detailuntersuchungen spiegelt sich in den unterschiedlichen Arbeiten der Fahrzyklenuntersuchung wider, welche beispielsweise in Milkins & Watson (1983) ebenfalls in 5km/h-Geschwindigkeitsraster unterteilt wurden.

Anwendung auf generierte Daten Aufgrund der vorangegangenen Argumentationen und den Abbildungen 4.3 und 4.4 wird für die Analysen der Simulationsdaten der lokal, polynomia-

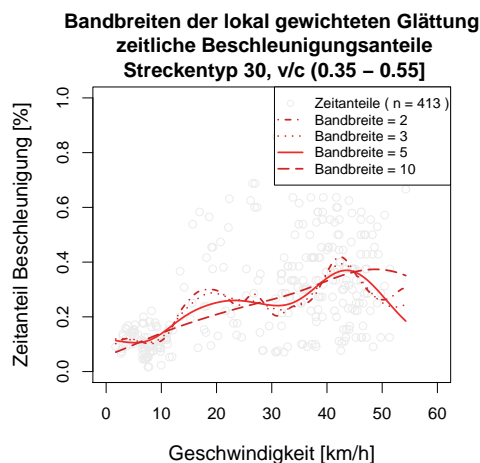


Abbildung 4.4: Daten der zeitlichen Anteile der Beschleunigung des Streckentyps 30 und v/c (0.35,0.55]. Die Punktwolke stellt die Beschleunigungsanteile in Abhängigkeit der durchschnittlichen gefahrenen Geschwindigkeit von Einzelfahrten dar. Die lokale, polynomiale Kernschätzfunktion mit unterschiedlicher Bandbreite und einem normalverteilten Kern werden dargestellt.

le Schätzer nach Wand & Jones (1995) mit einer Bandbreite von 5km/h-Schritten angewendet. Wenn die Datenbasis aus den geglätteten simulierten Daten vorliegt, muss daraus eine beschreibbare Funktion generiert werden. Bei der Anwendung von nicht-parametrischen Verfahren ist die Generierung einer eindeutigen Funktion nicht möglich, weshalb auf lineare Regressionsmodelle (quadratische und polynomiale Regression mittels Kleinste-Quadrate-Methodik) zurück gegriffen werden muss.

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass im unbelasteten Verkehrszustand (v/c (0,0.35]) das individuelle Fahrverhalten den überwiegenden Einfluss auf das Fahrverhaltensmuster und das Ausmaß der Beschleunigungs- und Verzögerungsraten hat. Eine Erstellung einer Schätzfunktion auf Basis der Simulationsdaten ist für diesen Bereich nicht sinnvoll und würde den Sachverhalt nicht realistisch darstellen. Deshalb werden im unbelasteten Zustand die Funktionen auf Basis der HBEFA-Daten erstellt, da diese ein allgemeines Fahrverhalten darstellen. Für die Netzgraphenbewertung bedeutet das, dass die Grundbelegung der Strecken mit Energiewerten ebenfalls mit den Funktionen aus den HBEFA-Daten und der Projektierungsgeschwindigkeit durchgeführt werden soll. Funktionen für alle weiteren Auslastungsgrade (0.35,0.55], (0.55,0.77], (0.77,0.92], (0.92,1] und Überbelastung werden aufgrund der simulierten Daten, wie in diesem Kapitel aufgezeigt, erstellt.

Exemplarisch werden die simulierten Cruisingdaten des Streckentyps 30 (städtische Verteilerstraße) über alle Auslastungsgrade aufgezeigt (weitere Untersuchungen für weitere Streckentypen, Auslastungsgrade und Fahrmodianteile siehe Anhang A).

In Abbildung 4.5 sind die zeitlichen Cruisinganteile der simulierten Daten und die quadratische und polynomiale Regressionen auf Basis der geglätteten Daten aufgetragen. Teilweise zeigen die Verläufe der Funktionen einer Kategorie ein ähnliches Bild, weshalb zusätzlich die Q-Q Plots der Regressionen zu untersuchen sind, um die richtige Wahl der Schätzfunktion zu treffen. Diese zeigen gerade an den Randbereichen die Notwendigkeit der genauen Betrachtung. Aufgrund des t- und F-Tests werden die Ergebnisse sowohl der quadratischen als auch der polynomialen

Regression als hoch signifikant bewertet (sowohl bei y-Achsenabschnitt als auch bei den Koeffizienten). Eine Übersicht zur Bewertung der einzelnen Regressionsfunktionen wird in Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Auch wenn statistischen Prüf- und Schätzverfahren angewendet werden, sollte auf die letztgültige verkehrstechnische Plausibilitätsprüfung nicht verzichtet werden. Oft zeigen Verläufe einen realistischeren Sachverhalt auf, obwohl das Ergebnis der statistischen Tests das Gegenteil liefert.

Zusätzlich zu den zeitlichen Anteilen der einzelnen Fahrmodi werden für die Bewertung auch die durchschnittlichen Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsraten für die Berechnung der Widerstandskräfte im instationären Fahrzustand benötigt. Dafür wurden ebenfalls pro FFE die durchschnittlichen Geschwindigkeiten und die jeweiligen durchschnittlichen positiven und negativen Beschleunigungen aufgetragen. Auf Basis der Simulationsdaten konnten durchgehend für alle Streckentypen und Auslastungsgrade signifikante Ergebnisse erzielt werden, was besonders wichtig für die Abschätzung des Energiebedarfs ist.

Die Abbildungen 4.6 und 4.7 zeigen die Ergebnisse der Anwendung der quadratischen Regressionsmethode. Obwohl die Raten klare Tendenzen erkennen lassen, wurde eine Glättung der Daten vor der Anwendung vorgenommen. Im t- und F-Test wurden die Regressionskoeffizienten und die Regressionsfunktion als hoch signifikant bewertet.

4. ENERGIEBEDARF ALS GEWICHTUNGSGRÖSSE

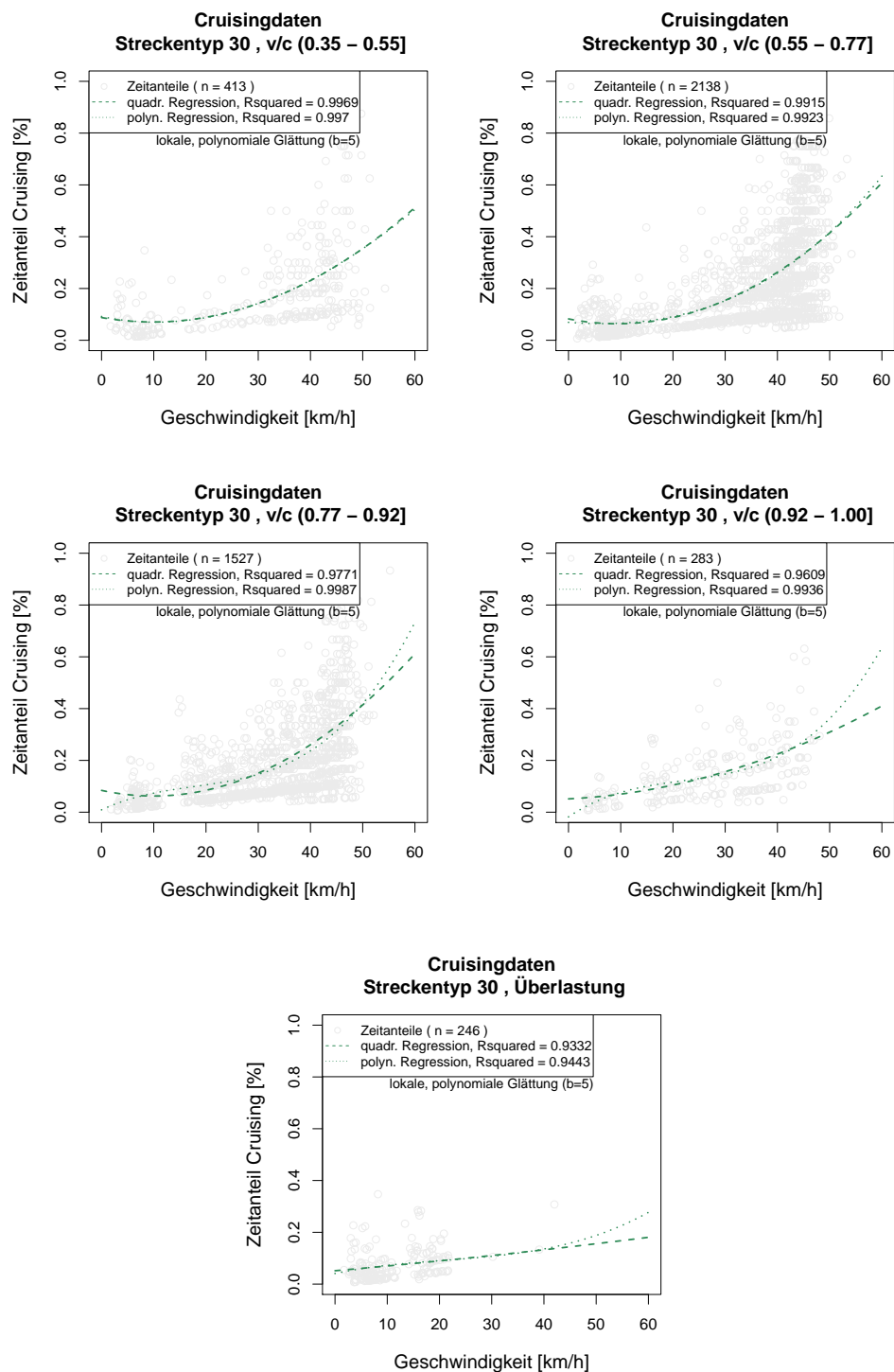


Abbildung 4.5: Generierte Schätzfunktionen der Cruisinganteile des Streckentyps 30 aller v/c. Auf Basis der geglätteten Daten wurde eine quadratische und polynomiale Regression angewendet.

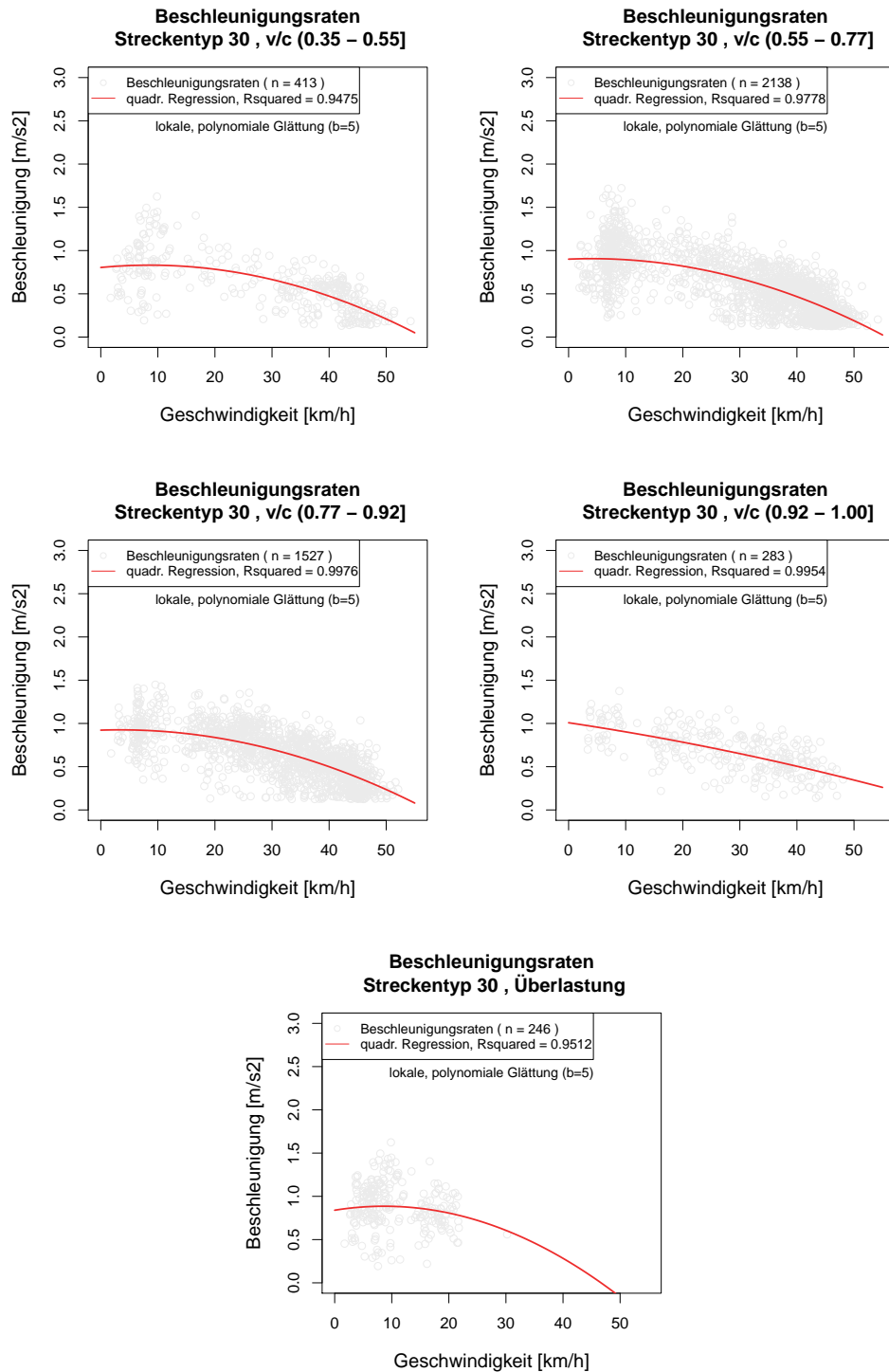


Abbildung 4.6: Generierte Schätzfunktionen der Beschleunigungsraten des Streckentyps 30 aller Auslastungsgrade. Auf Basis der simulierten Daten und darauffolgender Glättung wurde eine quadratische Regressionrechnung angewendet, um robust beschreibbare Funktionen zu erhalten.

4. ENERGIEBEDARF ALS GEWICHTUNGSGRÖSSE

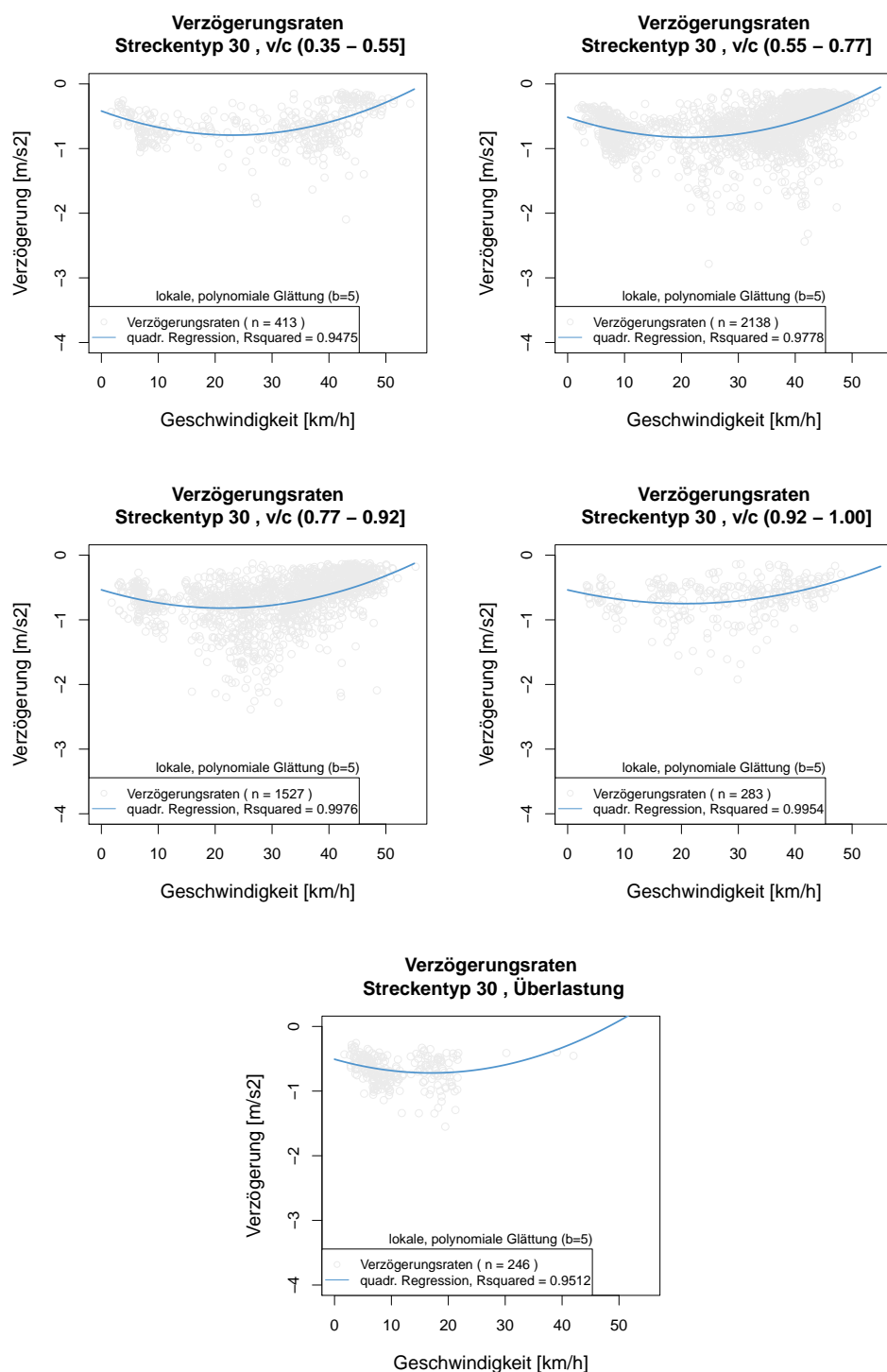


Abbildung 4.7: Generierte Schätzfunktionen der Verzögerungsraten des Streckentyps 30 aller Auslastungsgrade. Auf Basis der simulierten Daten und darauffolgender Glättung wurde eine quadratische Regressionrechnung angewendet, um robust beschreibbare Funktionen zu erhalten.

4.3.2 Datenauswertung zur Bewertung von Abbiegebeziehungen

Da der Abbiegevorgang in der Regel wenige Sekunden lang andauert, ist eine Untersuchung der zeitlichen Verteilungen einzelner Fahrmodi nicht zielführend. Es gilt die Annahme, dass das Abbiegemanöver in zwei Phasen eingeteilt wird: vor und nach der Haltelinie. Deshalb werden die relevanten Kenngrößen nach (4.3) in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens und des Signalisierungstyps analysiert. Für die Berechnung des Energiebedarfs des instationären Anteils der Fahrt (von Einfahrt in den Knotenpunktsbereich bis zur Ausfahrt) sind die durchschnittliche Geschwindigkeit, der Zeitbedarf und die positive Beschleunigung zu bestimmen. Bei der Berechnung des Energiezuschlags werden die durchschnittliche Geschwindigkeit und der zusätzliche Zeitbedarf für das gesamte Abbiegemanöver herangezogen.

Dafür werden, abhängig vom Auslastungsgrad der zufließenden Strecke, Schätzfunktionen für die Kennwertbestimmung generiert. Messdaten werden dafür nach der Glättungsmethodik aus Kapitel 4.3.1 mit einer Bandbreite von 0.25 verarbeitet und eine quadratische Ausgleichsrechnung (Regression) durchgeführt.

Beispielhaft werden die Analysen am Linksabbiegeманöver an Knotenpunkten mit LSA und am Linkseinbiegen ohne LSA dargestellt. Dabei werden sowohl die unbearbeiteten Daten als auch die Daten im geglätteten Zustand mit einem Konfidenzintervall von 95% aufgezeigt. Die Darstellungen von weiteren Abbiegerelationen sind Anhang C zu entnehmen.

Kenngrößen für instationäre Fahrt bei LSA *durchschnittliche Geschwindigkeit ab Haltelinie* Das Untersuchungsgebiet nach Einfahrt in den Knotenpunkt weist im Geschwindigkeitsverlauf (Abbildung 4.8) niedrige und hohe Wertenniveaus auf. Die parabelförmige Funktion (a) auf Basis der Rohdaten zeigt trotzdem ein enges Konfidenzintervall, womit gezeigt wird, dass mit dieser Funktion ein solider, statischer Geschwindigkeitswert von 21.19km/h bestimmt werden kann. Durch die vorher durchgeführte Glättung stellt sich die Schätzfunktion etwas flacher und nahezu konstant dar (b), was der durchschnittlichen Betrachtung näher kommt.

Die Geschwindigkeit bei den Rechtsabbiegern kann ebenso mit einer konstanten Geschwindigkeit angesetzt werden, da keine signifikanten belastungsabhängigen Schwankungen in den Analysen zu sehen sind. Bei den Geradeausfahrten ist eine geringe Reduktion der Geschwindigkeit abhängig von der Belastung erkennbar, es wird jedoch ebenfalls ein statischer Wert angenommen.

Reisezeit ab Haltelinie Die Reisezeiten bei Linksabbiegeманöver ist in Abbildung 4.9 zu sehen und zeigt der Regressionsfunktion zur Folge keinen signifikanten Anstieg. Zu sehen sind jedoch im höheren Belastungsbereich teilweise hohe Reisezeiten, was sich durch erhöht aufkommenden Gegenverkehr erklären lässt. Für eine Implementierung ist es denkbar im hohen Belastungsbereich das zwei- bis dreifache des konstanten Wertes anzunehmen, um diese Beeinflussung zu berücksichtigen. Rechtsabbieger und Geradeausfahrten zeigen hingegen keine Belastungsabhängigkeit.

positive Beschleunigung ab Haltelinie Die Aufnahmen der positiven Beschleunigungen während der Messreihen zeigen als Ergebnis keinen signifikanten Einfluss des aktuellen Verkehrsaufkommens. Die Bandbreiten der Beschleunigungswerte für Links- und Rechtsabbieger sind von 0.4 -

4. ENERGIEBEDARF ALS GEWICHTUNGSGRÖSSE

1.1m/s² und bei Geradeausfahrten bei 0 - 1.0m/s² zu bestimmen, weshalb für die Energieberechnung konstante Mittelwerte angesetzt werden.

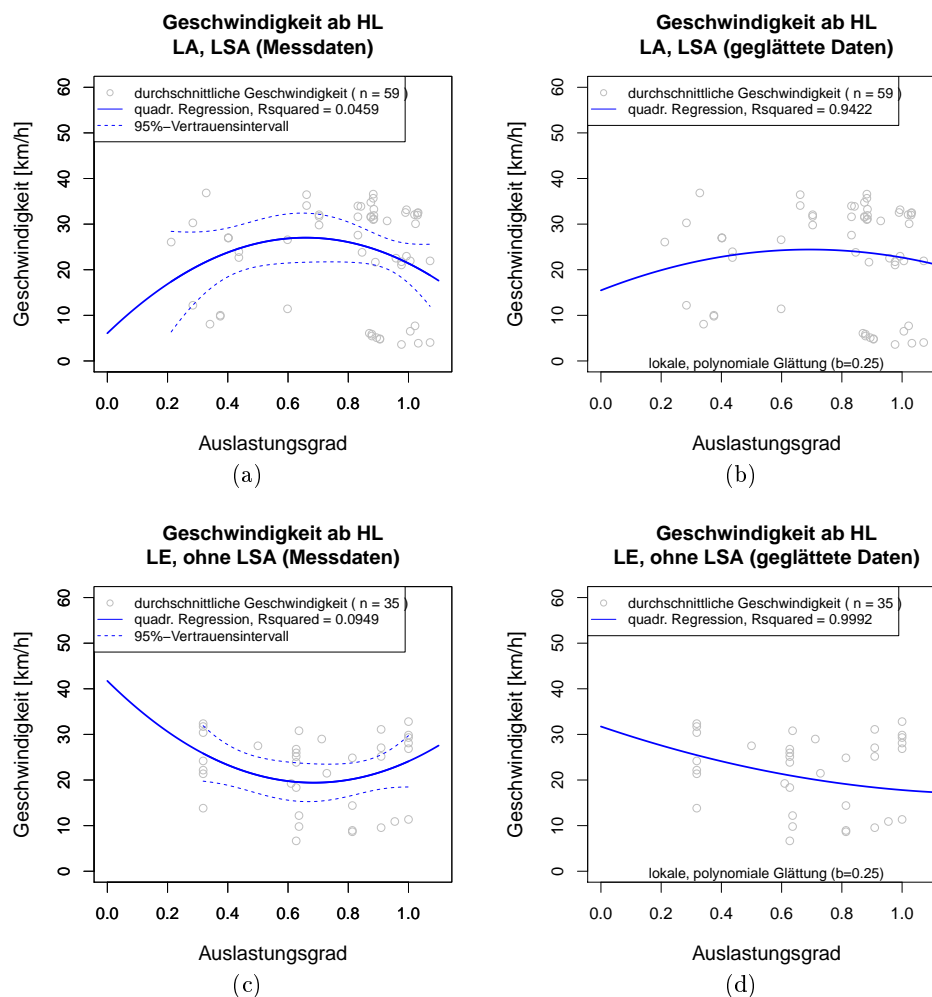


Abbildung 4.8: Durchschnittliche Geschwindigkeit ab der Haltlinie für das Abbiegemanöver nach links an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten und das Einbiegen nach links an Knotenpunkten ohne LSA. Linke Grafiken: Datenpunkte im Rohformat. Rechte Grafiken: Erstellung der Schätzfunktion auf Basis von geglätteten Daten. GPS-Aufzeichnung mit 1Hz im Grazer Stadtgebiet, Oktober 2012.

Kenngößen für instationäre Fahrt ohne LSA *durchschnittliche Geschwindigkeit ab Haltelinie* Bei den Geschwindigkeiten ab der Haltelinie (bzw. gedachten Haltelinie) an Knotenpunkten ohne LSA weisen die Abbiegemanöver Links, Rechts und Geradeaus keine belastungsabhängige Veränderung auf und werden deshalb mit statischen Werten definiert, im Gegensatz zur Geschwindigkeitsverteilung beim Einbiegen nach links und rechts, die mit höherer Belastung eine Abnahme zeigt (siehe Abbildung 4.8 (c) und (d)).

