



Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Bewertungsmethodik der Verkehrssteuerung innerstädtischer Hauptverkehrsstraßen

**Ein auf GPS-Trajektorien basierendes Qualitätsbeurteilungsverfahren
mit emissionstechnischem Hintergrund**

MASTERARBEIT

vorgelegt von
Ulrich, Radl BSc.

bei
Univ. Prof. Dr. Ing. Martin Fellendorf
Technische Universität Graz
Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Mitbetreuender Assistent: Dipl.-Ing. Michael Haberl

Graz, am 29. September 2012

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senats am 01.12.2008

Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, _____

Ulrich Radl, BSc

Statutory Declaration

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

Graz, _____

Ulrich Radl, BSc

Aufgabenstellung für die Masterarbeit

von Ulrich Radl, BSc

Graz, am 06.03.2011

Bewertungsmethodik der Verkehrssteuerung innerstädtischer Hauptverkehrsstraßen

Ein auf GPS-Trajektorien basierendes Qualitätsbeurteilungsverfahren mit emissionstechnischem Hintergrund

Problemstellung

Im derzeitigen Stand der Technik gibt es kein Bewertungsverfahren von signalisierten Hauptverkehrsstraßen, das anhand mehrerer Kenngrößen die Qualität eines innerstädtischen Streckenzuges abbilden kann. Darüber hinaus ist für eine detaillierte Qualitätsanalyse von Streckenzügen, ein erheblicher Erfassungsaufwand des Verkehrsgeschehens notwendig.

Mit modernen Datenerhebungsmethoden wie GPS-Messfahrten oder Floating Car Data (FCD) kann der Verkehrsablauf mit hohem Informationsgehalt relativ einfach aufgezeichnet werden. Damit können beispielsweise reale Fahrtverläufe entlang einer Strecke detailliert untersucht werden. Die wesentlichen Schwierigkeiten dabei sind die Datenauswertung und das Post Processing der erhobenen Verkehrsinformationen.

Eine weitere Problemstellung ist die Tatsache, dass in den derzeit in Verwendung befindlichen Qualitätsbeurteilungskonzepten keine umweltrelevanten Aspekte als Eingangsgrößen verwendet werden. Eine emissionstechnische Beurteilung einer innerstädtischen Verkehrssteuerung ist deshalb nur eingeschränkt oder mit hohem Aufwand möglich.

In dieser Arbeit soll durch Analyse von realen Fahrtverläufen relevante Kenngrößen für eine Qualitätsbeurteilung, in einem ersten Schritt identifiziert werden. In einem weiteren Schritt soll versucht werden, mithilfe dieser Kenngrößen auf die Qualität der Hauptverkehrsstraße, samt Lichtsignalsteuerung schließen zu können und dabei auch umweltrelevante Beurteilungskriterien einfließen zu lassen.

Aufgabenstellung

Ziel dieser Masterarbeit ist eine Methodik zur Qualitätsbeurteilung für Verkehrslichtsignalanlagen entlang eines Straßenzuges im innerstädtischen Bereich, zu entwickeln. Das Bewertungsverfahren soll neben verkehrstechnischen auch umweltrelevante Betrachtungsweisen beinhalten. Grundlage und Datenbasis dafür liefern reale GPS-Trajektorien aus dem Stadtgebiet von Graz, die in der Arbeit zuerst erhoben und analysiert, ausgewertet und als Eingangsgrößen für das Bewertungsverfahren verwendet werden.

Dabei sollen mögliche fahrdynamische Kenngrößen für die Qualitätsbeurteilung aus den GPS-Trajektorien gewonnen werden. Um auch umweltrelevante Aspekte miteinfließen zu lassen soll der Zusammenhang zwischen Schadstoffemissionen und den zuvor erhobenen Kenngrößen untersucht werden. Die dafür benötigten Emissionswerte sollen über die zuvor erhobenen Fahrzyklen mittels einer Simulationssoftware (PHEM) berechnet werden.

Ziel dieser Untersuchung ist ein Bewertungsschema für signalisierte Streckenzüge anhand der zuvor identifizierten Kenngrößen unter Berücksichtigung der Schadstoffemissionen zu erarbeiten. Dieses Verfahren soll eine Alternative bzw. Erweiterung zu den derzeit verwendeten Qualitätsbeurteilungsverfahren darstellen.