Reisezeit ab Haltelinie Bei den aufgezeichneten Reisezeiten nach der Haltelinie lässt sich keine signifikante, belastungsabhängige Veränderung feststellen, jedoch ein unterschiedlich konstantes Wertenniveau je Abbiege-/Einbiegerelation. Deshalb wird für die Reisezeit ab der Haltelinie ein konstanter Wert für die Berechnung angenommen.

positive Beschleunigung ab Haltelinie Bei der Auswertung der Beschleunigungen nach der Hal-

telinie lässt sich keine belastungsabhängige Veränderung feststellen, jedoch ein unterschiedlich konstantes Wertenniveau je Abbiege-/Einbiegerelation.

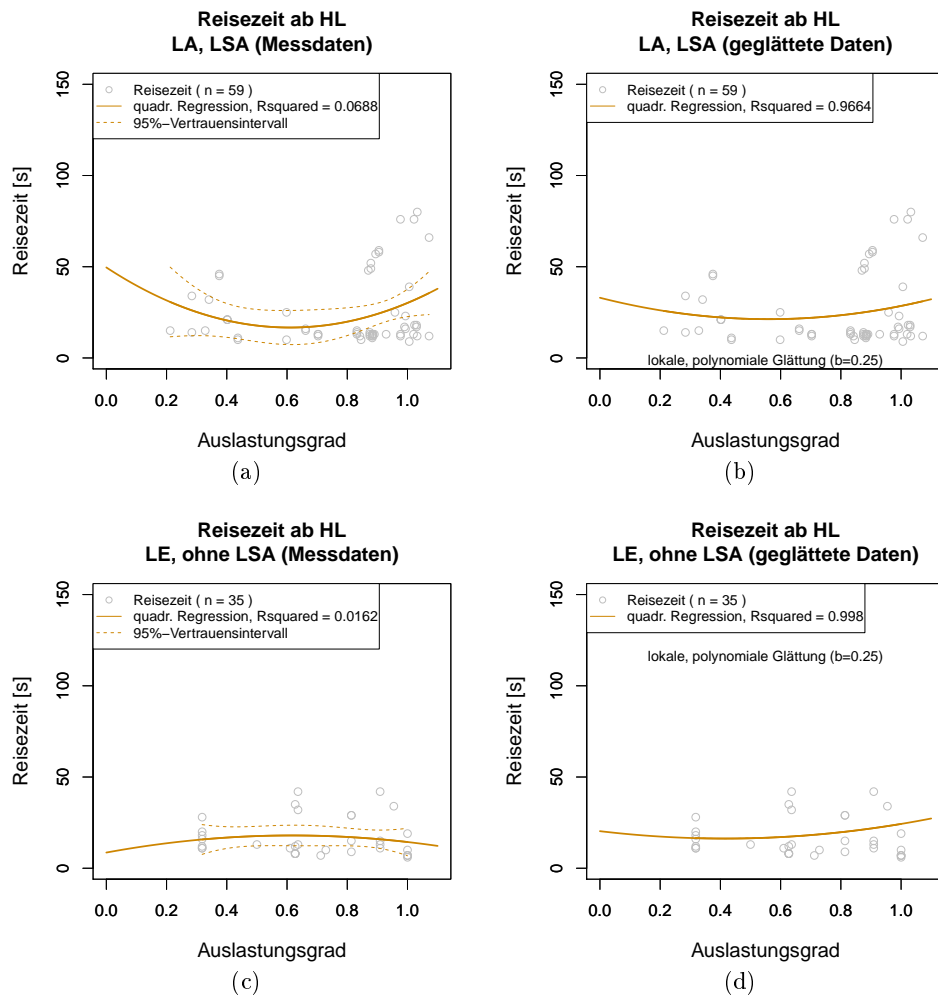


Abbildung 4.9: Durchschnittliche Reisezeit ab der Haltelinie für das linke Abbiegemanöver an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten. Grafik (a), (c): Datenpunkte im Rohformat. Grafik (b), (d): Erstellung der Schätzfunktion auf Basis von geglätteten Daten. GPS-Aufzeichnung mit 1Hz im Grazer Stadtgebiet, Oktober 2012.

Beschleunigungsverhalten bei instationärer Fahrt Da die Ergebnisse der Untersuchungen des positiven und negativen Beschleunigungsverhaltens im Abbiegevorgang keine belastungsabhängige Aussage zulassen, werden zusätzliche Analysen zu den zeitlichen Anteilen der Beschleunigungen angestellt. Die Annahme, dass während der Kurvenfahrt zur Gänze im beschleunigten Modus gefahren wird, würde eine Überbewertung des Energiebedarfs erzeugen. Die zeitlichen Anteile im instationären Modus während der Kurvenfahrt zeigen klar, dass die festgelegte positive Beschleunigung nicht für die gesamte Kurvenfahrt angewendet werden darf. Die Kurvenfahrt weist ein Zusammenspiel von Beschleunigung, Verzögerung und Cruising auf. Es muss in der Validierungsphase (Kapitel 5) getestet werden, ob lediglich die positive Beschleunigung oder ein durchschnittlicher Beschleunigungswert mit den jeweiligen Zeitanteilen je Abbiegerelation angewendet wird. Tabelle 4.3 gibt eine Übersicht über die errechneten Mittelwerte der

4. ENERGIEBEDARF ALS GEWICHTUNGSGRÖSSE

beobachteten Beschleunigungsraten.

Tabelle 4.3: Ergebnisse des errechneten Zeitbedarfs je Abbiegerelation und Steuerungstyp. Die durchschnittliche Beschleunigung stellt die positive Beschleunigung und Verzögerung dar und die Prozentwerte wurden aus dem Mittelwert der Beschleunigungsanteile an der Reisezeit errechnet.

Knotenpunktstyp	Relation	Zeitanteil	Zeitanteil
		Beschleunigung	pos. Beschleunigung
mit LSA	LA	85.28%	59.99%
	RA	100%	60.79%
	GE	96.85%	52.67%
ohne LSA	LA	98.36%	75.84%
	RA	100%	76.51%
	GE	99.11%	73.10%
	LE	87.79%	72.38%
	RE	92.04%	76.12%

Kenngößen für Zuschlagsrechnung bei LSA *zusätzlicher Zeitbedarf gesamter Verlauf* Der zusätzliche Zeitbedarf für das gesamte Abbiegemanöver zeigt einen starken Anstieg bei hohem Auslastungsgrad (Abbildung 4.10 (a)). Bei Rechtsabbiegern und Geradeausfahrten ist ebenfalls ein belastungsabhängiger Anstieg, aber in geringerem Ausmaß, zu sehen.

durchschnittliche Geschwindigkeit gesamter Verlauf Die durchschnittliche Geschwindigkeit (Abbildung 4.11) zeigt bei allen Abbiegemanövern eine klare Abnahme der Wertebereiche.

Kenngößen für Zuschlagsrechnung ohne LSA *zusätzlicher Zeitbedarf gesamter Verlauf* Der zusätzliche Zeitbedarf für das gesamte Abbiegemanöver zeigt nur beim Linkseinbiegen einen stärkeren Anstieg bei höherem Auslastungsgrad (Abbildung 4.10).

Bei den anderen Abbiegemanövern ist ein geringer bis kein belastungsabhängiger Anstieg zu erkennen.

durchschnittliche Geschwindigkeit gesamter Verlauf Die durchschnittliche Geschwindigkeit für den gesamten Abbiegevorgang zeigt bei allen Manövern einen abfallenden Verlauf (Abbildung 4.11).

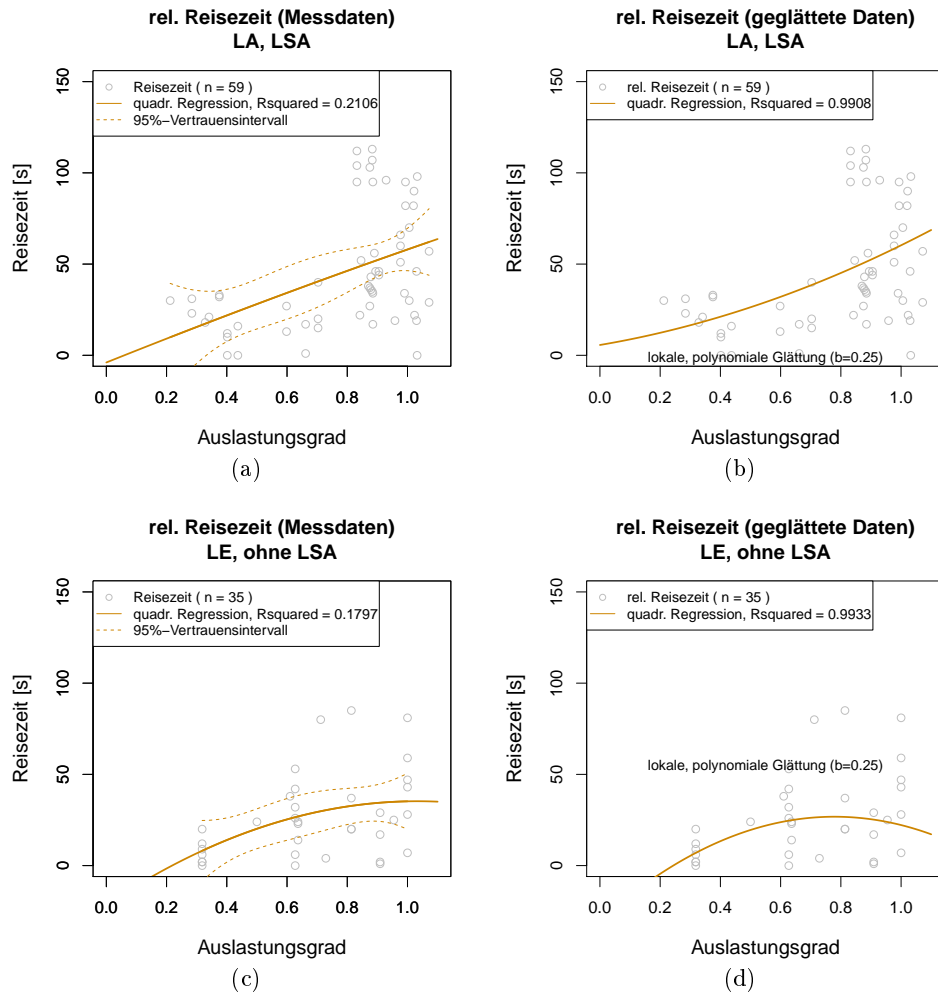


Abbildung 4.10: Reisezeitzuschlag für das gesamte Abbiegemanöver. Linke Grafiken: Datenpunkte im Rohformat. Rechte Grafiken: Erstellung der Schätzfunktion auf Basis von geglätteten Daten. GPS-Aufzeichnung mit 1Hz im Grazer Stadtgebiet, Oktober 2012.

4. ENERGIEBEDARF ALS GEWICHTUNGSGRÖSSE

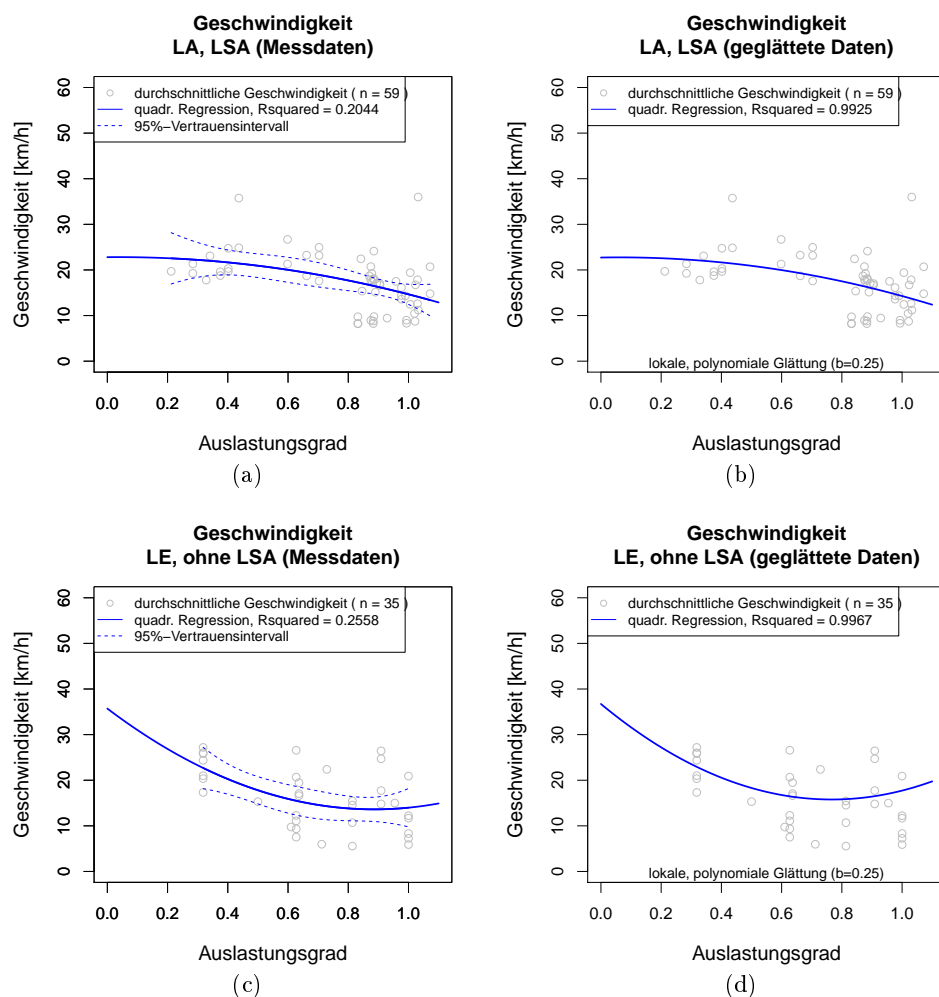


Abbildung 4.11: Durchschnittliche Geschwindigkeit für das gesamte Abbiegemanöver nach links an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten und Einbiegen nach links bei Knotenpunkten ohne LSA. Linke Grafiken: Datenpunkte im Rohformat. Rechte Grafiken: Erstellung der Schätzfunktion auf Basis von geglätteten Daten. GPS-Aufzeichnung mit 1Hz im Grazer Stadtgebiet, Oktober 2012.

4.4 Zusammenfassung zur Bewertung der Netzkomponenten

Zusammenfassung zur Bewertung von Strecken Die fahrdynamischen Kenngrößen aus den Simulationsdaten zeigen ein Datenrauschen, weshalb eine Glättungsmethodik vor Erstellung der beschreibbaren Funktion durchzuführen ist. Im niedrigen Auslastungsgrad werden die Simulationsdaten nicht zur Entwicklung einer Schätzfunktion herangezogen, dafür werden die Funktionen aus allen HBEFA-Daten je Streckentyp verwendet.

Grundsätzlich zeigen die entwickelten Schätzfunktionen einen realistischen Verlauf. Im städtischen Bereich dominiert aufgrund der niedrigen Geschwindigkeiten der Energiebedarf zur Überwindung des Beschleunigungswiderstandes. In den Simulationsdaten spiegeln sich die positiven und negativen Beschleunigungen wider.

Weil es sich in der Simulation trotzdem um ein modellhaftes Fahrverhalten handelt, werden die entwickelten Schätzfunktionen vor allem für die einzelnen zeitlichen Fahrmodianteile zusätzlich mit den Tendenzen der HBEFA-Daten verglichen, was eine gute Übereinstimmung ergibt. Eine Besonderheit stellt dabei der Streckentyp 20 dar, welche sowohl bei den HBEFA-Datensätze als auch bei den Simulationsdaten keine signifikante Belastungsabhängigkeit bei den Zeitanteilen der Fahrmodi an den Tag legt. Meist sind nahezu konstante Zeitanteile je Auslastungsgrad festzulegen. Für die Bewertung des Streckentyps 20 werden somit gänzlich die Funktionen auf Basis aller Simulationsdaten für die Bewertungen herangezogen.

Schlussendlich muss auch bei der Verwendung der erstellten Funktionen eine verkehrstechnische Plausibilitätsprüfung erfolgen. Bei einigen Bereichen der Auslastung ist kein signifikanter Unterschied zu den benachbarten Bereichen ersichtlich, diese wurden in Tabelle 4.4 zusätzlich gekennzeichnet. Im Zuge einer Implementierung sollten die Bereiche der Auslastung jedoch aufrecht bleiben, da bei erweitertem Kenntnisstand die Funktionswerte austauschbar bleiben, ohne in den Systemaufbau eingreifen zu müssen.

Zusammenfassung zur Bewertung von Abbiegerelationen Von den untersuchten Abbiege-Kenngrößen zeigen nur die zeitlichen Zuschläge bei allen Relationen eine Veränderung bei höherer Belastung, was die Verwendung der Zuschlagsfunktion von Bureau of Public Roads (1964) in Kapitel 3.3 bestätigt. Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten für den gesamten Vorgang verändern sich nur bei lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten und dem Einbiegemanöver nach links. Bei den Kenngrößen für die instationäre Fahrt ist keine Belastungsabhängigkeit nachweisbar, was darauf schließen lässt, dass diese überwiegend vom Abbiegewinkel bestimmt wird und deshalb ein statischer Wert aus Mittelwertbildung je Relationstyp vorgeschlagen wird. Zu beachten ist dabei, dass nicht für den gesamten Zeitbedarf, die Fahrwiderstände im Beschleunigungsmodus berechnet wird, sondern nur ein prozentueller Zeitbereich.

4. ENERGIEBEDARF ALS GEWICHTUNGSGRÖSSE

Tabelle 4.4: Ergebnisse der Datenanalyse zur Methodik der Bestimmung von Parametergrößen im belastungsvariablen Streckennetz für Strecken (•... signifikante Funktion aufgrund der Simulationsdaten; ○... keine Belastungsabhängigkeit nachweisbar, trotzdem signifikanter, konstanter Wert aufgrund der Simulationsdaten; ⊙... Funktion auf Basis der HBEFA-Daten; ·... Funktionen weisen große Ähnlichkeiten zu benachbarten Belastungen auf).

Streckentyp	Belastung	a^+	a^-	p_{cruise}	p_{acc}	p_{dec}	p_{idle}
10	01	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	—
	02	•	•	·	•	•	—
	03	•	•	·	·	•	—
	04	•	•	·	·	•	—
	05	•	•	·	·	•	—
	06	○	•	•	•	•	•
20	01	·	·	·	·	·	·
	02	·	·	·	·	·	·
	03	·	·	·	·	·	·
	04	·	·	·	·	·	·
	05	·	·	·	·	·	·
	06	·	·	·	·	·	·
30	01	•	•	•	•	•	—
	02	•	•	·	•	·	—
	03	•	•	·	·	·	·
	04	•	•	·	·	·	·
	05	•	•	•	·	·	·
	06	•	•	•	•	•	•
40	01	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	—
	02	•	•	·	•	•	○
	03	•	•	·	•	•	○
	04	•	•	·	•	•	○
	05	•	•	·	•	•	○
	06	•	•	•	•	•	•
50	01-06	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙

Tabelle 4.5: Ergebnisse der Datenanalyse zur Methodik der Bestimmung von Parametergrößen im belastungsvariablen Streckennetz für Abbiegerelationen an Knotenpunkten mit und ohne Lichtsignalanlagen (●... Funktion aufgrund der Belastungsabhängigkeit, ○... keine Belastungsabhängigkeit nachweisbar, konstanter Wert).

Relation	Berechnung	Parameter	ohne LSA	mit LSA
Linksabbiegen	Manöver	v_{turn}	○	○
		t_{turn}	○	○ (●)
acc_{turn}		○	○	
Zuschlag		\bar{v}	●	●
		Δt	●	●
Rechtsabbiegen	Manöver	v_{turn}	○	○
		t_{turn}	○	○
acc_{turn}		○	○	
Zuschlag		\bar{v}	●	●
		Δt	●	●
Geradeausfahrt	Manöver	v_{turn}	○	○
		t_{turn}	○	○
acc_{turn}		○	○	
Zuschlag		\bar{v}	●	●
		Δt	●	●
Linkseinbiegen	Manöver	v_{turn}	●	
		t_{turn}	○	
acc_{turn}		○		
Zuschlag		\bar{v}	●	
		Δt	●	
Rechtseinbiegen	Manöver	v_{turn}	●	
		t_{turn}	○	
acc_{turn}		○		
Zuschlag		\bar{v}	●	
		Δt	●	

Validierung und Anwendung

Im folgenden Kapitel wird anhand von aufgezeichneten realen Fahrverläufen im städtischen Gebiet die Berechnungsmethodik der Strecken- und Abbiegegewichte überprüft. Dabei werden die realen Trajektorien als Basisberechnung mit dem mikroskopischen Emissionsmodell PHEM berechnet. Die Parameter des hinterlegten Dieselfahrzeuges der Euroklasse 4 wurde dahingehend modifiziert, dass das Fahrzeug keine Verluste am Antriebsstrang und Motor aufweist. Somit kann ein direkter Vergleich der Energiebedarfswerte durchgeführt werden.

Bei den zu vergleichenden realen Trajektorien wurde darauf geachtet, dass diese mit der selben Empfangstechnologie des selben Herstellers aufgezeichnet wurden. Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode zur Energiebedarfsberechnung wird in diesem Kapitel als *EEA (Energy Estimation Algorithm)* bezeichnet.

Im zweiten Teil des Kapitels werden Hinweise zur notwendigen Bearbeitung bei Anwendung auf einen Netzgraphen gegeben, welche zu Testzwecken am Netzgraphen des Wiener Stadtgebiets durchgeführt wurde.

5.1 Validierung der Bewertungsmethodik

5.1.1 Streckenabschnitte Stadtautobahn (Streckentyp 10)

Die Strecken zur Validierung der Bewertungsfunktionen von Streckentyp 10 wurden auf einer österreichischen Stadtautobahn im Raum Linz im Juni 2010 aufgezeichnet. Bei der Wahl der Abschnitte wurde darauf geachtet, dass diese ein breites Spektrum an Geschwindigkeitsbeschränkungen aufweisen und zu unterschiedlichen Verkehrsbelastungen aufgezeichnet wurden. Außerdem wurden ein- bis mehrstreifige Abschnitte und ebenso Auf- und Abfahrtsrampen zur Validierung herangezogen. Tabelle 5.1 und Abbildung 5.1 geben eine Übersicht der 16 gewählten Abschnitte mit den wichtigen Informationen. Die Steigungen der Abschnitte wurden unter 2% gemessen, sodass keine zusätzliche Kraft zur Überwindung der Steigung oder Begünstigung eines Gefälles berücksichtigt werden muss. Zur Vereinfachung wurden deshalb ebenfalls keine Energieaufwände zur Überwindung der Steigungswiderstände an den Rampen berechnet. In Abbildung 5.1 werden die Streuungen der Geschwindigkeiten und Reisezeiten pro Abschnitt aufgetragen. Dafür wurden die durchschnittlichen Geschwindigkeiten und die Reisezeiten pro Trajektorie gebildet.

5. VALIDIERUNG UND ANWENDUNG

Tabelle 5.1: Übersicht der Streckenabschnitte zur Überprüfung der Bewertungsfunktionen von Streckentyp 10.

Abschnitt	Information	Abschnittslänge	Geschwindigkeit
		[m]	[km/h]
01	1-streifiger Abschnitt	351	130
02	2-streifiger Abschnitt	2493	130
03	2-streifiger Abschnitt	834	130
04	2-streifiger Abschnitt	3371	130,100,80
05	2-streifiger Abschnitt	690	80
06	2-streifiger Abschnitt	855	80
07	2-streifiger Abschnitt	936	80
08	3-streifiger Abschnitt	424	80
09	2-streifiger Abschnitt	160	80
10	2-streifiger Abschnitt	1906	80
11	2-streifiger Abschnitt	409	80
12	2-streifiger Abschnitt	766	80
13	2-streifiger Abschnitt	415	80
14	1-streifige Auffahrt	375	80
15	1-streifige Auffahrt	246	80
16	1-streifige Abfahrt	382	80

Die entwickelten Funktionen zur Berechnung des Energiebedarfs nach (4.1) wurden verwendet, wobei die Eingangsparameter für die jeweilige durchschnittliche Geschwindigkeit der Trajektorie und der zu diesem Zeitpunkt vorherrschende Auslastungsgrad berücksichtigt wurden. Die Vergleiche der detaillierten PHEM-Ergebnisse und der EEA-Ergebnisse werden in den Abbildungen 5.2 und 5.3 aufgetragen, welche gute Übereinstimmungen zeigen. Zusätzlich zu den Ergebnissen sind in Abbildung 5.2 die Winkelhalbierenden eingezeichnet, was eine absolute Übereinstimmung der Ergebnisse anzeigt und die jeweiligen Korrelationskoeffizienten r für den Streckentyp 10 bei allen Auslastungsgraden, welche über 0.90 liegen. Laut Definition des Korrelationskoeffizienten gibt dieser eine Aussage über den linearen Zusammenhang zwischen 1 und -1 (negative Korrelation) an, wobei Werte gegen 0 keine Korrelation bedeuten und Werte mit ± 1 eine vollkommene Übereinstimmung anzeigen.

Ein übliches Vorgehen ist den Korrelationskoeffizienten als Bestimmungsgröße des Übereinstimmungsgrades heranzuziehen, was sich jedoch als nicht sehr aussagekräftig erweist. Ein hoher Wert des Koeffizienten beweist nicht gleichzeitig eine hohe Übereinstimmung, da der Koeffizient vom gewählten Datenbereich und der Verteilung abhängig ist und systematische Abweichungen nicht berücksichtigen kann (Bland & Altman 2003).

Auch ein Ergebnisvergleich mittels Regressionsmethodik ist nicht zielführend, da diese nur die Abhängigkeit der Daten anzeigt, aber nicht die Übereinstimmung. Ebenso bietet ein Mittelwert-Vergleich mit gepaarten t-Test keinen Aufschluss über die Übereinstimmung. Der t-Test be-

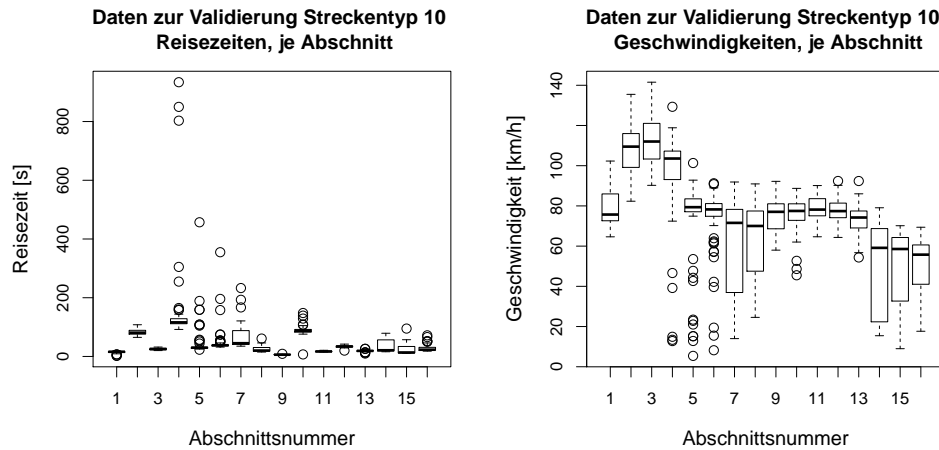


Abbildung 5.1: Verteilungen der Reisezeiten und Geschwindigkeiten je Abschnitt zur Validierung der Streckentyp-10-Funktionen.

trachtet die durchschnittliche Differenz der Wertepaare, jedoch nicht die Größenordnungen der Einzelmessungen.

Alternativ zu den betrachteten Vergleichsmethoden wird die *Bland-Altman-Methode* (Altman & Bland 1983) gewählt. Diese Methode berücksichtigt nicht die durchschnittlichen Differenzen der Ergebnisse (Verzerrung) sondern die Streuung der Differenzen der einzelnen Ergebnisse. Abbildung 5.4 zeigt das einfache, grafische Verfahren, um Abweichungen, Ausreißer und Abhängigkeiten der Varianz von der Größe der Ergebnisse zu identifizieren. Üblicherweise werden dabei die Differenzen der Ergebnispaare gegen den Mittelwert aufgetragen, da die Plots für den Vergleich von medizinischen Messverfahren, die mit Messfehlern behaftet sind, entwickelt wurden. Für diese Anwendung sind zwar die PHEM-Ergebnisse ebenfalls modellierte Ergebnisse mit geringen Abweichungen zur Realität, aber werden als Referenzmessung herangezogen. Die individuellen Abweichungen der Ergebnisse lassen sich in Abbildung 5.4 besser als in Abbildung 5.2 ablesen. Ebenfalls sind die sogenannten *Übereinstimmungsgrenzen* (limits of agreement) eingezeichnet (strichlierte Linien) und die durchschnittliche Abweichung der Ergebnisse (durchgezogene Linie) angegeben. Bei guter Übereinstimmung liegen innerhalb dieser Grenzen, welche die zweifache Standardabweichung s der Differenzen darstellen, 95% der Werte. Die durchschnittlichen Abweichungen der Schätzergebnisse von den PHEM-Ergebnissen gehen bei allen Auslastungsgraden für den Streckentyp 10 gegen 0kWh. Auch zeigen die Übereinstimmungsgrenzen ein enges Akzeptanzband, was eine sehr gute Übereinstimmung kennzeichnet.

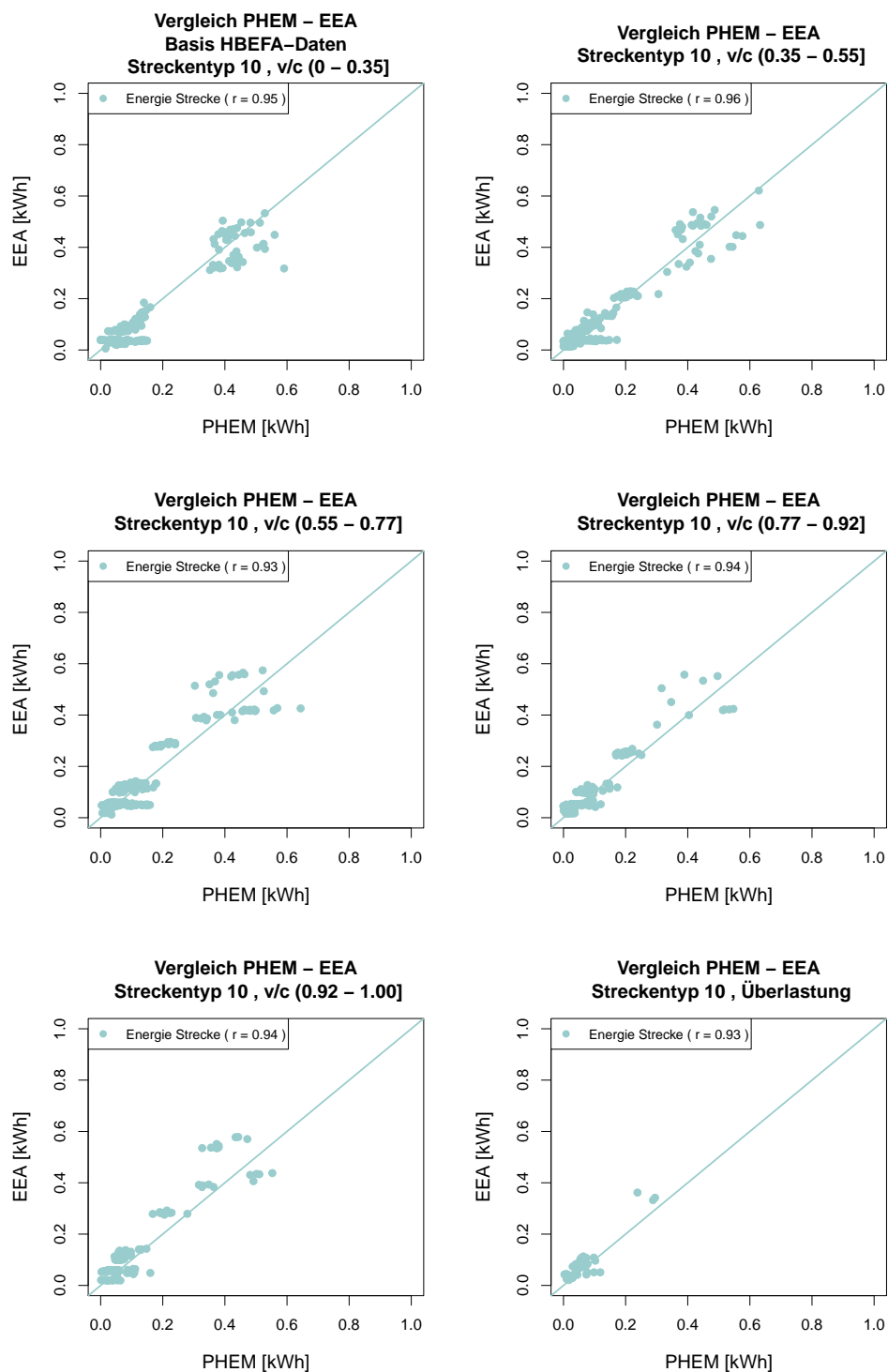


Abbildung 5.2: Die Ergebnisse der PHEM- und EEA-Ergebnisse des Streckentyps 10 werden für jeden Auslastungsgrad verglichen, der jeweilige Korrelationskoeffizient ist angegeben. Für den Freeflow-Bereich wurden die generierten Funktionen aus allen HBEFA-Daten verwendet, da die Funktionen aus Simulationsdaten eine geringe Überbewertung zur Folge hätten. Die 45° Linie für eine absolute Übereinstimmung ermöglicht eine zusätzliche, grafische Überprüfung.

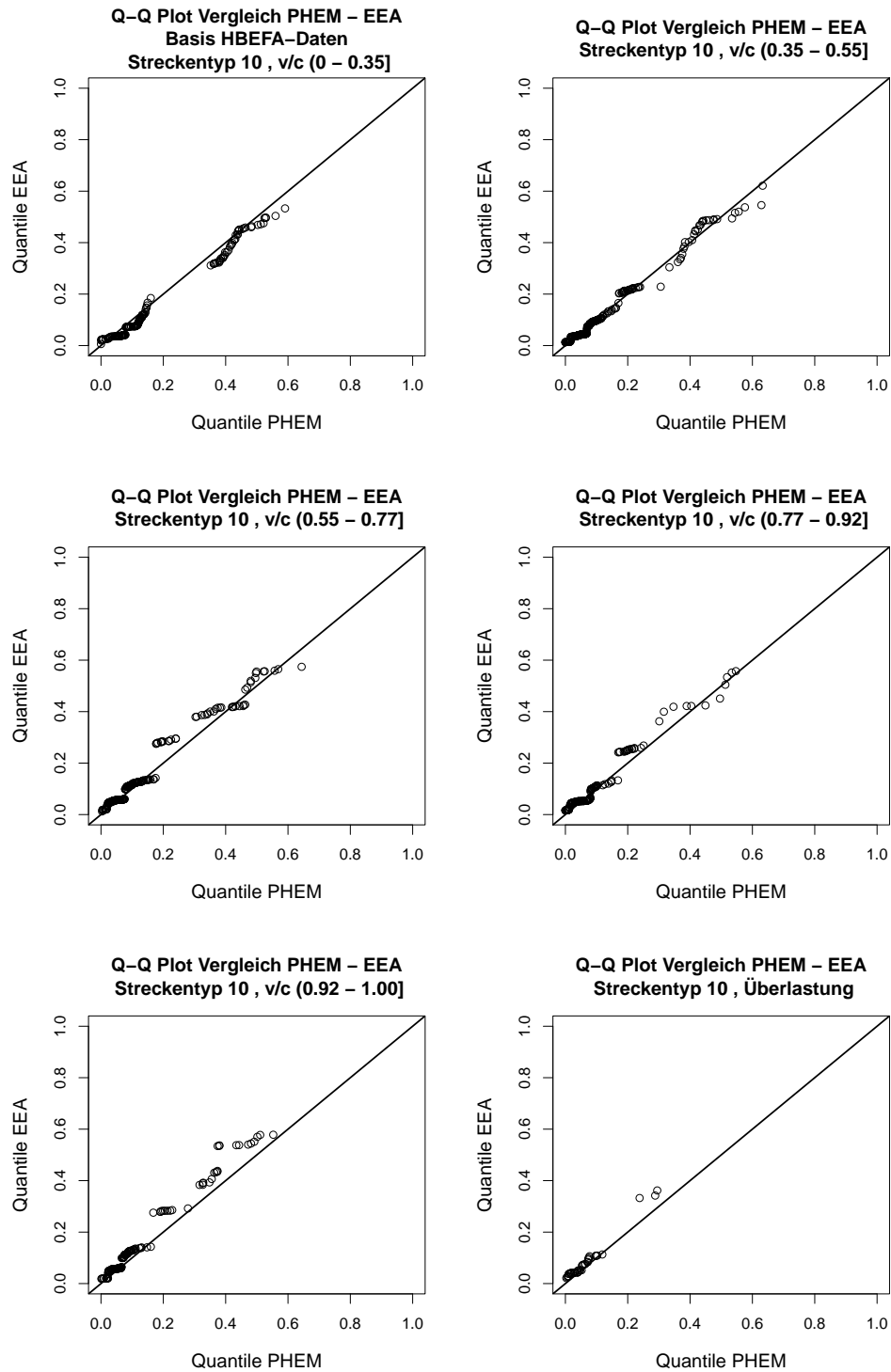


Abbildung 5.3: Die Ergebnisse der PHEM- und EEA-Ergebnisse des Streckentyps 10 werden für jeden Auslastungsgrad in der Q-Q Plot Darstellung verglichen, um Über- bzw. Unterbewertungen zu identifizieren.

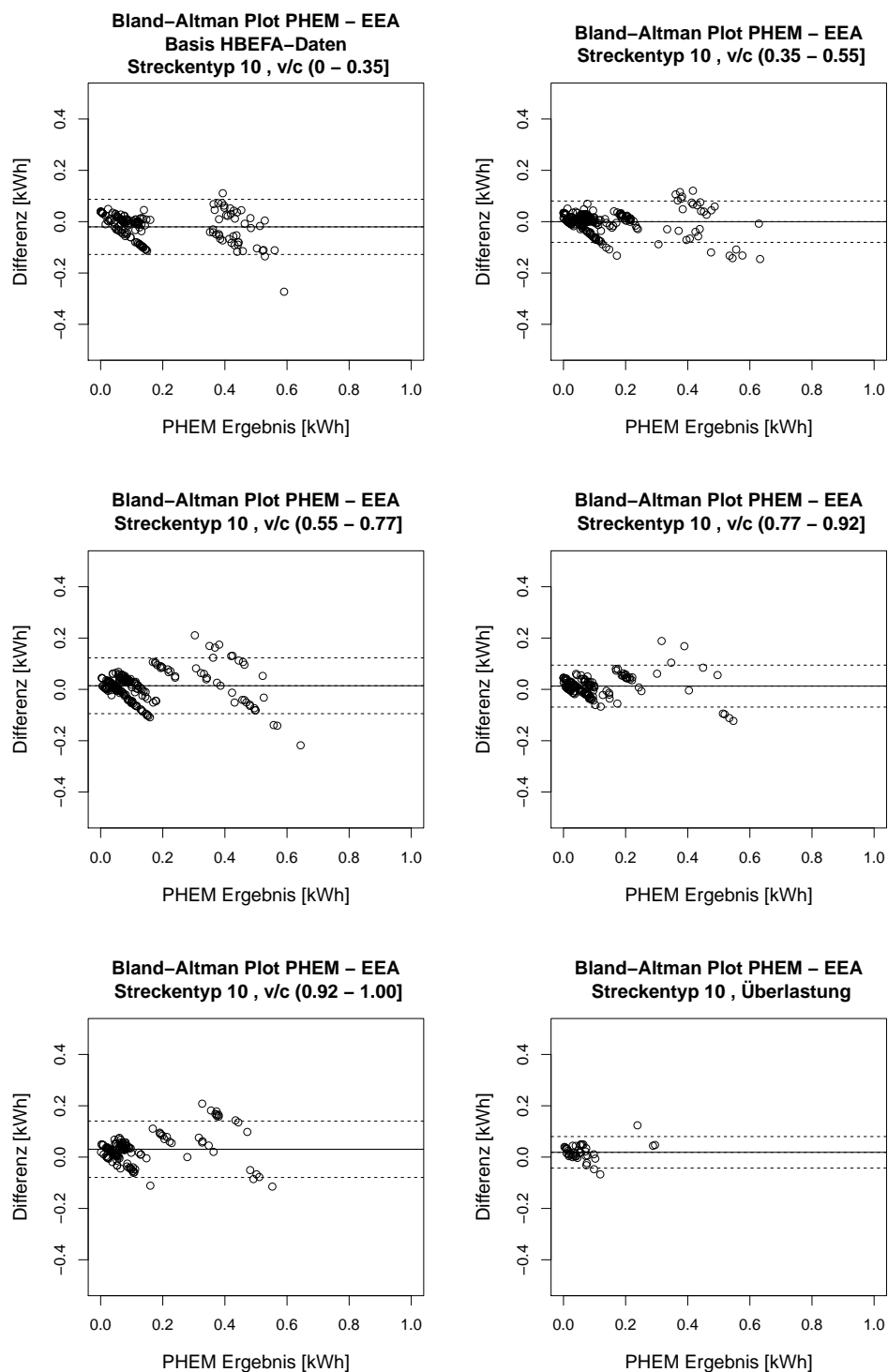


Abbildung 5.4: Die Ergebnisse der PHEM- und EEA-Ergebnisse des Streckentyps 10 werden für jeden Auslastungsgrad auf Basis des Bland-Altman Plots verglichen. Für den Freeflow-Bereich wurden die generierten Funktionen aus allen HBEFA-Daten verwendet. Die durchgezogene Linie bedeutet die durchschnittliche Abweichung der Ergebniswert, die strichlierten Linien kennzeichnen den Übereinstimmungsbereich mit der 2-fachen Standardabweichung der Differenzen.

5.1.2 Streckenabschnitte Hauptstraße (Streckentyp 20) inkl. Knotenüberfahrt

Die Streckenabschnitte des Streckentyps 20 wurden auf hochbelasteten Straßen des Grazer Stadtgebietes im Jänner und November 2012 befahren. Dabei wurden die Fahrverläufe mit GPS-Receivern mit 10Hz Empfangsrate aufgezeichnet. Bei den Streckenabschnitten handelt es sich jeweils um einen Abschnitt mit nachfolgender Überfahrt eines Knotenpunktes. Hauptstraßen zeichnen sich dadurch aus, dass diese mit gut koordinierten LSA ausgestattet sind und die Nebenströme nur geringe Koordinierungsbrüche verursachen. Tabelle 5.2 und Abbildung 5.5 geben eine Übersicht zu den gewählten Abschnitten.

Tabelle 5.2: Übersicht der Streckenabschnitte zur Überprüfung der Bewertungsfunktionen von Streckentyp 20.

Nr.	Information	Abschnittslänge inkl. Knoten [m]	Geschwindigkeit [km/h]
01	2-streifiger Abschnitt, Geradeausfahrt	454	60
02	2-streifiger Abschnitt, Geradeausfahrt	358	60
03	2-streifiger Abschnitt, Geradeausfahrt	260	60
04	2-streifiger Abschnitt, Geradeausfahrt	833	60

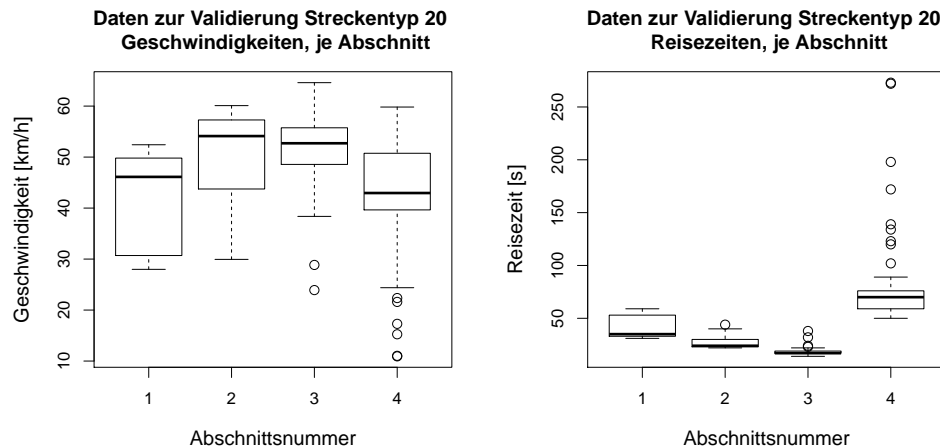


Abbildung 5.5: Verteilungen der Reisezeiten und Geschwindigkeiten je Abschnitt zur Validierung der Streckentyp 20 Funktionen.

Schon bei der Analyse der HBEFA-Daten zeigte sich eine geringe Belastungsabhängigkeit der Kenngrößen, was sich bei den Simulationsdaten bestätigt. Deshalb wurden die Funktionen für den Streckentyp 20 über alle Verkehrsbelastungszustände der Simulationsdurchläufe erstellt. Die Bestimmung der Kenngrößen nach unterschiedlichen Belastungen wird somit nur auf Basis der Geschwindigkeit durchgeführt.

Die Ergebnisse der Vergleiche der detaillierten PHEM-Berechnungen und der entwickelten EEA-Ergebnisse werden in Abbildung 5.6 gezeigt. Darin sind die Ergebnisse der Schätzungen für

5. VALIDIERUNG UND ANWENDUNG

drei Berechnungsvarianten aufgetragen: Energiewert nur für Streckenbefahrung (helle Punkte), für Strecke und Abbiegemanöver (dunklere Punkte) und für Strecke und Abbiegemanöver inkl. Energiezuschlag (dunkle Punkte). Darin ist zu sehen, dass die Berücksichtigung der zusätzlichen Aufwände für Abbiegemanöver den Energiebedarf anhebt. Nur die Berücksichtigung der Streckenbefahrung ist nicht ausreichend.

Abbildung 5.7 und 5.8 zeigen den Ergebnisvergleich mit der dritten Berechnungsvariante (Strecke, Abbiegemanöver und Zuschlag). Dabei ist zu erkennen, dass grundsätzlich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse erzielt wird und die durchschnittlichen Differenzen gegen 0kWh gehen. Im höheren Belastungsbereich bzw. bei Überbelastung sind jedoch einige Ausreißer zu sehen, welche mit der Schätzmethode nicht abgebildet werden konnten.

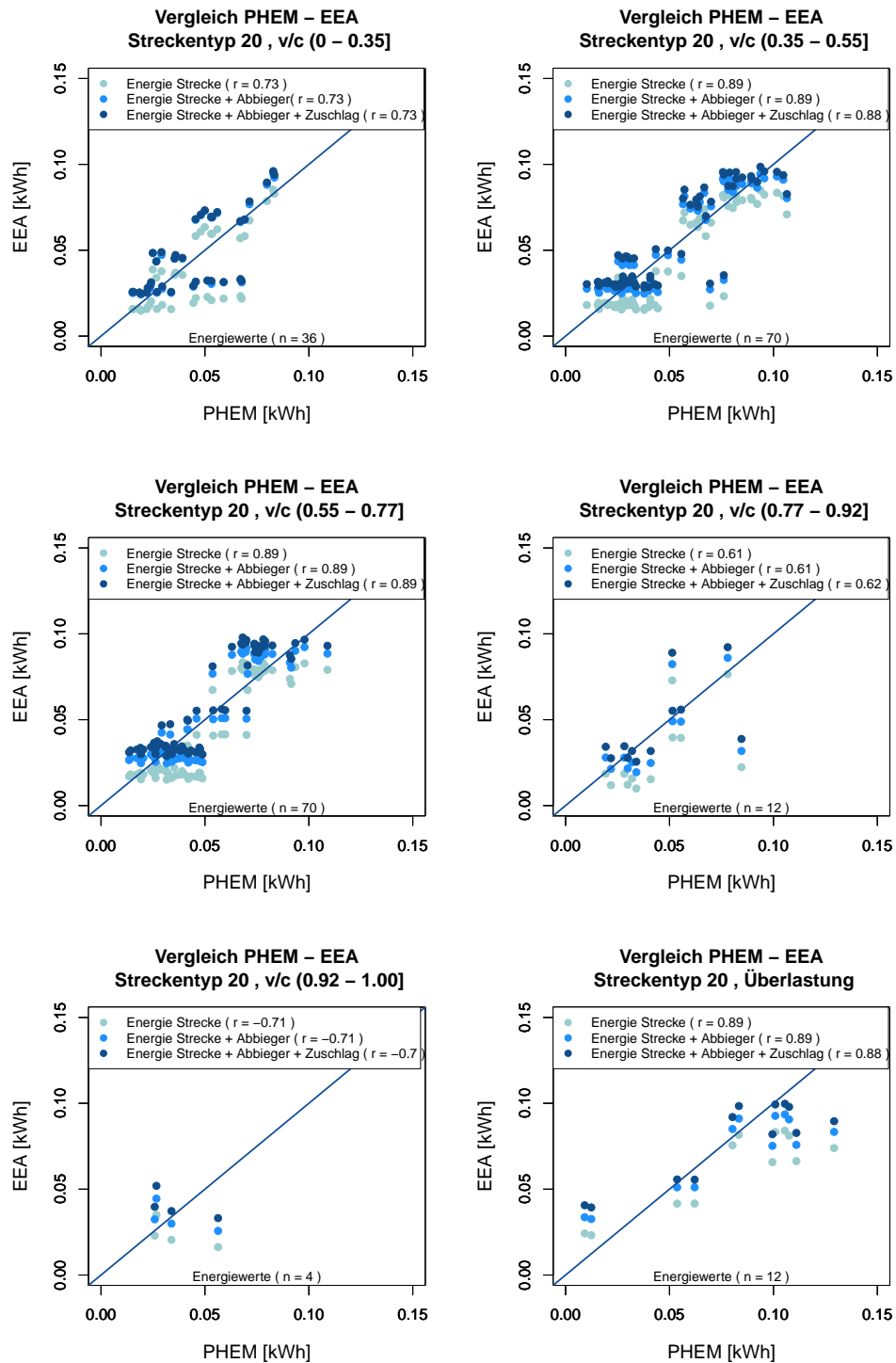


Abbildung 5.6: Die Ergebnisse der PHEM- und EEA-Ergebnisse des Streckentyps 20 werden für jeden Auslastungsgrad verglichen, der jeweilige Korrelationskoeffizient ist angegeben. Für den Freeflow Bereich wurden die Funktionen der Simulationsdaten herangezogen, da die HBEFA-Daten eine Überbewertung verursachen. Die 45° Linie für eine absolute Übereinstimmung ermöglicht eine zusätzliche, grafischen Überprüfung. Helle Punkte: Energiewert für Streckenbefahrung, dunklere Punkte: Strecke und Abbiegemanöver, dunkle Punkte: Strecke und Abbiegemanöver inkl. Energiezuschlag.