Als Untersuchungsfeld sollen reale Straßenzüge mit 5 bis 10 Lichtsignalgesteuerten Knoten verwendet werden.

Weiters ist in der Arbeit zu klären, unter welchen Randbedingungen eine solche Qualitätsbewertung sinnvoll und in der Praxis anwendbar ist.

Die folgende Liste enthält wesentliche Bearbeitungspunkte der Masterarbeit; Abweichungen mit fortschreitendem Erkenntnisstand während der Bearbeitung sind möglich:

- Literaturrecherche zum Thema der Bewertungsmethodik und der Kenngrößen von VLSA sowie deren Erfassungsmöglichkeiten.
- Auswahl und Anwendung der relevanten Kenngrößen anhand von realen Verkehrsmessungen im Stadtgebiet von Graz. Die aufgenommenen GPS-Trajektorien sind weiters zu analysieren und die fahrdynamischen Kenngrößen sind daraus zu berechnen.
- Berechnung der Emissionswerte anhand der zuvor ermittelten Trajektorien der Einzelfahrzeuge und Untersuchung der Zusammenhänge zwischen den gewählten Kenngrößen und den berechneten Schadstoffemissionen mit PHEM.
- Entwicklung und Anwendung eines neuen Bewertungssystems anhand der zuvor ermittelten Kenngrößen auf ein reales Untersuchungsgebiet oder einer Mikrosimulation.

Für die Anfertigung der Masterarbeit stehen die Anwendungsprogramm VISSIM, PHEM und Statistiksoftware zur Verfügung. Ein PC mit der Produktsoftware der institutseigenen GPS-Geräte, die GPS-Geräte selbst, sowie allgemeine Bürosoftware stehen dem Diplomanden zum Zweck von etwaigen Messfahrten am Institut zur Verfügung. Der Diplomand verpflichtet sich, die Software sowie die bereitgestellten Daten ausschließlich zur Anfertigung der Masterarbeit zu nutzen und bei der Datenaufbereitung und Datenanalyse der zur Verwendung gestellten Verkehrszählenden Datenschutzrichtlinien einzuhalten.

Die Arbeit ist zweifach mit allen Anlagen in DIN A4 gebunden einzureichen. Ein Datenträger mit dem Text, Präsentationen, Simulationsmodellen sowie Verkehrsmessungen und deren Analysedaten sind beizulegen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf
Tel. 0316 873 6220
martin.fellendorf@tugraz.at
Betreuer

Dipl.-Ing. Michael Haberl
Tel. 0316 873 6722
michael.haberl@tugraz.at
Mitbetreuender Assistent

Kurzfassung

Bewertungsmethodik der Verkehrssteuerung innerstädtischer Hauptverkehrsstraßen

128 Seiten, 76 Abbildungen, 25 Tabellen

Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Bewertungsmethodik des Verkehrsablaufes an signalisierten innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen. Damit soll es möglich sein auf die Qualität der Verkehrssteuerung schließen zu können und Mängel bzw. Problemstellen zu identifizieren. Als Eingangsgrößen werden Fahrverläufe (Trajektorien) verwendet, die aus GPS unterstützten Messfahrten gewonnen werden. Die dabei aufgezeichneten Fahrverläufe sind nach dem Prinzip der Floating Car Data, charakteristisch für den vorherrschenden Verkehrsfluss und beinhalten sämtliche Bewegungsvorgänge des Fahrzeuges. Der Informationsgehalt dieser Daten ersetzt mit einer geeigneten Auswertung, heute in Verwendung befindliche Verkehrsdatenerhebungen wie Verkehrszählungen oder Reisezeitmessungen.

Die Bewertungsmethodik beruht auf einer Kombination von zwei eigenständigen Bewertungsverfahren mit unabhängigen Eingangsgrößen. Eine Größe ist charakteristisch für den Emissionsausstoß bzw. den Kraftstoffverbrauch, die andere für die Qualität der koordinierten Verkehrssteuerung. Ziel einer funktionierenden koordinierten Lichtsignalsteuerung ist es, Fahrzeuge möglichst flüssig und ohne Halte über eine Strecke zu steuern (Grüne Welle), deshalb wird dafür die Anzahl der auftretenden Haltevorgänge, als Qualitätsmerkmal verwendet.