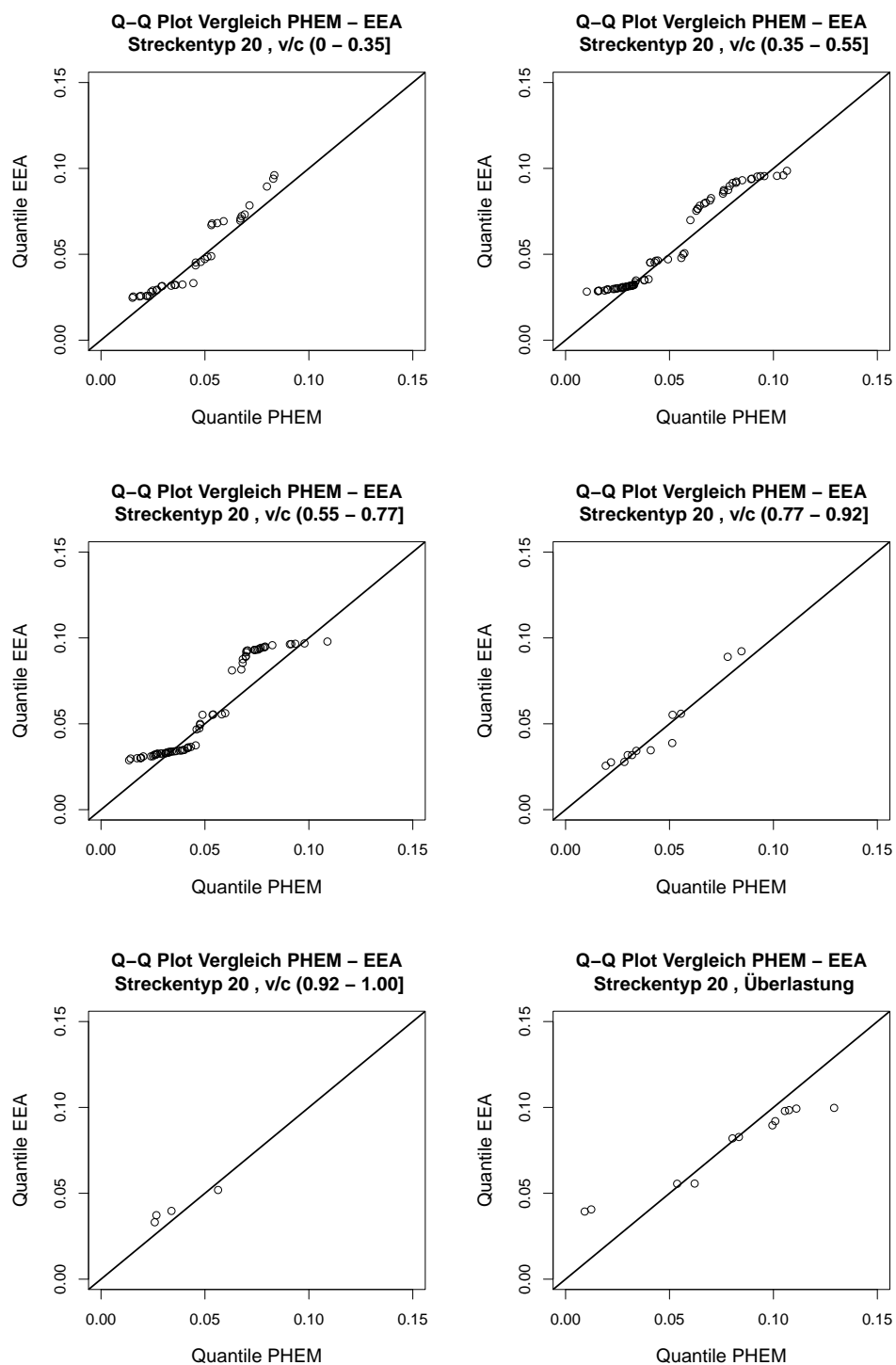


Abbildung 5.7: Die Ergebnisse der PHEM- und EEA-Ergebnisse des Streckentyps 20 werden für jeden Auslastungsgrad in der Q-Q Plot Darstellung verglichen. Der gesamte Energiebedarf für Streckenbefahrung und Abbiegemanöver inkl. Energiezuschlag wurde gegen den jeweiligen Energiebedarf der PHEM-Berechnung aufgetragen.

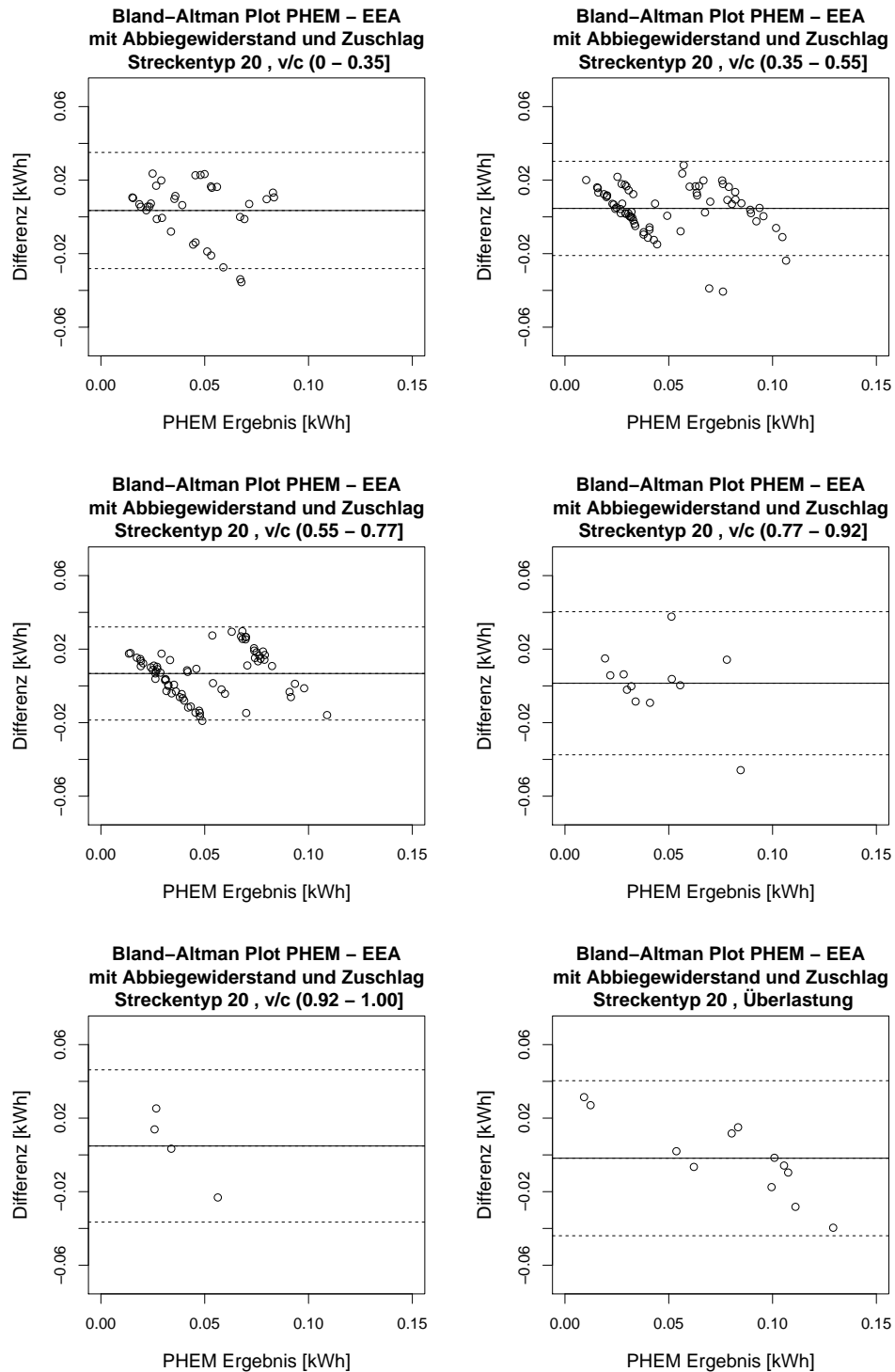


Abbildung 5.8: Die Ergebnisse der PHEM- und EEA-Ergebnisse des Streckentyps 20 werden für jeden Auslastungsgrad auf Basis des Bland-Altman Plots verglichen. Die Energiebedarfswerte zur Streckenbefahrung, Abbiegemanöver und Zuschlagswerte wurden herangezogen.

5.1.3 Streckenabschnitte Verteilerstraße (Streckentyp 30) inkl. Knotenpunkt

Die Strecken für die Untersuchung für Streckentyp 30 wurden im Oktober 2012 mittels GPS-Receivern aufgezeichnet. Die Daten wurden auf Basis von 1Hz bearbeitet und ausgewertet. Die Wahl der Abschnitte fiel auf viel befahrene Strecken im Grazer Stadtgebiet mit LSA. Die Fahrverläufe beinhalten jeweils die Knotenpunktsfahrt, damit die gesamte Berechnung inkl. Zuschlägen durchgeführt und verglichen werden kann. In Tabelle 5.3 wird eine Auflistung der sechs gewählten Abschnitte mit den Informationen der Abschnittslänge und Geschwindigkeitsbegrenzungen gegeben. Abbildung 5.9 gibt eine Übersicht der Verteilungen von Geschwindigkeiten und Reisezeiten auf den Abschnitten, wobei jeweils die durchschnittlichen Kennwerte pro Trajektorie gebildet wurden.

Tabelle 5.3: Übersicht der Streckenabschnitte zur Überprüfung der Bewertungsfunktionen von Streckentyp 30.

Abschnitt	Information	Abschnittslänge inkl. Knoten [m]	Geschwindigkeit [km/h]
01	Abschnitt mit Linksabbiegen	340	50
02	Abschnitt mit Linksabbiegen	404	50
03	Abschnitt mit Rechtsabbiegen	209	50
04	Abschnitt mit Geradeausfahrt	225	50
05	Abschnitt mit Linksabbiegen	339	50
06	Abschnitt mit Rechtsabbiegen	292	50

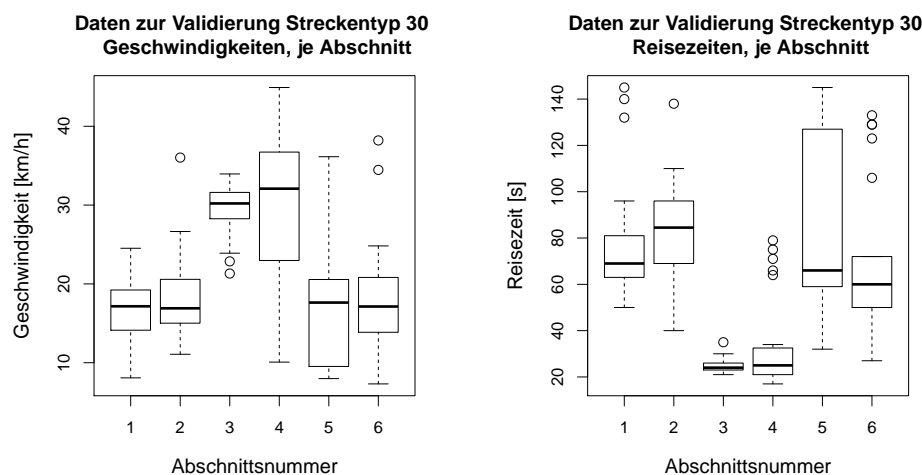


Abbildung 5.9: Verteilungen der Reisezeiten und Geschwindigkeiten je Abschnitt zur Validierung der Streckentyp 30 Funktionen.

In Abbildung 5.10 wird der Vergleich der Ergebnisse präsentiert. Die Berechnungsergebnisse im geringen Belastungsbereich zeigen eine sehr gute Übereinstimmung durch Einbeziehung des Energiezuschlages für LSA-Knotenpunkte (Abbildung 5.11). Im höheren Belastungsbereich sind

geringe Überbewertungen durch den Energiezuschlag zu erkennen. Deshalb werden die Abbildungen 5.12 bis 5.14 angeführt, um zu zeigen, dass im niedrigen Belastungsbereich die Zuschläge miteinbezogen werden müssen und in diesem Fall im höheren Bereich der Knotenpunktseinfluss durch die niedrige Geschwindigkeit bereits Einfluss genommen hat und keine zusätzliche Betrachtung benötigt. Diese differenzierte Betrachtung muss im Anwendungsfall mit den Eingangsdaten des Verkehrslagemodells abgestimmt werden, ob Knotenpunktseinflüsse in den Streckendaten enthalten sind oder herausgenommen wurden.

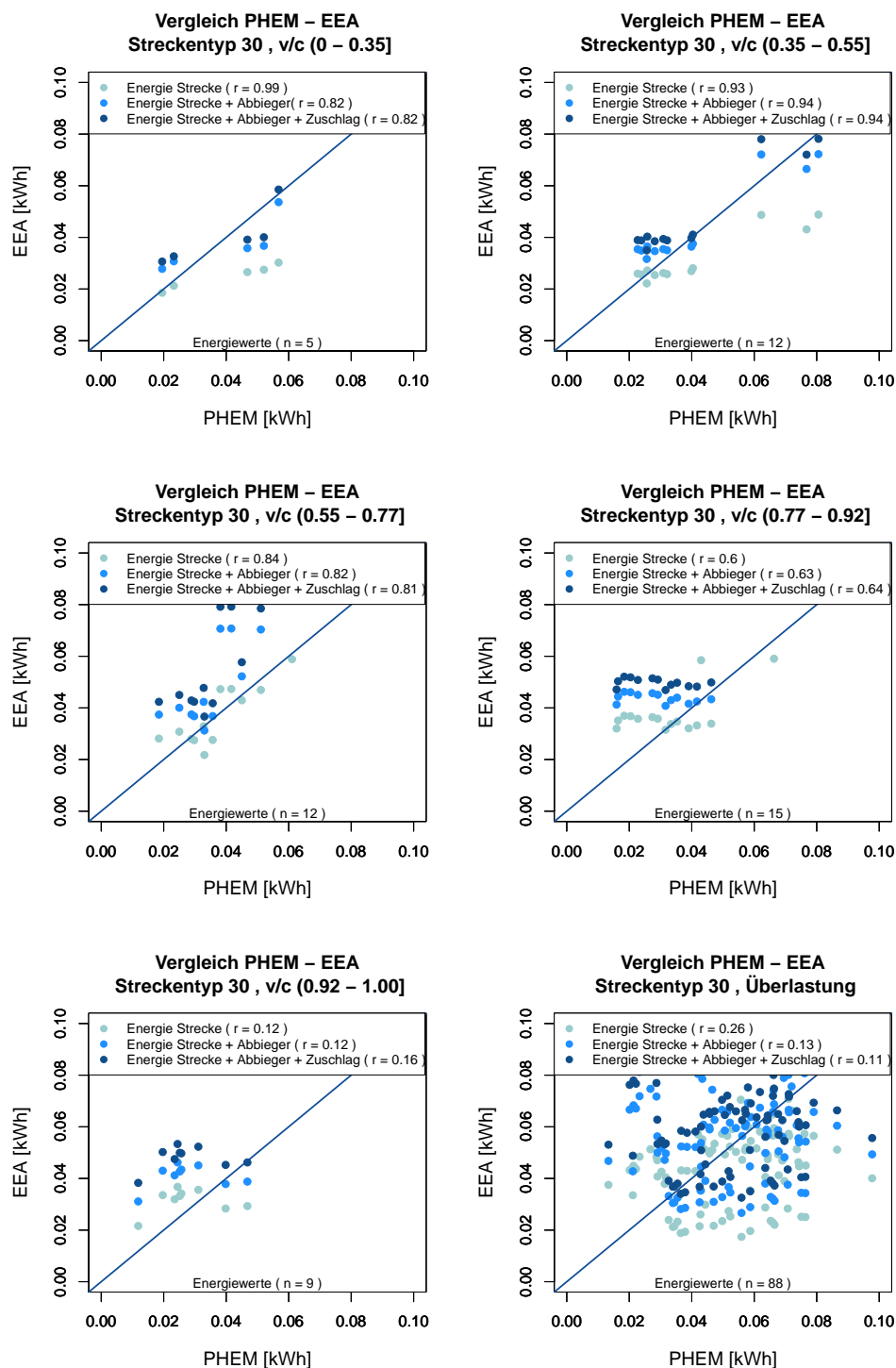


Abbildung 5.10: Die Ergebnisse der PHEM- und EEA-Ergebnisse des Streckentyps 30 werden für jeden Auslastungsgrad verglichen, der jeweilige Korrelationskoeffizient ist angegeben. Für den Freeflow Bereich wurden die Funktionen der Simulationsdaten herangezogen, da die HBEFA-Daten eine Überbewertung verursachen. Die 45° Linie für eine absolute Übereinstimmung ermöglicht eine zusätzliche, grafischen Überprüfung. Helle Punkte: Energiewert für Streckenbefahrung, dunklere Punkte: Strecke und Abbiegemanöver, dunkle Punkte: Strecke und Abbiegemanöver inkl. Energiezuschlag.

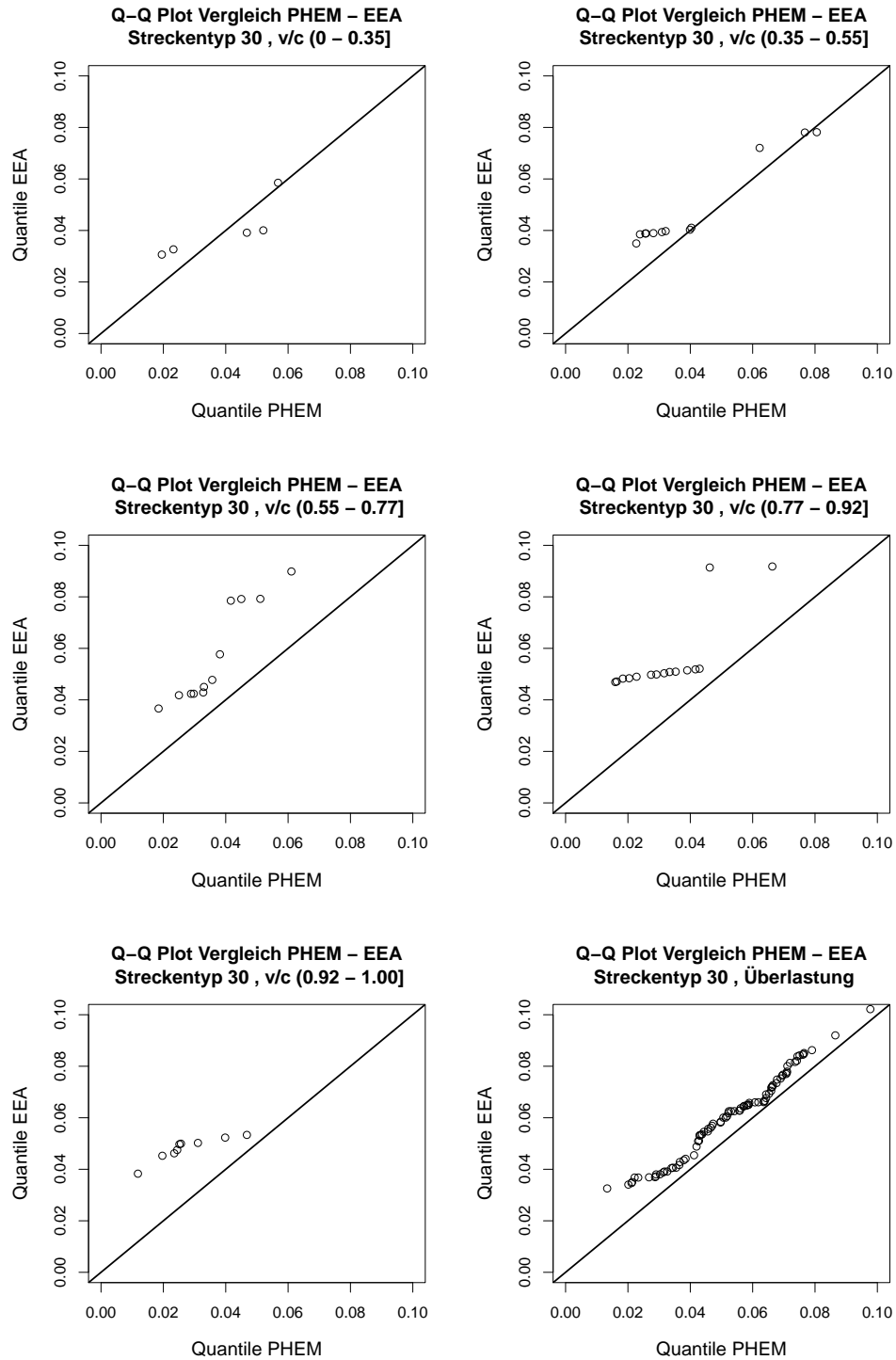


Abbildung 5.11: Die Ergebnisse der PHEM- und EEA-Ergebnisse des Streckentyps 30 werden für jeden Auslastungsgrad in der Q-Q Plot Darstellung verglichen. Der gesamte Energiebedarf für Streckenbefahrung und Abbiegemanöver inkl. Energiezuschlag wurde gegen den jeweiligen Energiebedarf der PHEM-Berechnung aufgetragen.

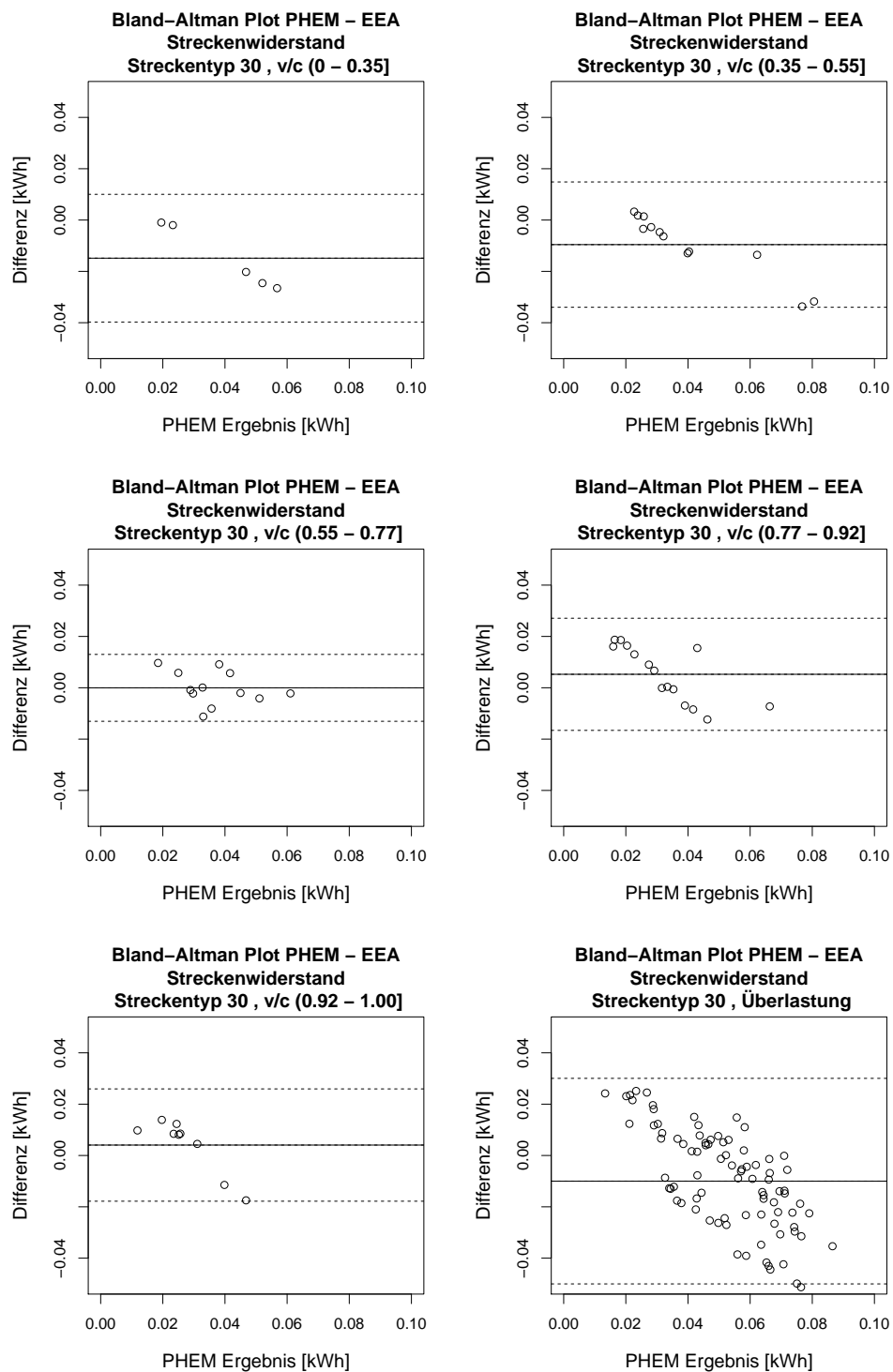


Abbildung 5.12: Die Ergebnisse der PHEM- und EEA-Ergebnisse des Streckentyps 30 werden für jeden Auslastungsgrad auf Basis des Bland-Altman Plots verglichen. Die Energiebedarfswerte zur Streckenbefahrung wurden herangezogen.

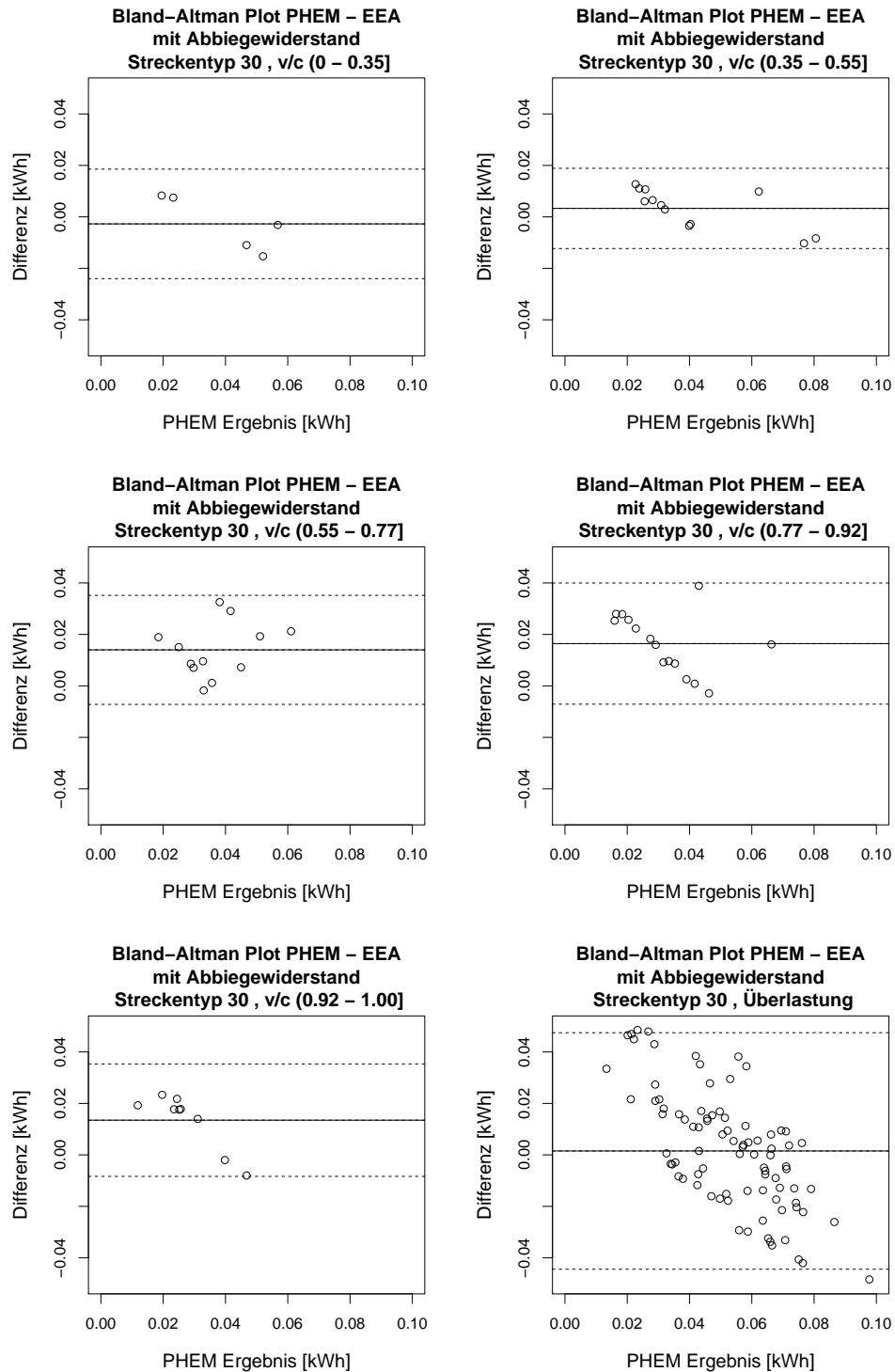


Abbildung 5.13: Die Ergebnisse der PHEM- und EEA-Ergebnisse des Streckentyps 30 werden für jeden Auslastungsgrad auf Basis des Bland-Altman Plots verglichen. Die Energiebedarfswerte zur Streckenbefahrung und des Abbiegemanövers wurden herangezogen.