Zur Erhebung der emissionstechnischen Eingangsgröße, wird in der Arbeit eine geeignete fahrdynamische Kenngröße gesucht, die indirekt mit dem Kraftstoffverbrauch zusammenhängt. Zur Identifikation dieser Kenngröße wurden mehrere fahrdynamische Kenngrößen (z.B. positive Beschleunigung oder mittlere Reisegeschwindigkeit) aus real gemessenen Fahrverläufen (GPS-Trajektorien) untersucht, und mit simulierten Emissions- und Kraftstoffverbrauchswerten (PHEM), verglichen. Dabei hat sich der größte Zusammenhang zwischen der mittleren Reisegeschwindigkeit und dem Kraftstoffverbrauch, mit einem Bestimmtheitsmaß von mehr als 80%, ergeben. Dieser Zusammenhang wurde mithilfe der linearen Regressionsrechnung, auf Grundlage von mehr als 400 Einzeltrajektorien, auf 7 Hauptverkehrsachsen im Grazer Stadtgebiet, bestimmt. In einem nächsten Schritt sind mithilfe einer Clusterbildung der Einzelzyklen, sechs Qualitätsstufen entwickelt worden, die eine umweltrelevante Qualitätsbeurteilung anhand der mittleren Reisegeschwindigkeit zulassen. Eine Neuentwicklung in dieser Arbeit stellt die Tiefe der Qualitätsbetrachtung des Streckenzuges dar, die bis zur Ebene einzelner VLSA reicht. Dafür wurde eine Einteilungsmöglichkeit für Streckenzüge entwickelt und untersucht, mit der Einflussbereiche von einzelnen Lichtsignalanlagen auf Fahrzeuge abgeschätzt werden. Erst dadurch ist es möglich, Kenngrößen für einzelne Abschnitte zu berechnen und damit Analysen auf Ebene der Einzelanlagen, durchzuführen.

Die gesamte Methodik ist so aufgebaut, dass sie computergestützt automatisiert werden kann. Als Eingangsdaten sind lediglich GPS-Trajektorien aus Messfahrten und Standorte von signalisierten Knotenpunkten nötig. Die Anwendung der Bewertungsmethodik ist deshalb einfach und mit wenig Personalaufwand zu bewältigen. Maßgeblich für die Anwendung des Bewertungsverfahrens ist die Datenaufbereitung und -verarbeitung, der gemessenen GPS Trajektorien. Die Ergebnisse der Qualitätsanalyse stellen die Grundlage für Verbesserungsmaßnahmen der Verkehrssteuerung dar.

Abstract

Methodology to analyse the quality of signalised arterials

128 pages, 76 figures, 25 tables

The main content of this master thesis is to develop a new methodology in order to analyse the quality of traffic flow on signalised arterials and the traffic control system. With this method it should be possible to detect failure areas and potentials of traffic control improvement. The inputs for the quality analysis are GPS-tracks extract from floating car data. These data contain information of the traffic flow and its kinematics.

The methodology combines two different evaluation methods with independent input parameters. One of the two inputs is a characteristic of the pollution or rather the fuel consumption. The second parameter describes the quality of the traffic control and its signalisation system. Many arterials contain platooned traffic flow. In order to minimize delay and number of stops, the traffic lights should be coordinated. Therefor the second method measures the level of coordination between successive traffic lights.

The newly developed pollution linked analysis is based upon the fuel consumption along an arterial. Thus, the first step is to search a kinematic parameter which can directly be linked to the fuel consumption and which can be calculated from GPS-tracks as well. Therefore some parameters, for example the positive acceleration or the average travel time, were analysed, regarding their correlation with the simulated fuel consumption (PHEM Simulation). The highest correlation was achieved with the average travel speed, with an explanation of more than 80%. In order to calculate the correlations a linear regression model is used. The basis therefor are more than 400 single GPS-Tracks on 7 different arterials in Graz. In a next step a level of service concept was built, with 6 different levels of quality. The boarders for the LOS are calculated with a cluster analysis. These levels are used to describe the quality of pollution (fuel consumption) based on the average travel speed.

For the analysis of quality and the detection of failure areas at single intersections, the arterial is divided into specific sections. Therefore, a new calculation method is developed which represents the section length in which the vehicle is under influence of the traffic signals. This fragmentation is used to calculate specific quality parameters for each intersection along the arterial from GPS-tracks.

The methodology to analyse the quality of arterials could be embedded in a software tool. The only input parameters are the logged GPS-tracks and the position of the intersections along the street.