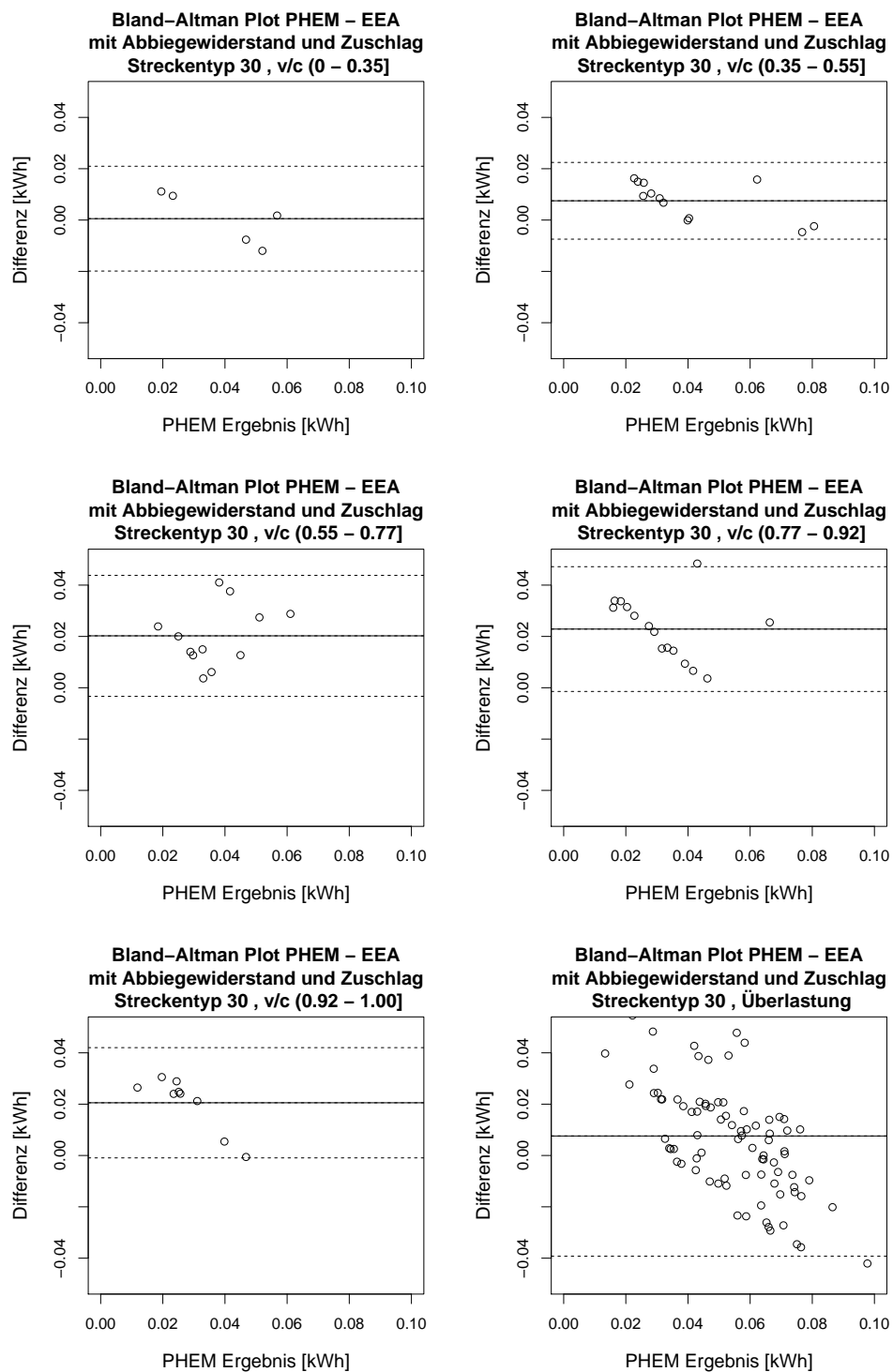


Abbildung 5.14: Die Ergebnisse der PHEM- und EEA-Ergebnisse des Streckentyps 30 werden für jeden Auslastungsgrad auf Basis des Bland-Altman Plots verglichen. Die Energiebedarfswerte zur Streckenbefahrung, Abbiegemanöver und Zuschlagswerte wurden herangezogen.

5.1.4 Streckenabschnitte Sammelstraßen (Streckentyp 40) inkl. Knotenpunkt

Es wurden zehn Abschnitte zur Evaluierung der entwickelten Funktionen und Parameter für Streckentyp 40 gewählt. Diese Abschnitte befinden sich in der Grazer Innenstadt und wurden mittels GPS-Technologie im Oktober 2012 aufgezeichnet. Die Streckenabschnitte befinden sich in Gebieten mit Knotenpunkten ohne LSA. Eine Übersicht zu den Abschnitten geben Tabelle 5.4 und Abbildung 5.15.

Die Vergleichsabbildung der Ergebnisse (Abbildung 5.16 bis 5.18) zeigen durch Einbeziehung der Abbiegemanöver und Zuschläge eine sehr gute Übereinstimmung (Differenz der Ergebnisberechnung gegen 0kWh).

Tabelle 5.4: Übersicht der Streckenabschnitte zur Überprüfung der Bewertungsfunktionen von Streckentyp 40. Die Abschnittslänge stellt die mittlere zurückgelegte Distanz über alle Fahrten dar.

Abschnitt	Information	Abschnittslänge inkl. Knoten [m]	Geschwindigkeit [km/h]
01	Abschnitt mit Linksabbiegen	155	50
02	Abschnitt mit Linkseinbiegen	166	50
03	Abschnitt mit Rechtsabbiegen	153	50
04	Abschnitt mit Rechtseinbiegen	185	50
05	Abschnitt mit Linkseinbiegen	275	50
06	Abschnitt mit Rechtseinbiegen	227	50
07	Abschnitt mit Geradeausfahrt	156	50
08	Abschnitt mit Geradeausfahrt	80	50
09	Abschnitt mit Linksabbiegen	112	50
10	Abschnitt mit Rechtsabbiegen	127	50

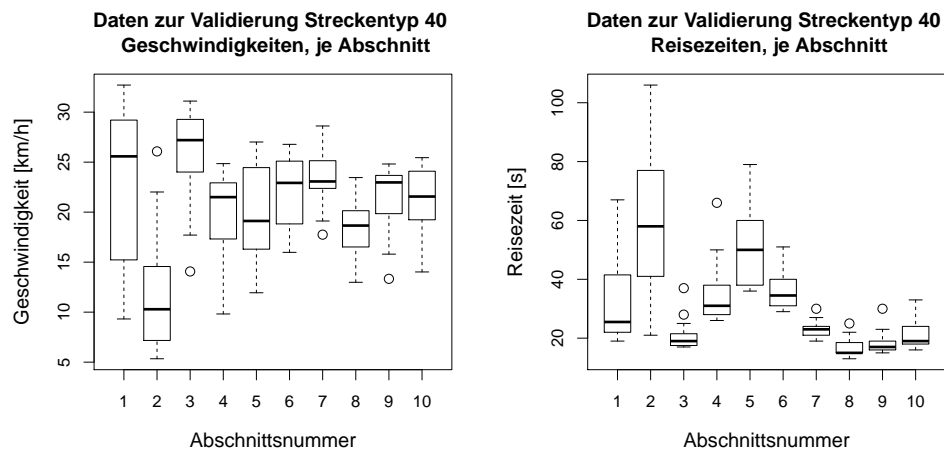


Abbildung 5.15: Verteilungen der Reisezeiten und Geschwindigkeiten je Abschnitt zur Validierung der Streckentyp 40 Funktionen.

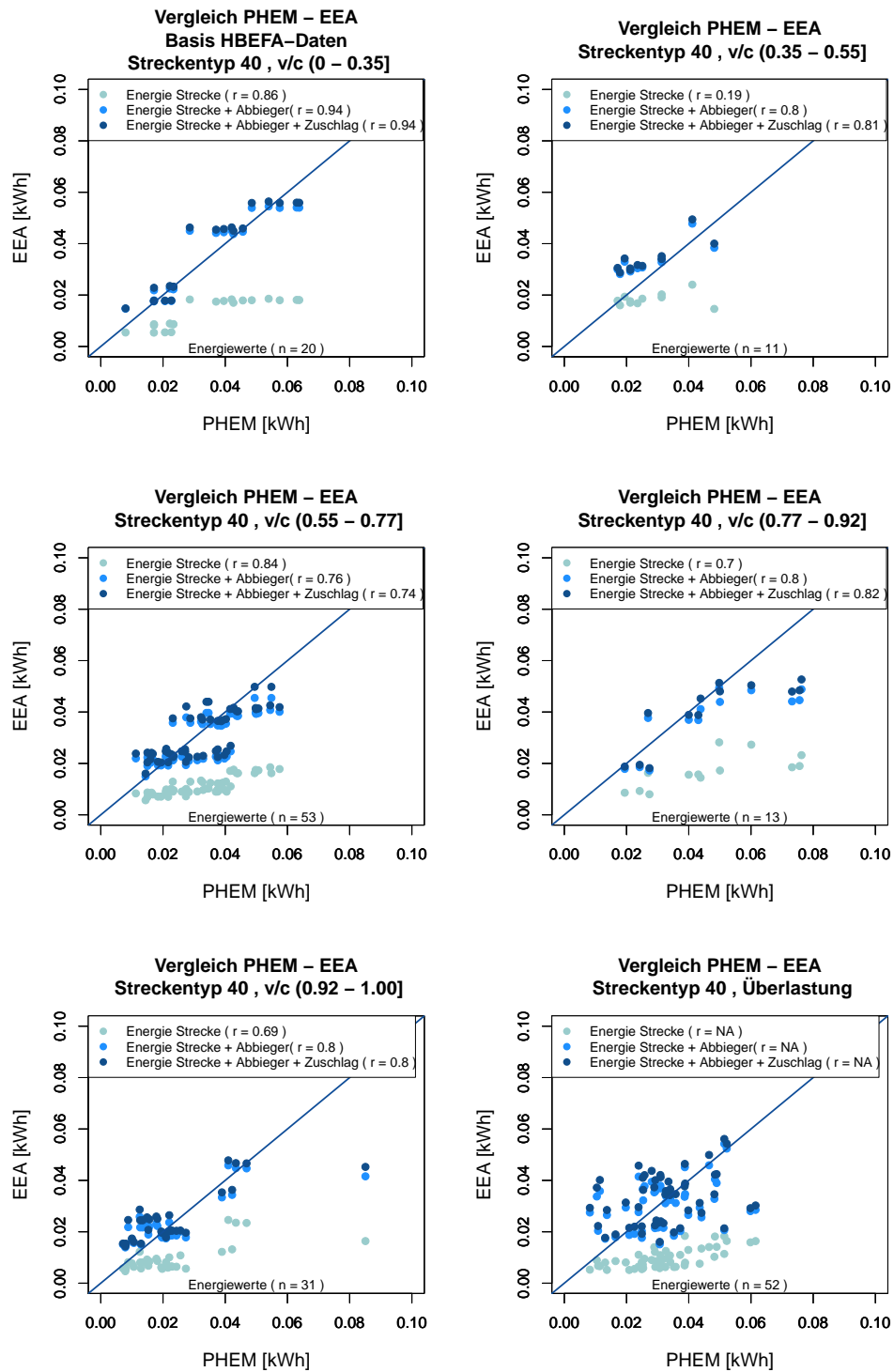


Abbildung 5.16: Die Ergebnisse der PHEM- und EEA-Ergebnisse des Streckentyps 40 werden für jeden Auslastungsgrad verglichen, der jeweilige Korrelationskoeffizient ist angegeben. Für den Freeflow-Bereich wurden die generierten Funktionen aus allen HBEFA-Daten verwendet, da die Funktionen aus Simulationsdaten eine geringe Überbewertung zur Folge hätten. Die 45° Linie für eine absolute Übereinstimmung ermöglicht eine zusätzliche, grafischen Überprüfung. Helle Punkte: Energiewert für Streckenbefahrung, dunklere Punkte: Strecke und Abbiegemanöver, dunkle Punkte: Strecke und Abbiegemanöver inkl. Energiezuschlag.

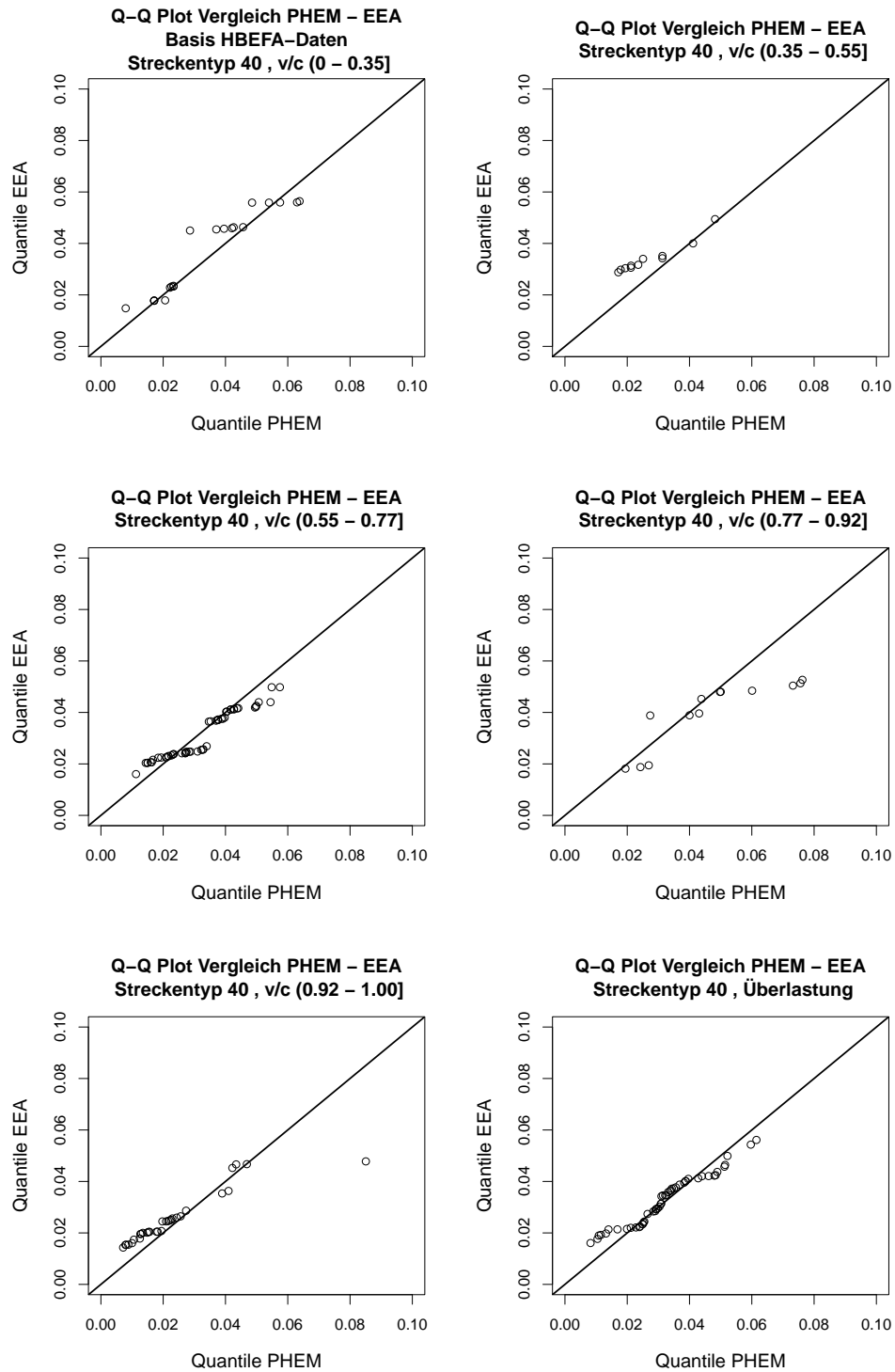


Abbildung 5.17: Die Ergebnisse der PHEM- und EEA-Ergebnisse des Streckentyps 40 werden für jeden Auslastungsgrad in der Q-Q Plot Darstellung verglichen. Der gesamte Energiebedarf für Streckenbefahrung und Abbiegemanöver inkl. Energiezuschlag wurde gegen den jeweiligen Energiebedarf der PHEM-Berechnung aufgetragen.

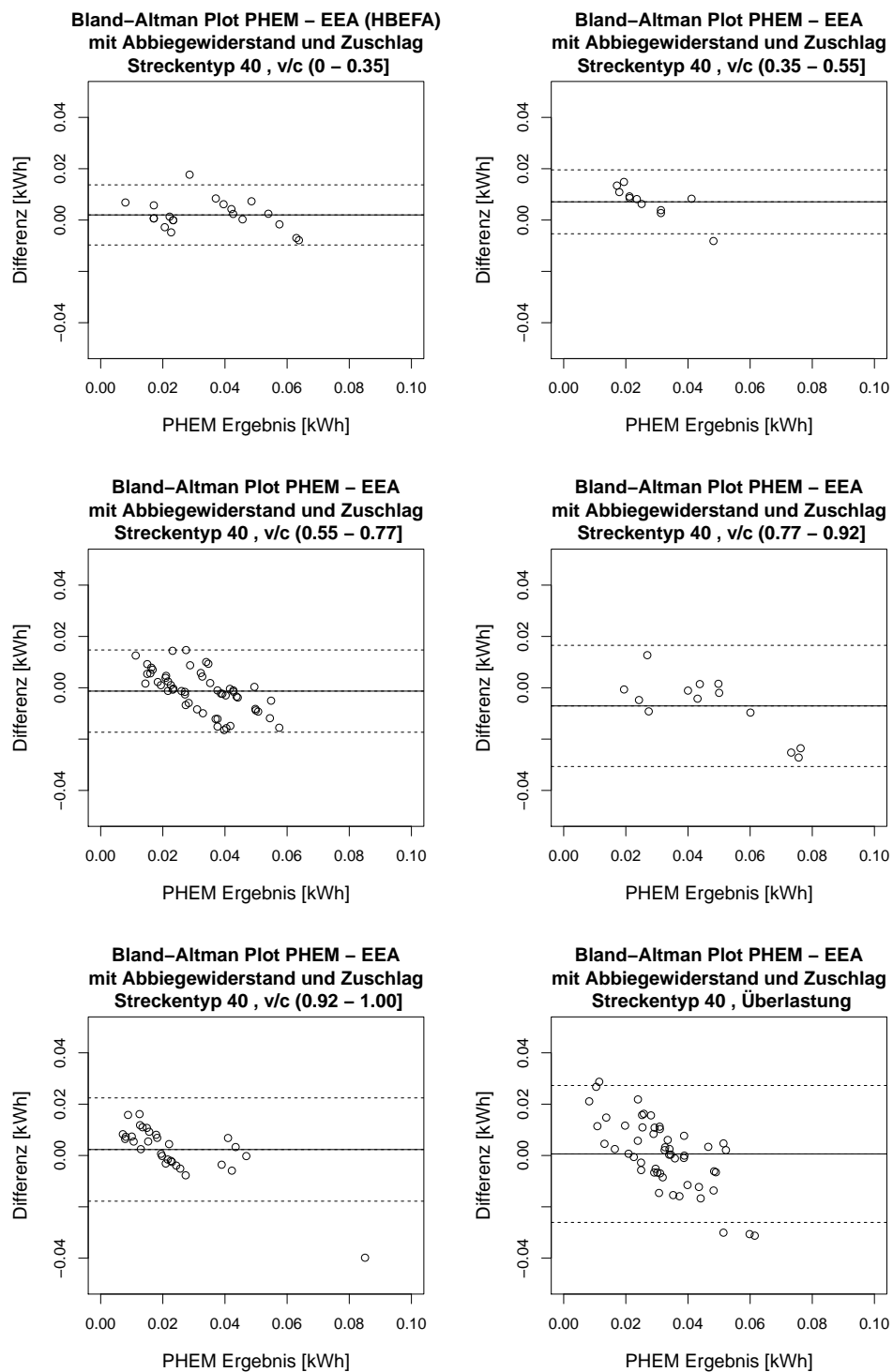


Abbildung 5.18: Die Ergebnisse der PHEM- und EEA-Ergebnisse des Streckentyps 40 werden für jeden Auslastungsgrad auf Basis des Bland-Altman Plots verglichen. Die Energiebedarfswerte zur Streckenbefahrung, Abbiegemanöver und Zuschlagswerte wurden herangezogen.

5.1.5 Wohnstraße (Steckentyp 50)

Bei Wohnstraßen wird davon ausgegangen, dass für diese Straßenkategorie kein online Verkehrs-lagemodell den aktuellen Verkehrszustand mit Berechnung der aktuell zu fahrenden Geschwindigkeit durchführt. Deshalb wird sich der Energiebedarf, welcher sich den Funktionen auf Basis der HBEFA-Daten und den Projektierungsgeschwindigkeiten der jeweiligen Strecke errechnet, im Laufe des Tages nicht verändern. Die Hinterlegung von Funktionen im Bewertungssystem und die Möglichkeit zur Veränderung sollte trotzdem gegeben sein, falls temporäre Baustellen, Fahrverbote oder andere Behinderungen in die Bewertung einfließen sollten.

Die Gewichtung der Strecken wird auf Basis der entwickelten Funktionen in Anhang B vorgeschlagen. Da diese Strecken mit geringen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen verbunden sind, ist eine belastungsunabhängige Betrachtung ausreichend. Eine Berücksichtigung von Abbiegeaufwänden ist in diesen Bereichen nicht sinnvoll und würde zu einer Überbewertung führen.

5.2 Zusammenfassung und Diskussion der Validierung

Durch die Gegenüberstellung von detaillierten PHEM Ergebnisse zu den Schätzergebnissen konnte gezeigt werden dass eine sehr gute Übereinstimmung erzielt werden konnte. Die zusätzliche Betrachtung der Streuung der Ergebnisdifferenzen gibt eine Aussage über die durchschnittlichen Abweichungen und den Übereinstimmungsgrenzen. Am hochrangigen Streckennetz zeigte sich eine realitätsgetreue Bewertung. Bei den niederrangigen Streckentypen müssen die zusätzlichen Aufwände für die Befahrung von Knotenpunkten einbezogen werden. Vor allem bei Streckenverläufen mit LSA-gesteuerten Knotenpunkten ist darauf zu achten, ob die Angabe zu den belastungsbedingten Geschwindigkeiten die Widerstände der Knotenpunkte enthalten oder nicht. Demnach muss entweder der Energiezuschlag berücksichtigt oder ignoriert werden.

5.3 Verwendung der Bewertungsmethodik bei städtischen Verkehrsnetzen

Im Jahre 2009 wurde ein Verkehrsinfoservice mit Echtzeitdaten für Wien, Niederösterreich und Burgenland der Öffentlichkeit präsentiert VOR (2012). Grundgedanke der Plattform ist es, intermodale Routeninformation bereitzustellen.

Für den motorisierten Individualverkehr errechnet das zugrunde liegende Verkehrsmodell dafür die Verkehrslage und -prognose aus aktuellen Verkehrsdaten und legt diese Ergebnisse auf ein digitales Verkehrsnetz, der Graphenintegrationsplattform (GIP). Die GIP stellt eine gemeinsame Datenbasis für alle Verwaltungsbehörden Österreichs dar, wozu eine Richtlinie RVS 05.01.14 (FSV 2012) veröffentlicht wurde. Ziel dieser Richtlinie ist es, einen Modellierungsstandard mit Mindestinhalten für einen routingfähigen Verkehrsgraphen zu definieren. Die Definition der Topologien und Attribute sind modusübergreifend formuliert und werden zukünftig für alle Gebietskörperschaften und öffentliche Infrastrukturbetreiber verwendet.

Für die Öffentlichkeit ist die aktuelle Verkehrslage des mIV durch Angabe des LOS zu sehen. Die errechnete Verkehrslage stellt im Hintergrund jedoch eine zusätzliche Datenbasis für den implementierten Routingalgorithmus dar.

Linkbasierte Geschwindigkeiten und Kenntnis über die aktuelle Verkehrsstärke sind im 5-Minuten-Raster aus dieser online Anwendung verfügbar. Die Bereitstellung von aktuellen Verkehrslagedaten ist ein Trend, der in vielen Städten, aber auch länderweit Einzug hält und somit diese entwickelte Bewertungsmethodik als realitätsnahes Verfahren erscheinen lässt. Um diese entwickelte Bewertungsmethodik anwenden zu können, sind grundlegende Bearbeitungen eines Verkehrswegenetzes, das die Basis für ein online-System ist, notwendig.

Notwendige Bearbeitung der Informationen eines Netzes

- Einpflegen von Streckentypen: entweder sind Streckenklassen eingepflegt oder es muss eine Festlegung auf Basis der Kenngrößen: Streckenkapazität, Anzahl der Fahrstreifen und Streckengeschwindigkeit im unbelasteten Zustand (v_0) erfolgen.
- Einpflegen von Abbiegetypen: Festlegung der Abbiegerichtung erfolgt auf Basis von Winkelangaben, die angegebenen Streckentypen der von- und nach-Strecke bestimmen, ob es sich um ein Abbiegen oder Einbiegen handelt, und der Steuerungstyp, ob signalisiert oder nicht signalisiert ist.
- Steigungsdaten: Festlegung der prozentualen Gesamtveränderung je Strecke auf Basis von Höhendaten.
- Grundgewichtung der Strecken auf Basis der HBEFA-Funktionen im unbelasteten Verkehrszustand.
- Grundgewichtung der Abbieger auf Basis von festgelegten Größen der Kennwerte (unbelasteter Verkehrszustand).

Auf Basis der hinterlegten, entwickelten Schätzfunktionen (Kapitel 4), die mittels einer Codierung eindeutig identifizierbar sind (siehe Anhang D), können die Parameter für die Energiebedarfsberechnung erzeugt werden. Zusätzlich muss eine Datenbasis für die Berechnungen von unterschiedlichen Fahrzeugtypen vorhanden sein.

Mit diesem versorgten Datenbestand kann on-the-fly bei Anfrage eines Fahrzeuges oder eines zentral-gesteuerten Routingserverns die Bewertung durchgeführt und übergeben werden.

Basisinformationen der Netzkomponenten

Als Ausgangslage kann mit den Streckeninformationen Streckenlänge, Kapazität, Geschwindigkeit v_0 im unbelasteten Zustand und der Anzahl der Fahrstreifen gerechnet werden. Damit können die Streckentypen je nach Definition der Grenzen festgelegt werden, wobei die höchste Priorität

Tabelle 5.5: Auf Basis von Kapazitätsgrenzen, Anzahl der Fahrstreifen und Geschwindigkeit wurden die fünf definierten Streckentypen dem Verkehrsnetz im IV von Wien zugewiesen.

Streckentyp	Anzahl der Links
10 hochrangige Straße	400
20 Hauptstraße	3651
30 Verteilerstraße	11646
40 Sammelstraße	20452
50 Wohnstraße	8399

die versorgte Kapazität hat und danach auf die Kombination Geschwindigkeit und Fahrstreifenanzahl übergegangen werden sollte.

Bei den Abbiegerelationen hingegen sind in den überwiegenden Fällen lediglich die Abbiegewinkel angegeben, woraus die Abbiegerichtung abgeleitet werden kann. Ob einzelne Knotenpunkte signalgesteuert sind oder nicht, müssen so wie im Wiener Stadtgebiet die Verortungen von Lichtsignalanlagen aus verfügbaren Geoinformationssystemen entnommen und eingepflegt werden. Durch die im ersten Schritt festgelegten Streckentypen können die Informationen, ob es sich um ein Abbiegen oder Einbiegen handelt, eingefügt werden.

Alle Informationen je Netzkomponente müssen in einer aussagekräftigen und eindeutig identifizierbaren Codierung vorhanden sein, ein Vorschlag dafür ist im Anhang D angegeben. Im Wiener Stadtgebiet beispielsweise wurden damit ca. 45.000 Strecken und 80.000 Abbieger versorgt, Tabelle 5.5 gibt eine Übersicht über die Anzahl der Strecken je Streckentyp, welche in Abbildung 5.19 grafisch dargestellt sind.

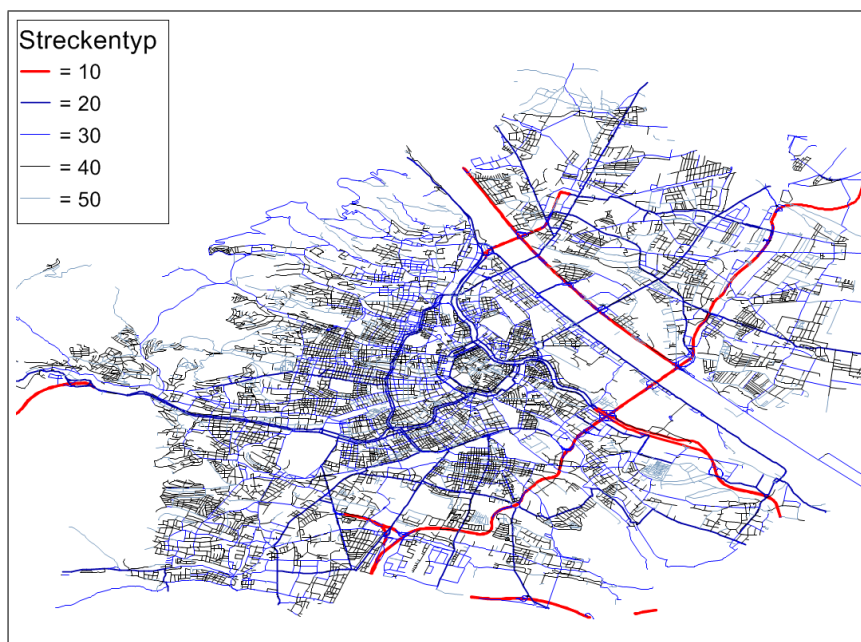


Abbildung 5.19: Darstellung der unterschiedlichen Streckentypen am Wiener Straßennetz.

6

Zusammenfassung und Diskussion

Diese Arbeit belegt die Netzkomponenten eines Straßennetzgraphen mit Energiebedarfswerten, um für Routenberechnungsverfahren neben Reisezeit und Längenangaben als zusätzliche Informationsgrundlage zu dienen. Die gewichteten Netzkomponenten eines Straßengraphen können unterschiedlichen Anwendungen einen Mehrwert in der Informationsbereitstellung liefern, wenn diese als Datenbasis in die Applikationen integriert werden.

Abschließend zu der vorangegangenen Arbeit wird an dieser Stelle versucht einen Überblick über unterschiedliche Anwendungsgebiete zu geben und Aussagen über die Anforderungen der Gewichtung zu treffen (siehe Tabelle 6.1).

Ebenfalls werden dazu Angaben über die Machbarkeit mit diesem Bewertungsalgorithmus gemacht.

In den Grundlagenkapiteln wurde bereits kritisch angemerkt, dass das Streben zur Reku- peration von Energie während der Fahrt einen wesentlichen Einfluss auf den Verkehrsablauf haben wird. Energie zurückzugewinnen, indem dazu die Brems- und Verzögerungsenergie be- nutzt wird, muss ab einer signifikanten Ausstattungsrate von Elektrofahrzeugen der gesamten Fahrzeugbesitzer einer gut überlegten Regelung unterzogen werden. Ohne Regelwerke sind bis- herige Planungsansätze für Knotenpunkte und Signalprogrammerstellung nicht mehr für einen effizienten Verkehrsfluss anwendbar.

Die Ungewissheit, ob mit dem aktuellen Batteriestand ans Ziel gekommen werden kann, muss durch die Berechnung der Route und zeitgleicher Angabe des Energiebedarfs genommen werden. Der zusätzliche Einsatz von verkehrstelematischen Diensten, wie die Anzeige der Verfügbarkeit und Reservierung von Lademöglichkeiten, trägt sicherlich positiv dazu bei.

In allen Fällen wird man sich die Systeme der immer stärker zum Einsatz kommenden C2X- Technologie zu Nutze machen. Informationen von einer zentralen Stelle ins Fahrzeug zu über- mitteln und umgekehrt, wird in Zukunft eine Grundvoraussetzung sein.

Deshalb wird auch diese Bewertungsmethode nur einen Vorteil bringen, wenn die Gewichte der Netzkomponenten kontinuierlich oder auf Anfrage während der Fahrt ins Fahrzeug übertragen werden können.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Tabelle 6.1: Darstellung der möglichen Anwendungsgebiete der Gewichtungsmethodik mit den Anforderungen an die Bewertungsgrößen.

energieeffiziente Routenberechnung	
Strecken:	positiver Energiebedarf (E_{pos})
Abbieger:	positiver Energiebedarf (E_{pos})
<i>Vorteil: allgemeine Gültigkeit für Fahrzeuge</i>	
<hr/>	
Routenberechnung für Elektrofahrzeuge ohne spezifische Fahrzeuginformation	
Strecken:	positiver Energiebedarf; zusätzlich theoretisch mögliche Rekuperationsenergie (negativer Energiebedarf (E_{neg}))
Abbieger:	positiver Energiebedarf (E_{pos})
<i>Vorteil: Gültigkeit für alle Elektrofahrzeuge</i>	
<hr/>	
Fahrerassistenzsysteme; Reichweitenverlängerung (Range Extender)	
Strecken:	positiver Energiebedarf; negativer Energiebedarf aufgeteilt in Verzögerungsenergie und Bremsenergie aufgrund von Streckengefälle
Abbieger:	nicht notwendig
<i>Vorteil: effizienter Einsatz von fahrzeugseitigen Komponenten</i>	

Ob das Fahrzeug diese Gewichte in ihrer übertragenen Form direkt verwendet oder mit fahrzeugspezifischen Informationen erweitert, bleibt dem Anwendungssystem überlassen.

Nicht nur intelligente Fahrerassistenzsysteme und zukunftssträchtige Innovationen, wie Range Extender bei Elektrofahrzeugen, werden solche aktuellen Grunddaten benötigen. Neue Herausforderungen im Logistikbereich, die mit Emissions- und Lärmbeschränkungen im urbanen Bereich zu kämpfen haben, sind zu erwarten. Nachweise von *ökologischen Fußabdrücken*, um die steigenden Kosten für Unternehmen durch Klimazertifikate zu kompensieren, sind mit Aufzeichnungen solcher auf die Energie fokussierten Wege denkbar.

Im Transport- und Versorgungsbereich wird zusätzlich die Verwendung von Elektrotransportern vor allem im städtischen Gebiet gefordert. Nur mit einer adäquaten Energiebedarfsschätzung für die Routen können Ladebeschränkungen und Fahrprofile definiert werden.

Erweiterungsmöglichkeiten der Methodik

Diese entwickelte Bewertungsmethodik stellt das Grundgerüst zur energierelevanten Gewichtung dar. Zusätzliche Informationen über orts-, zeit- oder umgebungsspezifische Einflüsse auf den Energiebedarf können mit diesem System in Form von Zuschlägen oder Anpassung von Schätzfunktionen mit geringem Aufwand integriert werden. So sind spezifische Beschleunigungsverhalten an Knotenpunktsüberfahrten oder Streckenabschnitten zu bestimmten Lastzeiten ein wesentlicher Mehrwert in der Berechnung des Energiewertes.

Zusätzliche Einflüsse von parkenden Fahrzeugen auf Streckenabschnitten oder Fußgänger bzw. bedingt verträgliche Verkehrsströme an Knotenpunkten können in diesem System eingepflegt

werden und somit ein reelles Bild des Sachverhaltes wiedergeben.

Eingangs wurde ebenfalls die Integration von Wetterdaten angeführt, welche im Zuge der Arbeit nicht explizit untersucht wurde. Denkbar sind dabei vor allem die energierelevanten Einflüsse der Zustände der Fahrbahnoberfläche, welche mit Anpassung der Reibungskoeffizienten für die Berechnung der notwendigen Kraftaufbringung zur Überwindung des Rollwiderstandes realisiert werden kann.

Anhang A

Eckdaten zu den Simulationen der Streckentypen

Zur Untersuchung des Fahrverhaltens auf unterschiedlichen Streckentypen wurden verschiedene Simulationsumgebungen aufgebaut, die mit den allgemeinen Eckpunkten aus Tabelle A.1 und den entwickelten Beschleunigungs- und Verzögerungskurven kalibriert wurden. Es wurden die Simulationen mit jeweils fünf Zufallszahlen durchgeführt und unterschiedliche Strecken untersucht. Die Charakteristika und makroskopischen Ergebnisse der untersuchten Strecken sind in den einzelnen Tabellen pro Streckentyp beschrieben. In den folgenden Kapiteln sind diese Informationen pro Streckentyp aufgeführt.

Tabelle A.1: Allgemeingültige Eckpunkte zur Konfiguration für alle durchgeführten Simulationen der Softwareversion 5.40 von VISSIM (PTV AG 2011)

Fahrzeugfolgeverhalten		
Wiedemann 74	Mittl. Stillstandsabstand	2.00 m
	add. Einfluss Sicherheitsabstand	1.25
	multiplik. Einfluss Sicherheitsabstand	2.25
Vorausschauweite	Minimum	0 m
	Maximum	250 m
	Vorderfahrzeuge	4
Zurückschauweite	Minimum	0 m
	Maximum	150 m
Spurwechsel		
Grundverhalten	bei StrTyp 10 und 20	Rechtsfahrgebot
	bei StrTyp 30 und 40	freie Spurwahl

Streckentyp 10 - hochrangige Straße

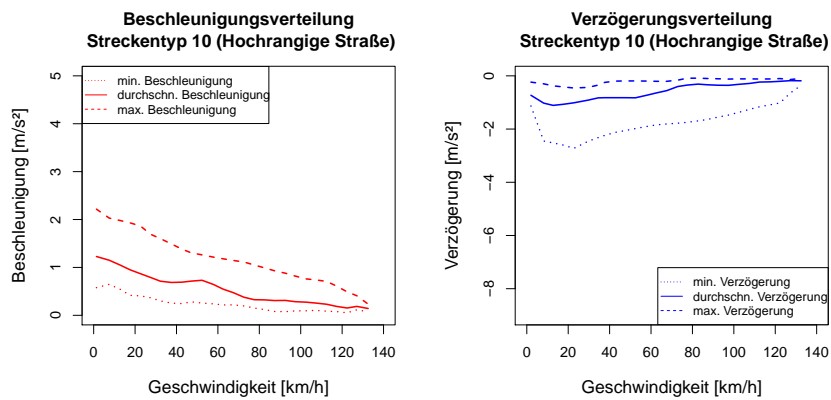


Abbildung A.1: Beschleunigungs- und Verzögerungsverteilungen für VISSIM Simulationen aus HBEFA-Zyklen für Streckentyp 10.

Tabelle A.2: Allgemeine Beschreibung der untersuchten Strecken zu Streckentyp 10.

Bezeichnung	Länge	Fahrstreifen	Geschwindigkeit	Kapazität
Strecke 1	1.98 km	2-streifig	130 km/h	3800 Fz/h
Strecke 2	2.07 km	2-streifig	130 km/h	3800 Fz/h
Strecke 3	0.75 km	3-streifig	80 km/h	3900 Fz/h
Strecke 4	1.52 km	2-streifig	80 km/h	3900 Fz/h

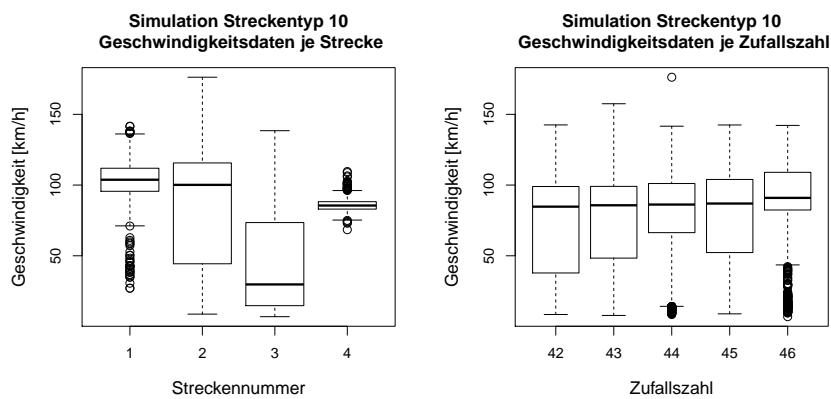


Abbildung A.2: Kenngrößen der Geschwindigkeiten der Simulationsdurchgänge für Streckentyp 10 pro Strecke und pro Zufallszahl über alle Strecken.

Streckentyp 20 - Hauptstraße

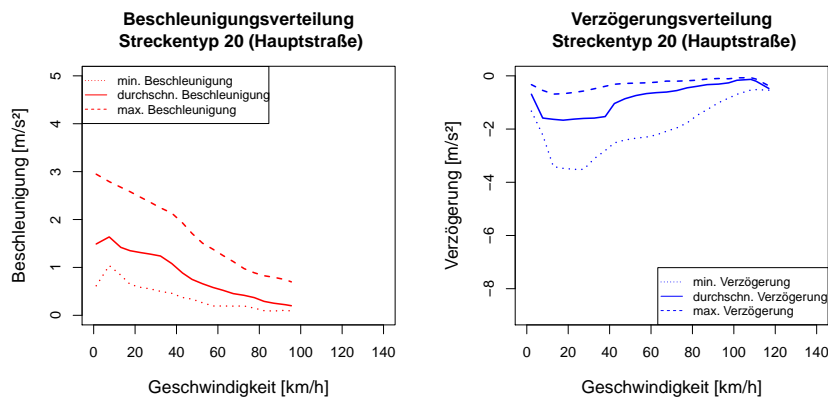


Abbildung A.3: Beschleunigungs- und Verzögerungsverteilungen für VISSIM Simulationen aus HBEFA-Zyklen für Streckentyp 20.

Tabelle A.3: Allgemeine Beschreibung der untersuchten Strecken zu Streckentyp 20 - Hauptstraße.

Bezeichnung	Länge	Fahrstreifen	Geschwindigkeit	Kapazität
Strecke 1	0.38 km	2-streifig	70 km/h	2458 Fz/h
Strecke 2	0.35 km	2-streifig	70 km/h	1977 Fz/h
Strecke 3	0.36 km	2-streifig	50 km/h	2816 Fz/h
Strecke 4	0.43 km	2-streifig	50 km/h	1696 Fz/h

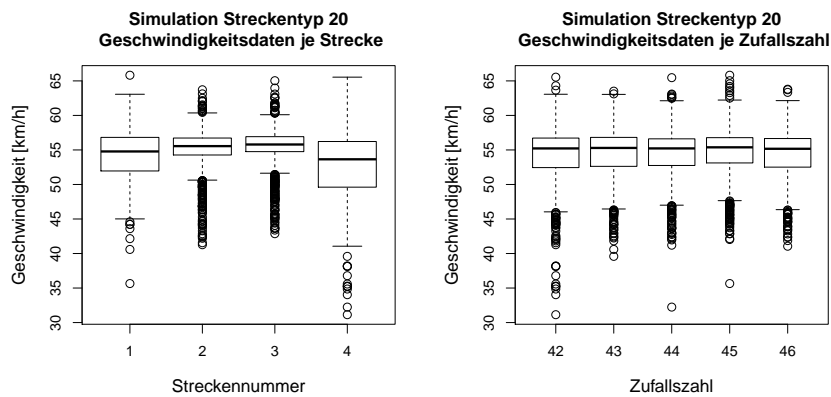


Abbildung A.4: Kenngrößen der Geschwindigkeiten der Simulationsdurchgänge für Streckentyp 20 je Strecke und je Zufallszahl über alle Strecken.

Streckentyp 30 - Verteilerstraße

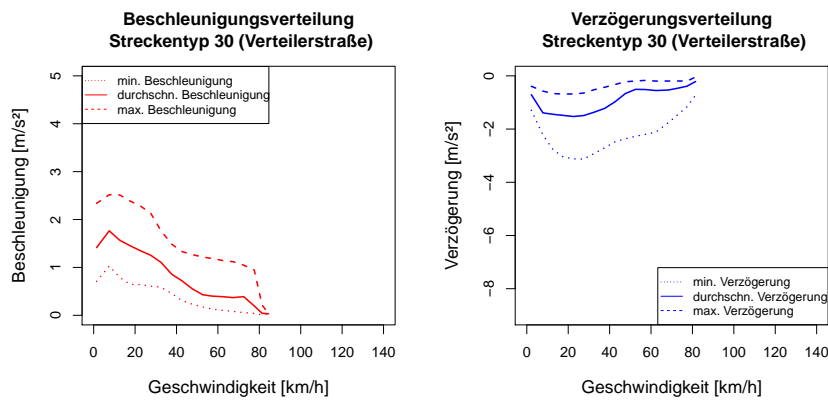


Abbildung A.5: Beschleunigungs- und Verzögerungsverteilungen für VISSIM Simulationen aus HBEFA-Zyklen für Streckentyp 30.

Tabelle A.4: Allgemeine Beschreibung der untersuchten Strecken zu Streckentyp 30 - Verteilerstraße.

Bezeichnung	Länge	Fahrstreifen	Geschwindigkeit	Kapazität
Strecke 1	0.11 km	1-streifig	50 km/h	404 Fz/h
Strecke 2	0.23 km	2-streifig	50 km/h	1280 Fz/h
Strecke 3	0.12 km	1-streifig	50 km/h	298 Fz/h
Strecke 4	0.15 km	3-streifig	50 km/h	1432 Fz/h
Strecke 5	0.11 km	2-streifig	50 km/h	1120 Fz/h

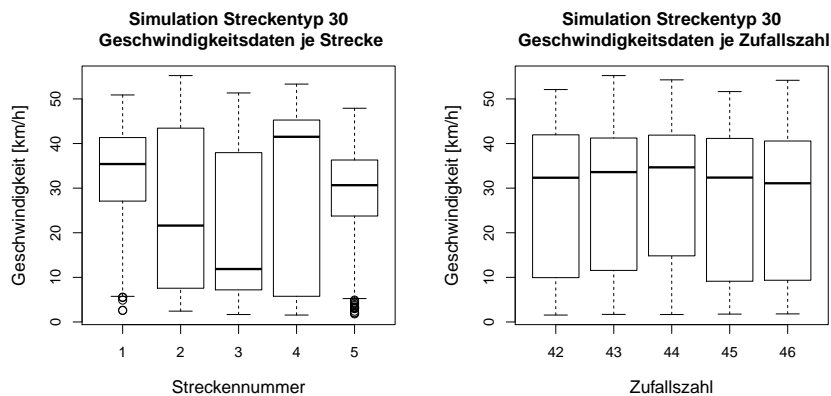


Abbildung A.6: Kenngrößen der Geschwindigkeiten der Simulationdurchgänge für Streckentyp 30 je Strecke und je Zufallszahl über alle Strecken.

Streckentyp 40 - Sammelstraße

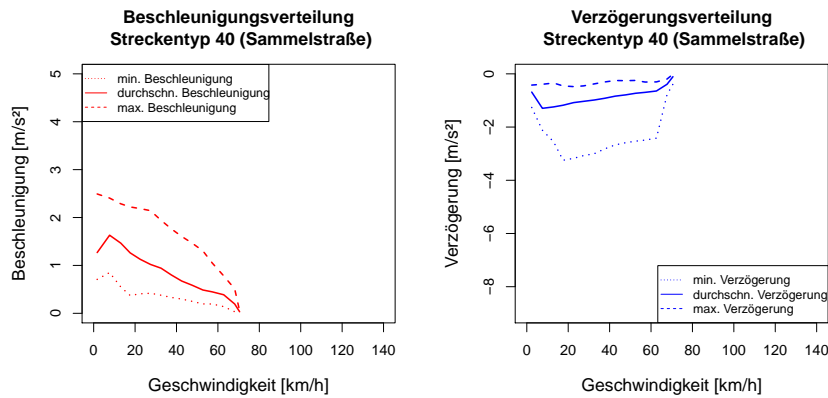


Abbildung A.7: Beschleunigungs- und Verzögerungsverteilungen für VISSIM Simulationen aus HBEFA-Zyklen für Streckentyp 40.

Tabelle A.5: Allgemeine Beschreibung der untersuchten Strecken zu Streckentyp 40 - Sammelstraße.

Bezeichnung	Länge	Fahrstreifen	Geschwindigkeit	Kapazität
Strecke 1	0.12 km	1-streifig	45 km/h	462 Fz/h
Strecke 2	0.16 km	1-streifig	45 km/h	900 Fz/h
Strecke 3	0.12 km	1-streifig	45 km/h	800 Fz/h
Strecke 4	0.15 km	1-streifig	45 km/h	822 Fz/h

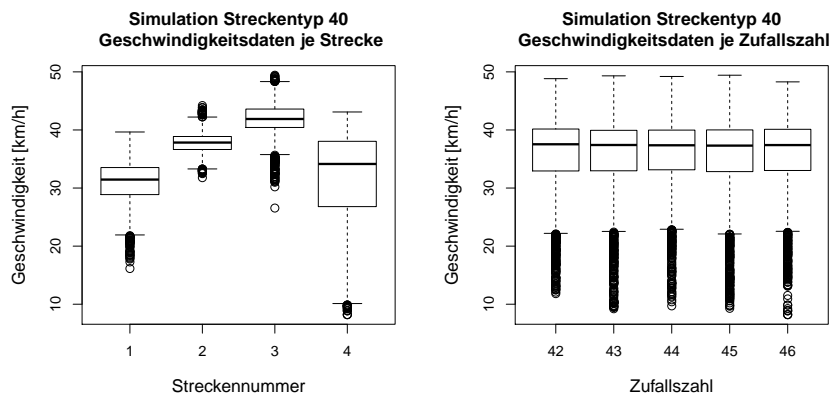


Abbildung A.8: Kenngrößen der Geschwindigkeiten der Simulationen durchgänge für Streckentyp 40 je Strecke und je Zufallszahl über alle Strecken.

Streckentyp 50 - Wohnstraße

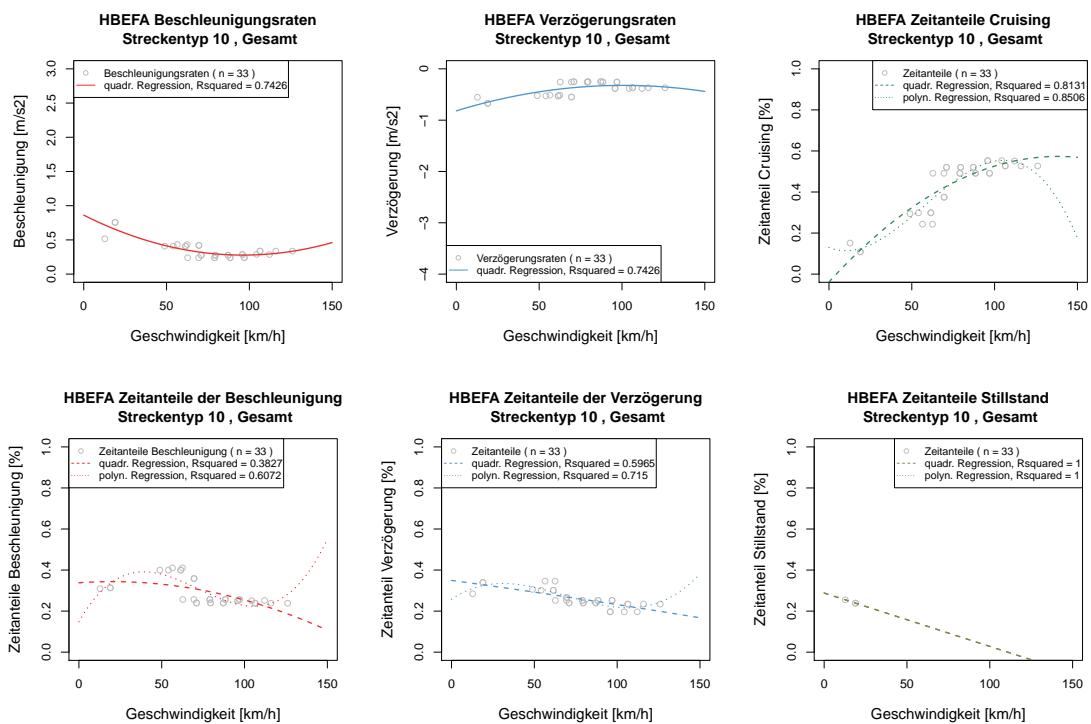
Für diese Arbeit wurden keine Simulationsuntersuchungen auf Wohnstraßen durchgeführt. Es wurden die durchschnittlichen Werte über alle LOS der HBEFA-Daten berechnet.