The results of this study can be used to improve traffic signal control.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract.....	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungen	IX
1 Einleitung	1
2 Innerstädtische Verkehrssteuerung an Knotenpunkten	4
2.1 Verfahren von Lichtsignalsteuerung	7
2.1.1 Planung eines Festzeitprogramms.....	8
2.1.2 Übersicht über Steuerverfahren von VLSA.....	12
2.2 Kenngrößen von VLSA und deren Erfassung	16
2.3 Systeme und Verfahren der Qualitätsbewertung von VLSA	24
2.3.1 Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA 2010) :	24
2.3.2 Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS Fassung 2005):	25
2.3.3 Highway Capacity Manual (HCM Fassung 2000):	27
2.3.4 Verfahren nach Spangler (2009).....	30
2.3.5 Verfahren nach Brilon (2003).....	31
2.3.6 Weitere ausgewählte Bewertungsmöglichkeiten und Ansätze	32
2.3.7 Fazit der gängigen Bewertungsverfahren	34
2.4 Emissionsberechnung	35
3 Die Bewertungsmethodik	37
3.1 Einflussbereiche von VLSA	39
3.2 Vorstellung der untersuchten fahrdynamischen Kenngrößen	51
3.3 Korrelationsanalyse	56
3.3.1 Emissionsbezogene Regressionsanalyse der fahrdynamischen Kenngrößen	57
3.3.2 Statistische Untersuchung der Einflussbereiche von VLSA	64

3.4	Eingangsgrößen	69
3.4.1	Kenngröße für Schadstoffemissionen	69
3.4.2	Haltevorgänge	74
3.5	Analyse und Bewertung	77
3.5.1	Analyse des Streckenzuges	77
3.5.2	Analyse der Einzelknoten	79
4	Anwendung der Bewertungsmethodik	81
4.1	Datenerhebung	82
4.2	Datenaufbereitung	85
4.3	Abschätzung der erforderlichen Trajektorien	88
4.4	Anwendungsbeispiele	94
4.4.1	Graz – Wienerstraße	94
4.4.2	Graz – Triesterstraße Nord	97
4.5	Vergleiche von Bewertungsverfahren	99
5	Fazit, Erkenntnisse und Diskussion	101
6	Literaturverzeichnis	107
7	Glossar	110
8	Anhang	111