Anhang B

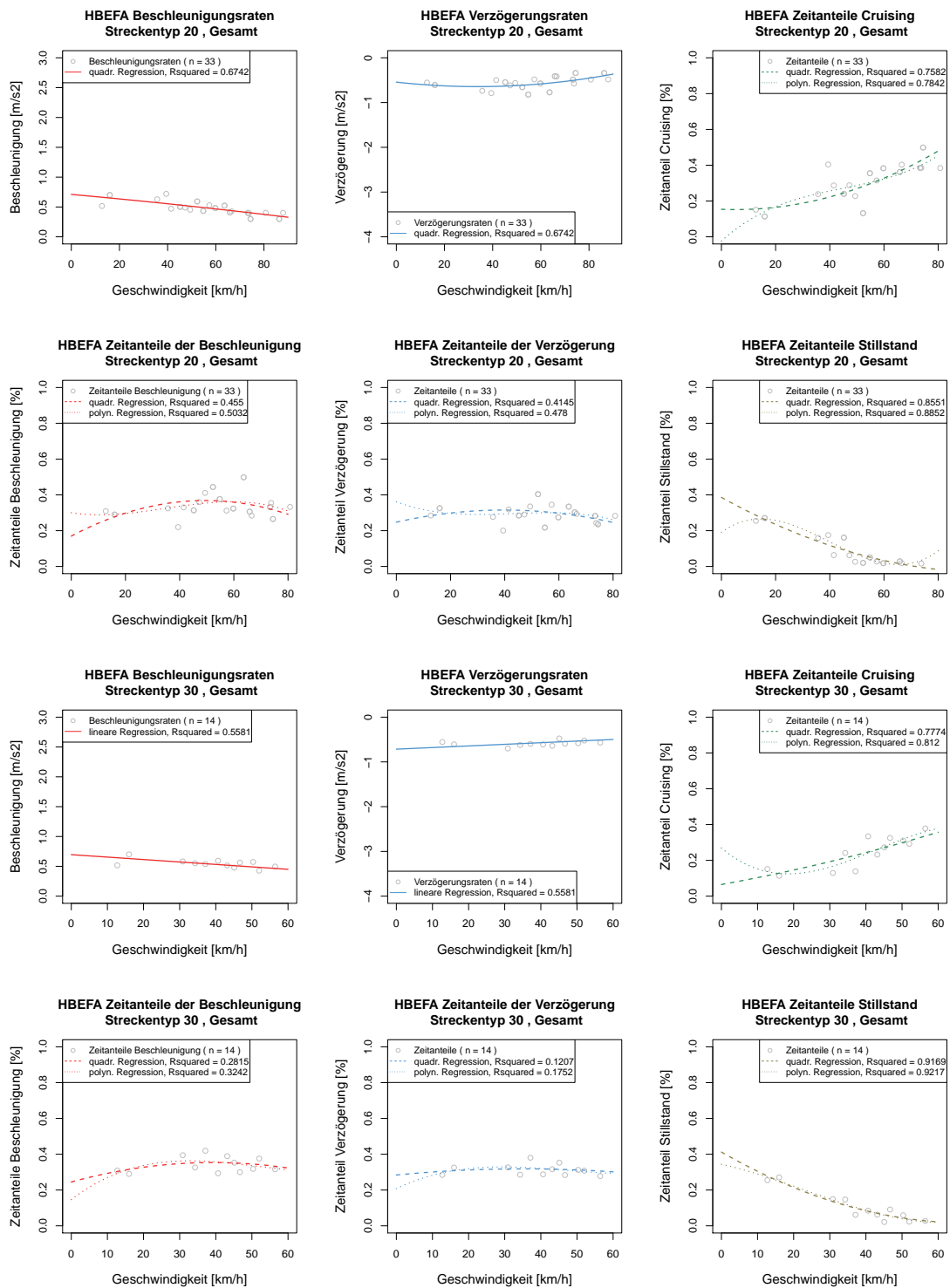
Funktionen von HBEFA-Daten

Für den geringen Auslastungsgrad werden die entwickelten Schätzfunktionen auf Basis der HBEFA-Daten über alle LOS-Bereiche verwendet.

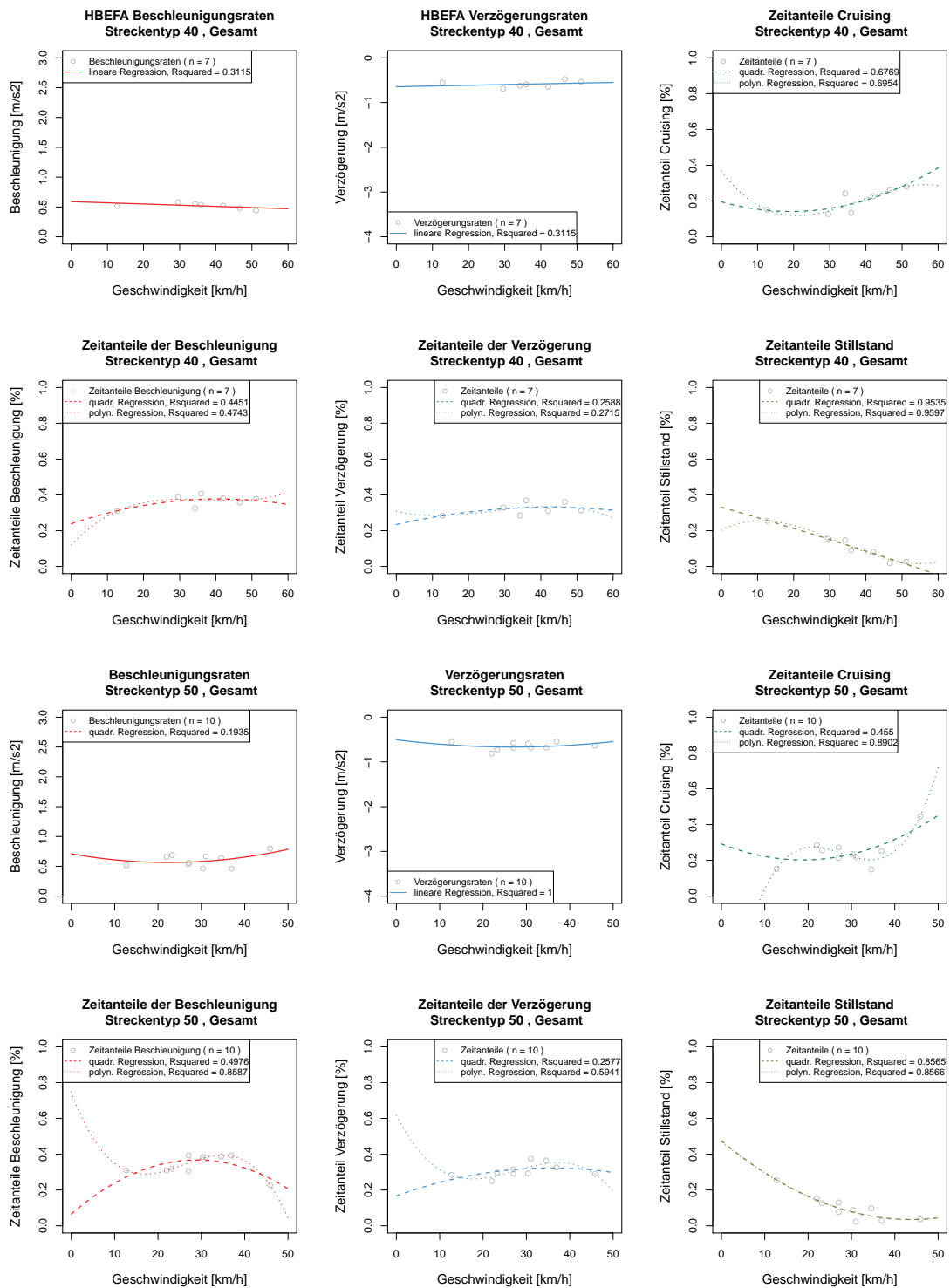
Streckentyp 10 - Funktionen mit HBEFA-Zyklen



Streckentyp 20 & 30 - Funktionen mit HBEFA-Zyklen



Streckentyp 40 & 50 - Funktionen mit HBEFA-Zyklen



B. FUNKTIONEN VON HBEFA-DATEN

Tabelle B.1: Ergebnisse der Regressionsmethoden auf Basis der HBEFA-Daten für Streckentyp 10 für alle LOS (Signifikanzcodes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1).

Regressionsart	Parameter		Pr(> t)	Pr(>F)
<i>Beschleunigungsraten</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	8.623e-01	***	
	x	-1.215e-02	***	***
	(x ²)	6.312e-05	***	***
<i>Verzögerungsraten</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	-8.178e-01	***	
	x	9.836e-03	***	***
	(x ²)	-4.878e-05	*	*
<i>zeitlicher Cruisinganteil</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	0.1958233		
	x	-0.0056522		.
	(x ²)	0.0001470		
polyn. Regression	(Intercept)	3.686e-01		
	x	-2.721e-02		
	(x ²)	8.904e-04		
	(x ³)	-7.662e-06		
<i>zeitlicher Beschleunigungsanteil</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	3.380e-01	***	
	x	5.579e-04		
	(x ²)	-1.397e-05		
polyn. Regression	(Intercept)	1.478e-01	*	
	x	1.419e-02	***	***
	(x ²)	-2.486e-04	***	.
	(x ³)	1.146e-06	***	***
<i>zeitlicher Verzögerungsanteil</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	2.342e-01		.
	x	4.595e-03		
	(x ²)	-5.422e-05		
polyn. Regression	(Intercept)	3.085e-01		
	x	-4.678e-03		
	(x ²)	2.656e-04		
	(x ³)	-3.296e-06		
<i>zeitlicher Stillstandsanteil</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	3.314e-01	**	
	x	-5.742e-03		***
	(x ²)	-9.530e-06		
polyn. Regression	(Intercept)	2.028e-01		
	x	1.029e-02		**
	(x ²)	-5.625e-04		
	(x ³)	5.700e-06		

Tabelle B.2: Ergebnisse der Regressionsmethoden auf Basis der HBEFA-Daten für Streckentyp 20 für alle LOS (Signifikanzcodes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.' 1).

Regressionsart	Parameter		Pr(> t)	Pr(>F)
<i>Beschleunigungsraten</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	7.107e-01	***	
	x	-3.656e-03		***
	(x ²)	-6.629e-06		
<i>Verzögerungsraten</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	-5.432e-01	***	
	x	2.352e-02		***
	(x ²)	8.818e-05	*	*
<i>zeitlicher Cruisinganteil</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	1.537e-01	.	
	x	-6.159e-04		***
	(x ²)	5.857e-05	*	*
polyn. Regression, (R ² =0.9162, R _{adj} ² =0.8744)	(Intercept)	-2.319e-02		
	x	1.353e-02		***
	(x ²)	-2.331e-04		*
	(x ³)	1.730e-06	.	.
<i>zeitlicher Beschleunigungsanteil</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	1.696e-01	**	
	x	8.056e-03	***	*
	(x ²)	-8.162e-05	***	***
polyn. Regression	(Intercept)	3.004e-01	**	
	x	-2.367e-03		*
	(x ²)	1.324e-04		***
	(x ³)	-1.266e-06		
<i>zeitlicher Verzögerungsanteil</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	2.475e-01	***	
	x	3.407e-03	*	**
	(x ²)	-4.289e-05	**	**
polyn. Regression	(Intercept)	3.613e-01	***	
	x	-5.660e-03		**
	(x ²)	1.433e-04		**
	(x ³)	-1.101e-06		.
<i>zeitlicher Stillstandsanteil</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	3.862e-01	***	
	x	-8.388e-03	**	***
	(x ²)	4.186e-05		
polyn. Regression	(Intercept)	1.906e-01	.	
	x	1.112e-02		***
	(x ²)	-4.670e-04	.	.
	(x ³)	3.899e-06	*	*

B. FUNKTIONEN VON HBEFA-DATEN

Tabelle B.3: Ergebnisse der Regressionsmethoden auf Basis der HBEFA-Daten für Streckentyp 30 für alle LOS (Signifikanzcodes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1).

Regressionsart	Parameter		Pr(> t)	Pr(>F)
<i>Beschleunigungsraten</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	0.695462	***	
	x	-0.004093	**	**
<i>Verzögerungsraten</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	-0.715299	***	
	x	0.003616	*	*
<i>zeitlicher Cruisinganteil</i>				
quadr. Regression, ($R^2=0.9849$, $R^2_{adj}=0.9547$)	(Intercept)	6.516e-02		
	x	3.630e-03		***
	(x^2)	2.064e-05		
lineare Regression	(Intercept)	0.0356874		
	x	0.0053231	***	***
<i>zeitlicher Beschleunigungsanteil</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	2.449e-01	**	
	x	5.531e-03	.	
	(x^2)	-7.040e-05	.	
lineare Regression	(Intercept)	0.3453730	***	
	x	-0.0002451		
<i>zeitlicher Verzögerungsanteil</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	2.839e-01	***	
	x	1.951e-03		
	(x^2)	-2.765e-05		
lineare Regression	(Intercept)	0.3234133	***	
	x	-0.0003177		
<i>zeitlicher Stillstandsanteil</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	4.121e-01	***	
	x	-1.158e-02	***	***
	(x^2)	8.465e-05	*	*
polyn. Regression	(Intercept)	3.438e-01	**	
	x	-4.413e-03		***
	(x^2)	-1.191e-04		*
	(x^3)	1.710e-06		

Tabelle B.4: Ergebnisse der Regressionsmethoden auf Basis der HBEFA-Daten für Streckentyp 40 für alle LOS (Signifikanzcodes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1).

Regressionsart	Parameter	Pr(> t)	Pr(>F)
<i>Beschleunigungsraten</i>			
lineare Regression	(Intercept)	-0.646332	***
	x	0.001599	
<i>Verzögerungsraten</i>			
lineare Regression	(Intercept)	-0.646332	***
	x	0.001599	
<i>zeitlicher Cruisinganteil</i>			
quadr. Regression	(Intercept)	0.1958233	
	x	-0.0056522	.
	(x ²)	0.0001470	
polyn. Regression	(Intercept)	3.686e-01	
	x	-2.721e-02	
	(x ²)	8.904e-04	
	(x ³)	-7.662e-06	
<i>zeitlicher Beschleunigungsanteil</i>			
quadr. Regression	(Intercept)	2.386e-01	*
	x	6.799e-03	
	(x ²)	-8.321e-05	
polyn. Regression	(Intercept)	1.200e-01	
	x	2.159e-02	
	(x ²)	-5.934e-04	
	(x ³)	5.259e-06	
<i>zeitlicher Verzögerungsanteil</i>			
quadr. Regression	(Intercept)	2.342e-01	.
	x	4.595e-03	
	(x ²)	-5.422e-05	
polyn. Regression	(Intercept)	3.085e-01	
	x	-4.678e-03	
	(x ²)	2.656e-04	
	(x ³)	-3.296e-06	
<i>zeitlicher Stillstandsanteil</i>			
quadr. Regression	(Intercept)	3.314e-01	**
	x	-5.742e-03	***
	(x ²)	-9.530e-06	
lineare Regression	(Intercept)	0.3395757	***
	x	-0.0063490	***
	(x ²)	1.976e-04	***

B. FUNKTIONEN VON HBEFA-DATEN

Tabelle B.5: Ergebnisse der Regressionsmethoden auf Basis der HBEFA-Daten für Streckentyp 50 für alle LOS (Signifikanzcodes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1).

Regressionsart	Parameter		Pr(> t)	Pr(>F)
<i>Beschleunigungsraten</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	0.7101462	*	
	x	-0.0130123		
	(x ²)	0.0002900		
<i>Verzögerungsraten</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	-0.5059300	.	
	x	-0.0120537		
	(x ²)	0.0002248		
<i>zeitlicher Cruisinganteil</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	0.2920227		
	x	-0.0095650		.
	(x ²)	0.0002549		
polyn. Regression	(Intercept)	-8.329e-01	*	
	x	1.315e-01	**	**
	(x ²)	-5.016e-03	**	.
	(x ³)	6.011e-05	**	**
<i>zeitlicher Beschleunigungsanteil</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	0.0656673		
	x	0.0209302	*	
	(x ²)	-0.0003622	*	*
polyn. Regression	(Intercept)	7.477e-01	**	
	x	-6.461e-02	*	
	(x ²)	2.833e-03	*	**
	(x ³)	-3.645e-05	**	**
<i>zeitlicher Verzögerungsanteil</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	0.1671897		
	x	0.0087449		
	(x ²)	-0.0001225		
polyn. Regression	(Intercept)	6.169e-01	*	
	x	-4.766e-02		
	(x ²)	1.985e-03	.	
	(x ³)	-2.403e-05	.	.
<i>zeitlicher Stillstandsanteil</i>				
quadr. Regression	(Intercept)	4.751e-01	***	
	x	-2.011e-02	**	***
	(x ²)	2.299e-04	*	*
polyn. Regression	(Intercept)	4.682e-01	.	
	x	-1.925e-02		**
	(x ²)	1.976e-04		.
	(x ³)	3.677e-07		

Anhang C

Auswertung der Abbiegebeziehungen

Auswertungen basieren auf GPS-Aufzeichnungen mit 1Hz Aufzeichnungsrate, durchgeführt im Grazer Stadtgebiet im Oktober 2012. Kapazitäten wurden mit den höchsten vorkommenden Belastungen des gesamten Querschnittes der von-Strecke belegt.

LA... Linksabbiegen, LE... Linkseinbiegen, RA... Rechtsabbiegen, RE... Rechtseinbiegen, GA/GE... Geradeausfahrt

Tabelle C.1: Auflistung der Trajektorienanzahl, Distanzen und Reisezeiten je Abbiegerelation nach Elimination von fehlerhaften Fahrten inkl. äußerer Störungen, wie Fußgänger und parkende Fahrzeuge.

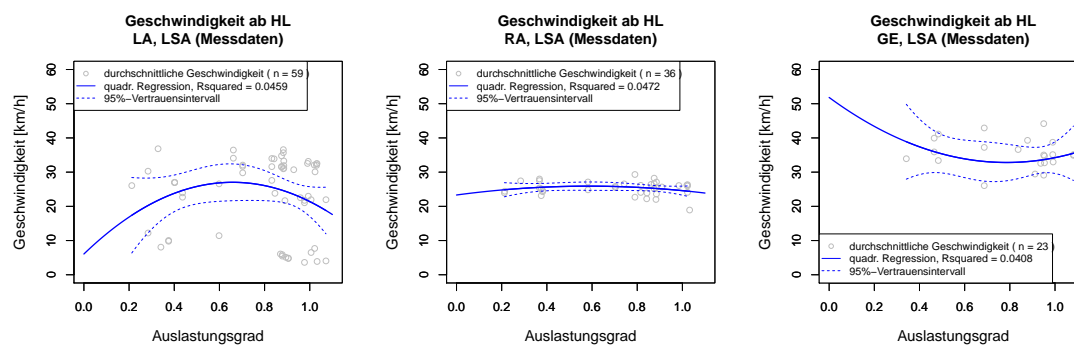
Relation	Anz.	mittlere Distanz [m]	gesamte Distanz [m]	mittlere Reisezeit [s]	Dauer der Aufzeichnung [s]
K001_LA	20	184.62	3692.35	32.25	645
K001_LE	19	166.112	3156.19	59.32	1127
K001_RA	20	152.83	3056.55	20.65	413
K001_RE	22	185.22	4074.84	34.36	756
K002_LE	17	274.57	4667.69	50.88	865
K002_RE	26	227.42	5912.86	36.85	958
K003_GA	9	155.74	1401.62	23.33	210
K003_GE	11	89.85	988.34	17.00	187
K003_LA	19	111.85	2125.14	18.16	345
K003_RA	17	126.70	2153.86	21.06	358
K504_LA	21	340.14	7142.93	78.43	1647
K505_LA	22	403.74	8882.22	82.91	1824
K505_RA	27	209.28	5650.61	24.81	670
K506_GE	24	225.32	5407.59	33.72	809
K506_LA	25	339.38	8484.56	85.32	2133
K506_RA	22	292.08	6425.66	69.82	1536
K513_RE	37	187.85	6950.62	50.62	1873

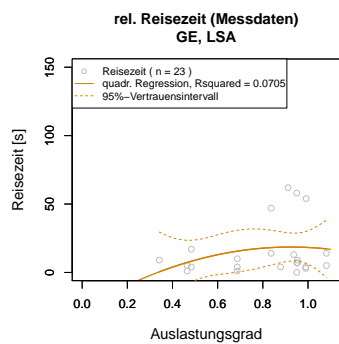
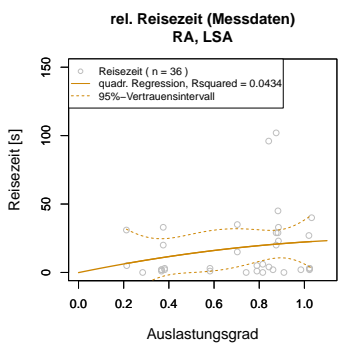
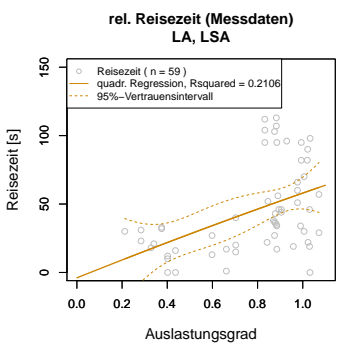
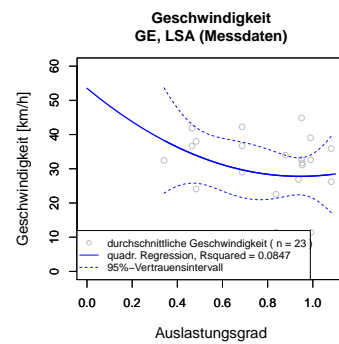
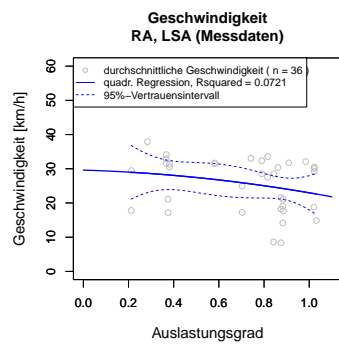
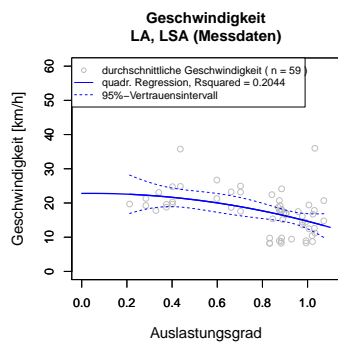
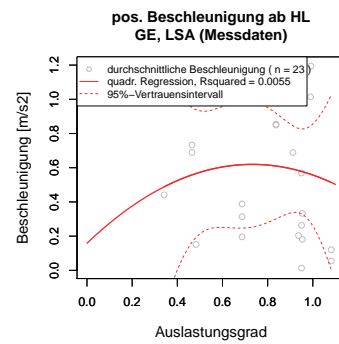
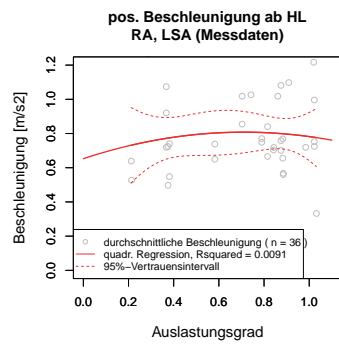
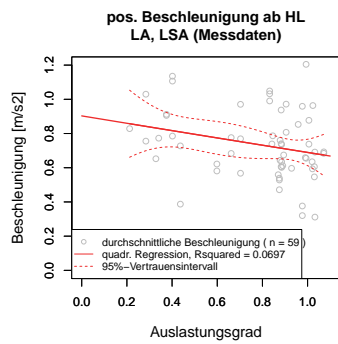
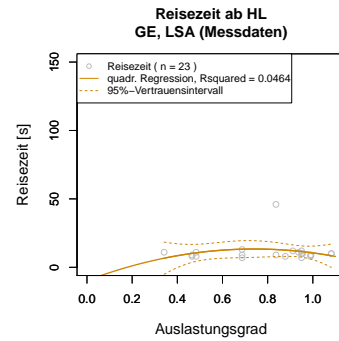
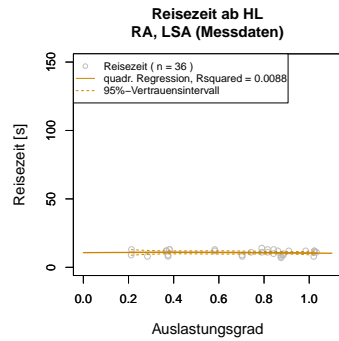
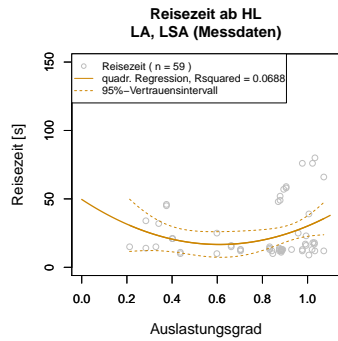
C. AUSWERTUNG DER ABIEGEBEZIEHUNGEN

Tabelle C.2: Auflistung der Trajektorienanzahl je Abbiegerelation vor und nach der Elimination von äußeren Störungen, wie Fußgänger und parkende Fahrzeuge.