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Qualitätsbewertung auf Ebene der Strecke und der Einzelanlagen	1
Abbildung 2: Drei Geschwindigkeitsprofile auf einem Streckenzug mit vier VLSA	2
Abbildung 3: Einsatzbereiche unterschiedlicher Knotentypen (TRB, 2000, S. 10-21).....	4
Abbildung 4: Beispiel eines vollständigen Signallageplans (FGSV F. f., 2010, S. 12)	9
Abbildung 5: Beispiel für eine Phaseneinteilung (Fellendorf, 2011, S. 52)	10
Abbildung 6: Beispiel für einen einfachen Phasenfolgeplan (FGSV F. f., 2010, S. 20).....	11
Abbildung 7: Beispiel für einen Signalzeitplan (FGSV F. f., 2010, S. 29).....	12
Abbildung 8: Übersicht über Steuerverfahren von VLSA	13
Abbildung 9: Koordinierung eines Fahrzeugpulk.....	14
Abbildung 10: Schematischer Vergleich der Grünbänder einer koordinierten a)Festzeitsteuerung und einer b)verkehrsabhängigen Steuerung (Bossert, 2007, S. 4.5-43)	15
Abbildung 11: Beurteilung des Verkehrsablaufs an signalisierten Knotenpunkten.....	16
Abbildung 12: Grafische Darstellung der Wartezeit an einer VLSA	17
Abbildung 13: Trajektorien einer Fahrzeugkolonne an einem signalisierten Knoten.....	18
Abbildung 14: Grafisch Darstellung der Wartezeitmodelle (Kang, 2000, S. 10/12).....	19
Abbildung 15: Kinematische Zusammenhänge (Fellendorf, 2009)	22
Abbildung 16: Geschwindigkeitsprofil und Geschwindigkeitsganglinie.....	22
Abbildung 17: Datenerhebung aus GPS-Messfahrten bzw. FCD.....	23
Abbildung 18: Übersicht der Bewertungsverfahren für Lichtsignalsteuerung im HBS 2000	26
Abbildung 19: Übersicht der Bewertungsverfahren von signalisierten Hauptverkehrsstraßen nach HCM 2000.....	28
Abbildung 20: Einteilung der Qualitätsstufen (LOS) für einzelne VLSA nach HCM (TRB, 2000, S. 16-2)	28
Abbildung 21: Pufferzeitindex (blau) und mittlere Reisegeschwindigkeit (Spangler, 2007, S. 17).....	31
Abbildung 22: Schematische Darstellung der Emissionsberechnung (Treiber, 2010, S. 276).....	35
Abbildung 23: Übersicht der Emissionssimulation PHEM (Hausberger, 2010, S. 8)	35
Abbildung 24: Vergleich von Kraftstoffverbrauchsmessung zu Simulationen (Hausberger S., 2008) ..	36
Abbildung 25: Schematische Darstellung der Bewertungsmethodik.....	38
Abbildung 26: Problematik der Abschnittseinteilung des Streckenzuges.....	39
Abbildung 27: Abschnittseinteilung mit Haltelinienpositionen	40
Abbildung 28: Abschnittseinteilung mit Haltelinienpositionen (Verfahren 1 ohne Überlappung).....	40
Abbildung 29: Abschnittsgrenzen nach dem Kreuzungsbereich (gegenüberliegende Haltelinie)	41
Abbildung 30: GPS – Trajektorie für einen Streckenzug inkl. Haltelinienpositionen	42
Abbildung 31: Berechnungslogik zur Bestimmung von Einflussbereichen	43
Abbildung 32: Ergebnis des Verarbeitungslogik für den Einflussbereich von VLSA.....	45
Abbildung 33: Verkehrsbelastung für den Durchgangsverkehr entlang des Streckenzuges	46
Abbildung 34: Berechnungslogik zur Bestimmung von Einflussbereichen	47
Abbildung 35: Alle berechneten Einflussbereichsgrenzen eines Tages	48
Abbildung 36: Abschnittseinteilung am Beispiel eines Geschwindigkeitsprofils.....	49
Abbildung 37: Abschnittseinteilung anhand von Einflussbereichen aus den Fahrtverläufen und Anfahrtsbeschleunigung.....	49

Abbildung 38: Abschnittseinteilung anhand von Einflussbereichen aus den Fahrtverläufen und Anfahrtsbeschleunigung.....	51
Abbildung 39: Grafische Darstellung des PKE in Abhängigkeit zur Geschwindigkeitsganglinie (Konstantas G., 2004, S. 904)	52
Abbildung 40: Bestimmung der Haltevorgänge anhand des Geschwindigkeitsverlaufes.....	55
Abbildung 41: Schematische Darstellung der Korrelationsanalyse.....	56
Abbildung 42: Korrelationsanalyse der Kenngröße mittlere Reisegeschwindigkeit, N=410.....	58
Abbildung 43: Korrelationsanalyse der Kenngröße durchschnittliche Positive Beschleunigung N=410	58
Abbildung 44: Korrelationsanalyse der Kenngröße Relativ positiv Acceleration, N=410	59
Abbildung 45: Korrelationsanalyse der Kenngröße Summe PKE, N=410	59
Abbildung 46: Schematische Darstellung der Methodik.....	64
Abbildung 47:Vergleich verschiedener Einflussbereichseinteilungen von Lichtsignalanlagen.....	65
Abbildung 48: Schema zur Bewertungsmethodik infolge der Emissionskenngröße	69
Abbildung 49: Datenbasis der Clusteranalyse, N=410	70
Abbildung 50: Schematische Darstellung zur Qualitätsstufeneinteilung.....	71
Abbildung 51 : Emissionsbezogene Qualitätsstufeneinteilung	72
Abbildung 52: Kraftstoffverbrauch aus PHEM für ein Geschwindigkeitsprofil: Wienerstraße (stadteinwärts) am 17.01.2012 um 07:00 Uhr	73
Abbildung 53 : Emissionsbezogene Qualitätsstufeneinteilung	75
Abbildung 54: Schema zur Bewertungsmethodik anhand des Koordinierungsmaßes	76
Abbildung 55:QSV anhand des Koordinierungsmaß (Schnabel,2006)	76
Abbildung 56: Schema der Qualitätsbeurteilung am Streckenzug.....	77
Abbildung 57: Nach dem Koordinierungsmaß (Schnabel, 2006) bewertete Messfahrten auf der Straßgangerstraße (Süd, SG 81) am 19.01.2012 oben: Weg-Zeit Diagramm / unten: Geschwindigkeitsprofil	78
Abbildung 58: Schematischer Aufbau der Qualitätsbeurteilung von Streckenzügen	79
Abbildung 59: Beurteilungsmatrix für die Qualitätsbewertung von Streckenzügen und LSA	80
Abbildung 60: Racelogic Video VBOX Pro (Racelogic, 2012) und Messaufbau (rechts).....	82
Abbildung 61: Reflexionen des GPS-Signals an Häuserschluchten (Mansfeld, 2010, S. 58)	83
Abbildung 62: Streuung des GPS-Signals bei Stillstand	84
Abbildung 63: Aufbereitung der GPS-Trajektorien	85
Abbildung 64: Screenshot der Datenaufbereitungssoftware „VTools“ von Racelogic	86
Abbildung 65: Auszug aus der .csv-Datei einer Einzeltrajektorie mit Haltelinienmarkierung	87
Abbildung 66: Vergleich der Reisezeitverteilung aus GPS-Messfahrten und Kennzeichenerfassung am Beispiel der Brehmstraße/Lindemannstraße (Wiethold, 2007, S. 74)	90
Abbildung 67: Gegenüberstellung der berechneten erforderlichen Stichprobengröße und der simulierten (BMVBS, 2010, S. 127).....	91
Abbildung 68: Erforderlicher Stichprobenumfang und Variationskoeffizient in Abhängigkeit zur Grundgesamtheit (Otterstätter, 2011, S. 704)	92
Abbildung 69: Korrelationsanalyse der Kenngröße PKE.....	114
Abbildung 70: Korrelationsanalyse der Kenngröße Summe PKE	114
Abbildung 71: Korrelationsanalyse der Kenngröße Verlustzeitgeschwindigkeit	115
Abbildung 72: Korrelationsanalyse der Kenngröße durchschnittliche positive Beschleunigung (Gesamtweg)	115

Abbildung 73: Korrelationsanalyse der Kenngröße Summer der positiven Beschleunigungen	116
Abbildung 74: Korrelationsanalyse der Kenngröße Anzahl der Halte	116
Abbildung 75: Korrelationsanalyse der Kenngröße Acceleration Noise	117
Abbildung 76: Korrelationsanalyse der Kenngröße Anteil positiver Beschleunigungen an der Gesamtfahrt	117

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vereinfachte Übersicht der Steuerverfahren von VLSA (Bosserhoff, 2007, S. 4.5-37).....	13
Tabelle 2: Qualitätsstufeneinteilung von signalisierten Knotenpunkten nach HBS 2000 (FGSV F. f.-u., 2005, S. 6-9).....	27
Tabelle 3: Einteilung der Ankunftstypen bei koordinierten VLSA nach HCM (TRB, 2000, S. 16-12)	29
Tabelle 4: Einteilung der Qualitätsstufen von Hauptverkehrsstraßen nach HCM (TRB, 2000, S. 15-3)	29
Tabelle 5: Qualitätsstufeneinteilung für den Verkehrsablauf auf Hauptverkehrsstraßen nach Spangler, 2009.....	31
Tabelle 6: Qualitätsstufeneinteilung für den Verkehrsablauf auf Hauptverkehrsstraßen nach Brilon, 2003.....	32
Tabelle 7: Vergleich der Einflussbereichsgrenzen unterschiedlicher Signalprogramme	46
Tabelle 8: Zusammenfassung der Korrelationsanalyse (Streckenzüge).....	60
Tabelle 9: Ergebnisse aus der multiplen linearen Regressionsrechnung	62
Tabelle 10: Ergebnisse aus der multiplen linearen Regressionsrechnung, N=410	63
Tabelle 11 : Ergebnisse der Korrelationsanalyse (Abschnittseinteilung von Streckenzügen): Mittelwert der Varianzerklärung des NOx-Ausstoß und Kraftstoffverbrauch.	66
Tabelle 12 : Ergebnisse der Korrelationsanalyse (Abschnittseinteilung von Streckenzügen): Mittelwert der Varianzerklärung über die relevanten fahrdynamischen Kenngrößen, $v_{m,Reise}$, $v_{m,netto}$, $a_{pos,avg}$, RPA.66	66
Tabelle 13 : Ergebnisse der Korrelationsanalyse der verschiedenen Verfahren zur Abschnittunterteilung von Streckenzügen, N= 284.....	68
Tabelle 14 : Mittler Anzahl an VLSA je Streckenkilometer (Auszug aus dem Anhang A1).....	72
Tabelle 15 : Gegenüberstellung der gängigen Qualitätsstufeneinteilungen anhand der mittleren Reisegeschwindigkeit (HBS, HCM) mit den emissionsbezogen QSV	73
Tabelle 16 : Gegenüberstellung der berechneten und der aufgezeichneten Haltevorgänge/Halteursachen für einen Streckenzug	75
Tabelle 17: Abschätzung der Grundgesamtheit am Beispiel der Wienerstraße (SG 30)	88
Tabelle 18: Berechnung der erforderlichen Stichprobengröße anhand der Reisegeschwindigkeit am Beispiel der Wienerstraße (SG 30)	89
Tabelle 19: Empfehlung für die erforderliche Stichprobengröße (BMVBS, 2010, S. 128)	92
Tabelle 20: Empfehlung für die erforderliche Stichprobengröße (Otterstätter, 2011, S. 709).....	92
Tabelle 21: Ergebnis des Bewertungsverfahrens für Streckenzüge (SG 30)	94
Tabelle 22: Ergebnis des Bewertungsverfahrens im Einflussbereich von LSA (SG30)	95
Tabelle 23: Ergebnis des Bewertungsverfahrens von Streckenzügen (SG 41)	97
Tabelle 24: Ergebnis des Bewertungsverfahrens im Einflussbereich von LSA (SG41)	98
Tabelle 25: Vergleich von mehreren Bewertungsverfahren am Beispiel des SG 30 sowie SG41	99