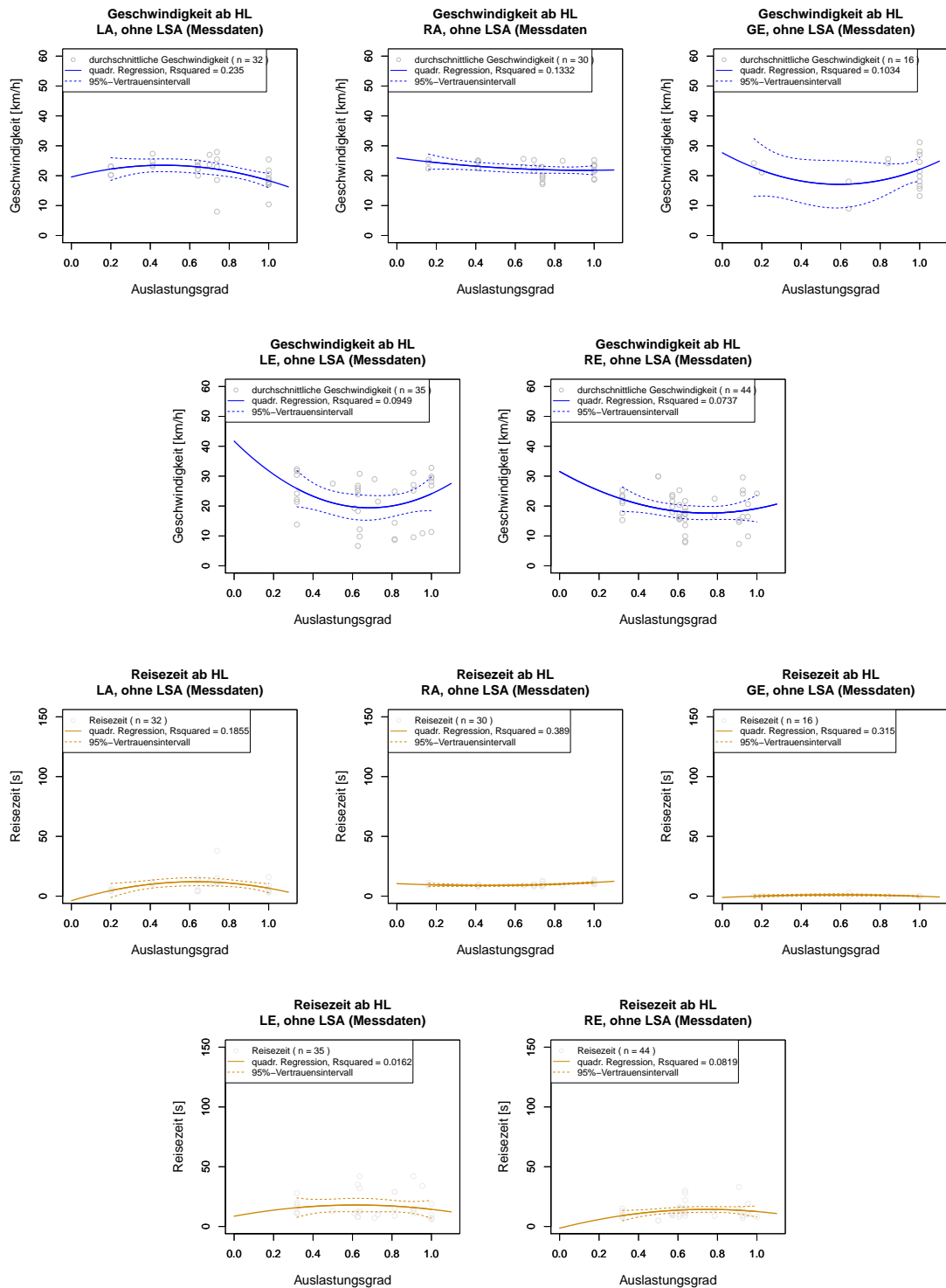
Relation	Anzahl inkl. Störungen	Anzahl exkl. Störungen	Hauptursache
K001_LA	20	14	ruhender Verkehr
K001_LE	19	18	Fußgänger
K001_RA	20	17	einparkende Fahrzeuge
K001_RE	22	19	Fußgänger
K002_LE	17	17	
K002_RE	26	25	einparkendes Fahrzeug
K003_GA	9	8	Fußgänger
K003_GE	11	8	ruhender Verkehr
K003_LA	19	18	einparkendes Fahrzeug
K003_RA	17	13	Fußgänger, ruhender Verkehr
K504_LA	21	14	Fußgänger
K505_LA	22	21	Fußgänger
K505_RA	27	20	Fußgänger, ruhender Verkehr
K506_GE	24	23	ruhender Verkehr
K506_LA	25	24	Fußgänger
K506_RA	22	16	Fußgänger
K513_RE	37	16	Fußgänger

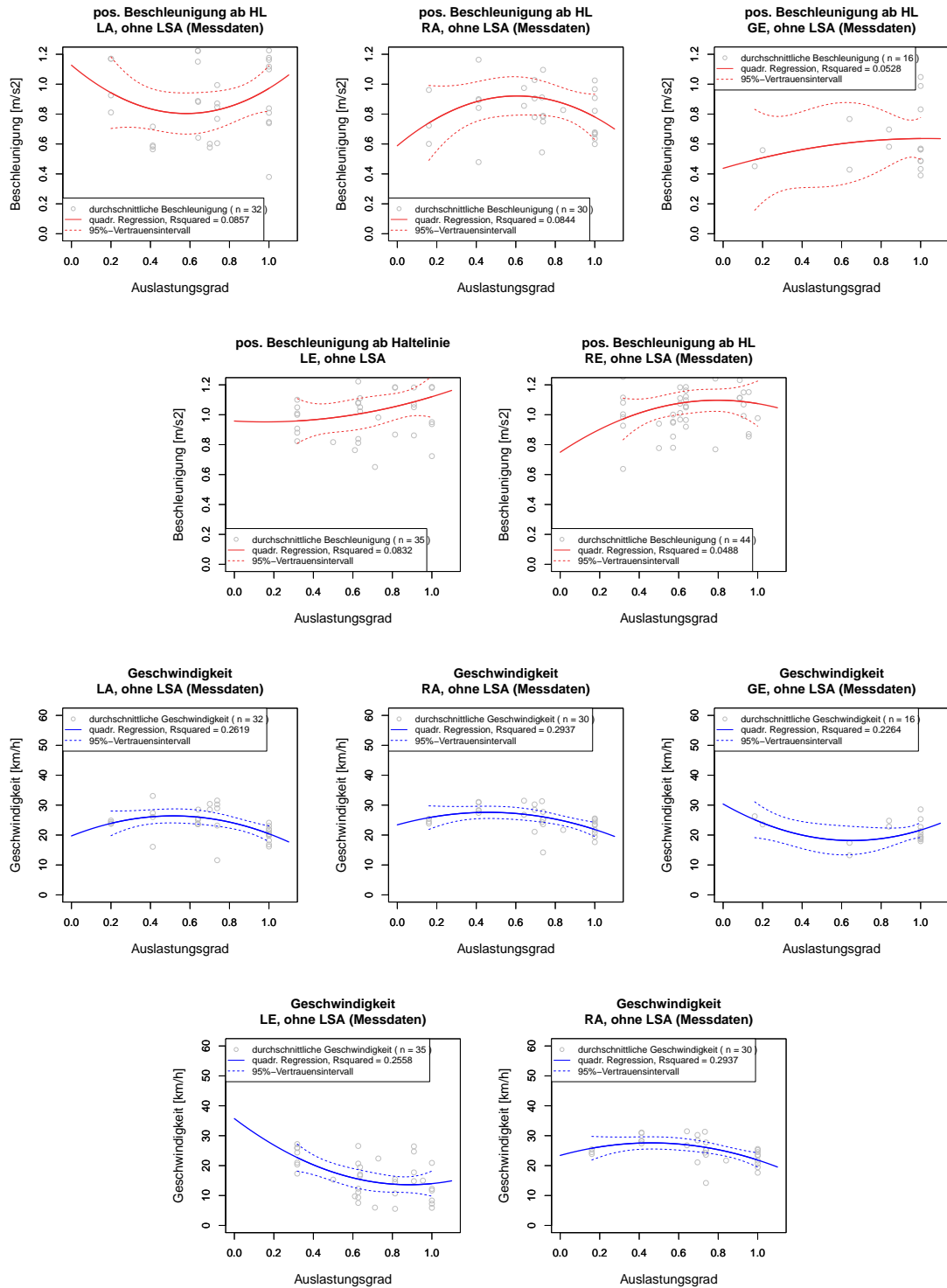
Abbiegemanöver mit LSA



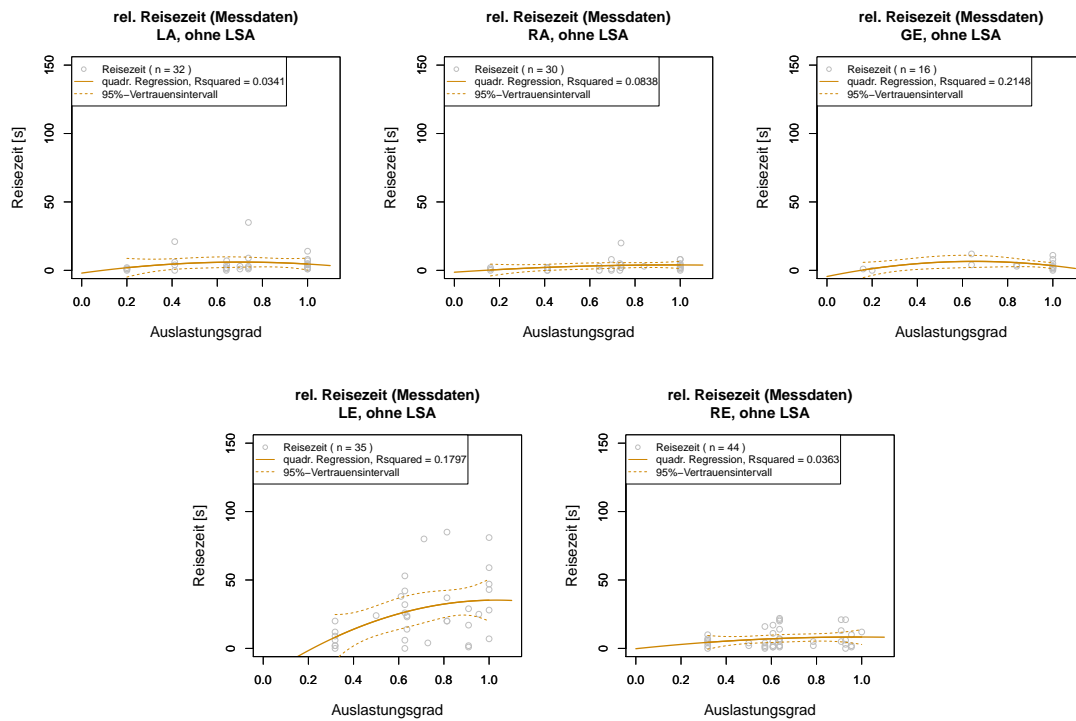


Abbiege-/Einbiegemanöver ohne LSA





C. AUSWERTUNG DER ABIEGEBEZIEHUNGEN



Anhang D

Codierungskatalog zur Bewertung eines Netzgraphen

Fahrmodi Codierung - 8stellig, Beschleunigungsraten Codierung - 6stellig

1...2 Kennzeichnung des Streckentyps (10, 20, 30, 40, 50)

3...4 Angabe zur Auslastungsgrad-Klasse (01, 02, 03, 04, 05, 06)

5...6 Angabe zur Streckensteigung (30, 62, 64, 66, 54, 56, 58)

7...8 Fahrmodikennzeichnung (01, 02, 03, 04)

1...2 Codierung des städtischen Streckentyps

ID	Bezeichnung
10	Hochrangige Straße
20	Hauptstraße
30	Verteilerstraße
40	Sammelstraße
50	Wohnstraße

3...4 Codierung des Auslastungsgrades

ID	Wertebereich	LOS
01	(0,0.35]	LOS A
02	(0.35,0.55]	LOS B
03	(0.55,0.77]	LOS C
04	(0.77,0.92]	LOS D
05	(0.92,1.00]	LOS E
06	Überlastung	LOS F

5...6 Codierung der Streckensteigung

ID	minWert	maxWert	Steigungsklasse
30	> -0.5%	0.5%	0%
62	> 0.5%	2%	2%
64	> 2%	4%	4%
66	> 4%	6%	6%
54	> -6%	-4%	-6%
56	> -4%	-2%	-4%
58	> -2%	-0.5%	-2%

7...8 Codierung der Fahrmodi-Zeitanteile

ID	Bezeichnung
01	pCruise (Cruisingmodus)
02	pIdle (Stillstand)
03	pAcc (Beschleunigungsmodus)
04	pDec (Verzögerungsmodus)
05	pCreep (<i>Kriech</i> modus)

Abbiegefunktionen Codierung - 4stellig

1...1 Kennzeichnung des Steuerungstyps (1, 2, 5)

2...2 Kennzeichnung der Fahrtrichtung (1, 2, 3)

3...4 Angabe Rangordnung zum Abbiegevorgang (11, 01, 10, 00)

1...1 Codierung des Steuerungstyps

ID	Bezeichnung
1	LSA
2	Vorfahrtsgeregelt
5	Autobahn

2...2 Codierung der Fahrtrichtung

ID	Bezeichnung
1	geradeaus
2	rechts
5	links

3...4 Rangangabe der Relation

ID	Bezeichnung
11	Abbiegen, gleicher Streckentyp
01	Einbiegen
10	Abbiegen, hoher auf niedrigen Streckentyp
00	Abbiegen, gleicher Streckentyp (niedrig)

Typ- und Funktionsdefinitionen

Fahrzeugtyp

Bezeichnung	Datentyp
vehicletype	Ganzzahl
name	String
vehicleclass	Ganzzahl
mass	Ganzzahl
r0	Gleitkomma
r1	Gleitkomma
r4	Gleitkomma
cw	Gleitkomma
area	Gleitkomma
ρ	Gleitkomma
mInertia	Gleitkomma

Fahrmodianteile und Raten

Bezeichnung	Datentyp
functtype	Ganzzahl
name	String
a,b,c,d	Gleitkomma

Abbieger

Bezeichnung	Datentyp
turnfuncttype	Ganzzahl
name	String
v_{turn} a,b,c	Gleitkomma
t_{turn} a,b,c	Gleitkomma
acc_{turn} a,b,c	Gleitkomma
v a,b,c	Gleitkomma
t a,b,c	Gleitkomma

Literaturverzeichnis

- Ahn, K. & Rakha, H. (2008), 'The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions', *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **13**(3), 151–167. 9
- Akcelik, R. (1981), 'Traffic signals: Capacity and timing analysis', *Australian Road Research Board* . 27
- Altman, D. G. & Bland, J. M. (1983), 'Measurement in Medicine: The Analysis of Method Comparison Studies', *Journal of the Royal Statistical Society. Series D (The Statistician)* **32**(3), 307–317.
URL: <http://dx.doi.org/10.2307/2987937> 75
- ÖAMTC (2012), 'Nebenverbraucher im Fahrzeug'. Abbrufbar auf <http://www.oeamtc.at>, letzter Abruf am 10. Juni 2012. 35
- Barth, M., An, F., Norbeck, J. & Ross, M. (1996), 'Modal emissions modeling: A physical approach', *Transportation Research Record* **1520**, 81–88. 40
- Barth, M., An, F., Younglove, T., Levine, C., Scora, G., Ross, M. & Wenzel, T. (1999), The development of a comprehensive modal emissions model, Technical report, TRB's National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Web-Only Document 122. 17, 31
- Barth, M., Boriboonsomsin, K. & Vu, A. (2007), Environmentally-Friendly navigation, in 'Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference'. 10
- Bester, C. (1981), Fuel consumption of highway traffic, PhD thesis, University of Pretoria, South Africa. 22
- Bland, J. M. & Altman, D. G. (2003), 'Applying the right statistics: analyses of measurement studies'.
URL: <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/104531391/PDFSTART> 74
- Boriboonsomsin, K. & Barth, M. (2009), 'Impacts of road grade on fuel consumption and carbon dioxide emissions evidenced by use of advanced navigation systems', *Transportation Research Record* **2139**, 21–30. 10
- Boriboonsomsin, K., Barth, M., Weihua, Z. & Vu, A. (2010), ECO-Routing navigation system based on multi-source historical and real-time traffic information, in 'Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference'. 10

- Bratt, H. & Ericsson, E. (2000), Measuring vehicle, driving patterns - estimating the influence of different measuring intervals. 57
- Brundell-Freij, K. & Ericsson, E. (2005), 'Influence of street characteristics, driver category and car performance on urban driving patterns', *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **10**, 213–229. 19
- Bureau of Public Roads (1964), *Traffic Assignment Manual*, englisch edn, U.S. Dept. of Commerce, Urban Planning Division, Washington D.C. 12, 26, 69
- Caldwell, T. (1961), 'On finding minimum routes in a network with turn penalties', *Communications of the ACM* **4**, 107–108. 14
- De Vlieger, I., De Keukeleere, D. & Kretzschmar, J. (2000), 'Environmental effects of driving behaviour and congestion related to passenger cars', *Atmospheric Environment* **34**, 4649–4655. 7, 19
- Dijkstra, E. (1959), *A note on two problems in connexion with graphs*, *Numerische Mathematik* **1**, Springer. 6, 12
- EC (2002), 'RoTraNoMo = Road traffic noise model', European Commission, DG Research. Abbrufbar auf <http://www.rotranomo.com>; letzter Abruf am 14. Juni 2012. 49
- EC, ed. (2011), *Weissbuch, Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum - Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem*, European Commission. 29
- Ericsson, E. (2000), 'Variability in urban driving patterns', *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **5**, 337–645. 20, 22
- Ericsson, E., Larsson, H. & Brundell-Freij, K. (2006), 'Optimizing route choice for lowest fuel consumption - Potential effects of a new driver support tool', *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **14**, 369–383. 9
- Evans, L. (1979), 'Driver behavior effects on fuel consumption in urban driving', *Human Factors* **21(4)**, 389–398. 7
- Fahrmeir, L., Kneib, T. & Land, S. (2009), *Regression - Modelle, Methoden und Anwendungen*, Vol. 2. Auflage, Springer Verlag. 56
- Fan, J. & Gijbels, I. (1996), 'Local polynomial modelling and its applications'. Chapman and Hall. 57
- Fellendorf, M. & Vortisch, P. (2001), 'Validation of the microscopic traffic flow model vissim in different Real-World situations'. 46
- FGSV (2001), *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*, FGSV-Verlag. 27, 38, 39

- Frey, H. C., Zhang, K. & Rouphail, N. M. (2008), ‘Fuel use and emissions comparisons for alternative routes, time of day, road grade, and vehicles based on in-use measurements’, *Environmental Science & Technology* **42**(7), 2483–2489. 9, 10
- FSV (2001), *Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen, RVS 03.04.12 - Stadtstraßen*, Arbeitsgruppe Stadtverkehr, Arbeitsausschuss Querschnittsgestaltung. 38
- FSV (2012), *Intermodaler Verkehrsgraph Österreich - Standardbeschreibung GIP (Graphenintegrationsplattform)*, RVS 05.01.14, Arbeitsgruppe Grundlagen des Verkehrswesens, Arbeitsausschuss Verkehrstelematik. 95
- Geisberger, R. & Vetter, C. (2011), Efficient routing in road networks with turn costs, in ‘Proceedings of the 10th international conference on Experimental algorithms’, SEA’11, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 100–111. 27
- Greenwood, I., Dunn, R. & R.R., R. (2007), ‘Estimating the effects of traffic congestion on fuel consumption and vehicle emissions based on acceleration noise’, *ASCE - Journal of Transportation Engineering* **12**, 96–104. 22
- Hausberger, S. (2003), ‘Simulation of real world vehicle exhaust emissions’, *VKM-THD Mitteilungen Technical University Graz* **82**. 17, 31, 36, 40
- Heißing, B. & Ersoy, M. (2008), *Fahrwerkhandbuch, Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*, Vol. 2. Auflage, HVieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden. 14
- Hirschmann, K. & Zallinger, M. (2009), ‘GAVe - Neue Steuerungen - Weniger Schadstoffe’, *Schriftenreihe des Instituts für Straßen- und Verkehrswesen, Technische Universität Graz* . 49
- Hirschmann, K., Zallinger, M., Fellendorf, M. & Hausberger, S. (2010), ‘A new method to calculate emissions with simulated traffic conditions’, *Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems conference* . 17, 46
- Hirschmann, K., Zallinger, M., Fellendorf, M., Hausberger, S. & Mück, J. (2009), Endbericht GAVe (Grazer adaptive Verkehrssteuerung), I2-Intelligente Infrastruktur, Projekt 812719, Technical report, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. 47, 49, 50
- Hooker, J. (1988), ‘Optimal driving for single-vehicle fuel economy’, *Transport Research Part A* **22**(3), 183–201. 8
- Hung, W.-T., Tam, K.-M., Lee, C.-P., Chan, L.-Y. & Cheung, C.-S. (2005), ‘Comparison of driving characteristics in cities of Pearl River Delta, China’, *Atmospheric Environment* **39**(4), 615–625. 22
- INFRAS (2010), ‘Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs - HBEFA’. 34, 38, 42, 45
- Kent, J., Allen, G. & Rule, G. (1978), ‘A driving cycle for Sydney’, *Transportation Research* **12**, 147–152. 22

- Kenworthy, J., Newman, P. & Lyons, T. (1983), A driving cycle for Perth, Technical report, Environmental Sciences Report to NERDDC, Murdoch University. 21
- Kenworthy, J. R. (1986), Driving Cycles, Urban Form and Transport Energy, PhD thesis, Murdoch University. 21, 23
- Kirby, R. & Potts, R. (1969), ‘The minimum route problem for networks with turn penalties and prohibitions’, *Transportation Research Record* **3**, 397–408. 14
- Klunder, G., Malone, K., Mak, J., Wilmink, I., Schirokoff, A., Sihvola, N., Holmén, C., Berger, A., de Lange, R., Roeterdink, W. & Kosmatopoulos, E. (2009), Impact of information and communication technologies on energy efficiency in road transport, Technical report, TNO report for the European Commission. 8
- Kraschl-Hirschmann, K., Zallinger, M., Luz, R., Fellendorf, M. & Hausberger, S. (2011), A method for emission estimation for microscopic traffic flow, *in* ‘Proceedings of the 2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems’, pp. 300–305. 47
- Kruse, R. & Huls, T. (1973), ‘Development for the federal urban driving cycle’, *SAE Technical Paper* . 22
- Kuhler, M. & Karstens, D. (1978), ‘Improved driving cycle for testing automotive exhaust emission’, *SAE Technical Paper* . 22
- Larsson, H. & Ericsson, E. (2009), ‘The effects of an acceleration advisory tool in vehicles for reduced fuel consumption and emissions’, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **14**, 141–146. 8
- Lyons, T., Kenworthy, J. & Newman, P. (1989), ‘Urban structure and air pollution’, *Atmospheric Environment* **24B**, 43–48. 21
- Maier, F. (2010), Abschnittsweise Regressionsanalyse zur Schätzung von Verkehrskenngrößen, PhD thesis, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität, Deutschland. 56
- Matzoros, A. & Van Vliet, D. (1991), ‘A model of air pollution from road traffic, based on the characteristics of interrupted flow and junction control: Part I - model description’, *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **26**, 315–330. 25, 27, 28
- Milkins, E. & Watson, H. (1983), ‘Comparison of urban driving patterns’, *SAE International* **24B**, 735–745. 21, 22, 57
- Mitschke, M. & Wallentowitz, H. (2005), *Dynamik von Kraftfahrzeugen*, Vol. 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg. 15
- Nesamani, K. S., Chu, L., McNally, M. G. & Jayakrishnan, R. (2006), Estimation of vehicular emissions by capturing traffic variations, *in* ‘Proceedings of the 85th Annual Meeting of Transportation Research Board (CD-ROM)’. 10

- Park, S. & Rakha, H. (1987), Energy and environmental impacts of roadway grades, *in* 'Proceedings of the 85th Annual Meeting of Transportation Research Board (CD-ROM)', pp. 148–160. 19
- Pediaditis, E. (2010), Beeinflussungsmöglichkeiten verkehrsbedingter Schadstoffemissionen im städtischen Straßenverkehr, Diplomarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Straßen- und Verkehrswesen. 9
- Pilz, K. F. (2005), Nicht parametrische Kurvenschätzung unter Monotoniebedingungen, PhD thesis, Fakultät für Mathematik der Ruhr-Universität Bochum, Deutschland. 55
- PTV AG (2011), *VISSIM 5.40-01 - Benutzerhandbuch*, deutsch edn. 47, 48, 103
- Schaechterle, Karlheinz und Braun, J., ed. (1977), *Vergleichende Untersuchung vorhandener Verfahren für Verkehrsumlegungen unter Verwendung elektronischer Rechenanlagen*, Vol. 222, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. 13
- Servin, O., Boriboonsomsin, K. & Barth, M. (2006), An energy and emissions impact evaluation of intelligent speed adaptation, *in* 'Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference'. 8
- TRB (2000), *Highway Capacity Manual*, Transportation Research Board National Research Council. 34
- Umweltbundesamt (2012), Klimaschutzbericht 2012, Technical report, Im Auftrag des Umweltbundesamtes. 3
- Van der Voort, M. (2001), Design and evaluation of a new fuel-efficiency support tool, PhD thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands. 8
- Van der Voort, M., Dougherty, M. S. & Van Maarseveen, M. (2001), 'A prototype fuel-efficiency support tool', *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **9**, 279–296. 7, 8
- Volker, L. (2008), 'Route planning in road networks with turn costs'. Abbrufbar auf http://algo2.iti.kit.edu/documents/routepanning/volker_sa.pdf; letzter Abruf am 10. März 2012. 27
- VOR (2012), ITS Vienna Region Verkehrsverbund Ost-Region (VOR) GmbH. Abbrufbar auf <http://www.anachb.at>; letzter Abruf am 16. August 2012. 95
- Wallentowitz, H. (1998), 'Längsdynamik von Kraftfahrzeugen', *Schriftenreihe Automobiltechnik* . 15
- Wand, M. & Jones, C. (1995), 'Kernel smoothing'. Chapman and Hall. 55, 57, 58
- Waters, M. & Laker, I. (1980), Research on fuel conservation for cars, Technical report, Transport Research Laboratory Report. 7

LITERATURVERZEICHNIS

- Watson, H. (1978), *Vehicle Driving Patterns and Measurement Methods for Energy and Emission Assessment*, Vol. 30, Australian Government Publishing Service. 21, 22
- Wiedemann, R. (1974), 'Simulation des Verkehrsflusses', *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Universität (TH) Karlsruhe (seit 2009 KIT - Karlsruher Institut für Technologie)* 8. 47, 49
- Zimmermann, H. (2008), *Operations Research Methoden und Modelle*, Vieweg. 13