Abkürzungen

AccNoise	Acceleration Noise (Beschleunigungsrauschen)
AMONES	Anwendung und Analyse modellbasierter Netzsteuerungsverfahren in städtischen Straßennetzen
ANOVA	Analysis of Varianz (Varianzanalyse)
AVG	Durchschnitt (Average)
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
EB	Einflussbereich
EMI	Emissionsbezogen
FC	Fuel Consumption (Kraftstoffverbrauch)
FCD	Floating Car Data
FFS	Free Flow Speed
FZG	Fahrzeuge
GAVe	Grazer Adaptive Verkehrssteuerung
GPS	Global Position System
HBS	Handbuch zur Bemessung von Straßenanlagen
HC	Kohlenwasserstoffe
HCM	Highway Capacity Manual
HZ	Hertz (Frequenz)
KfZ	Kraftfahrzeug
LOS	Level of Service
VLSA	Verkehrslichtsignalanlage (Ampel)
MF	Messfahrt
mIV	Motorisierter Individualverkehr
nmIV	Nicht motorisierter Individualverkehr
NOx	Stickoxide
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PHEM	Passenger Car and Heavy Duty Emission Modell
PKE	Positive Kinetic Energy
PM	Pariculate Matter, Partikel
QSV	Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes
R ²	Bestimmtheitsmaß
RBL	Rechnergestütztes Betriebsleitsystem
RiLSA	Richtlinie für Lichtsignalanlagen

RIN	Richtlinien für integrierte Netzgestaltung
RPA	Relative Positive Energy
RVS	Richtlinie und Vorschriften für das Straßenwesen
SG	Steuergebiet
Sig	Signifikanzniveau
SN	Schweizer Norm
SP	Signalprogramm
STZG	Streckenzug
TRB	Transportation Research Board
VLSA	Verkehrslichtsignalanlage
MF	Messfahrt
k	Koordinierungsmaß
csv	comma-separated values

1 Einleitung

Verkehrssignalanlagen nehmen eine zentrale Rolle in heutigen Verkehrsnetzen ein. Vor allem in städtischen Gebieten hängt die Verkehrsqualität wesentlich von der Verkehrssteuerung ab. Im selben Kontext mit der Verkehrsqualität und der Verkehrsbelastung, steht auch die damit verbundene Schadstoffbelastung. Deshalb werden VLSA und Verkehrssteuerungen, oft in Zusammenhang mit Schadstoffemissionen des innerstädtischen Verkehrs, gebracht.

Somit sind VLSA und Verkehrssteuerungen immer öfter Gegenstand, politischer und gesellschaftlicher Diskussionen.

Innerstädtische Hauptverkehrsadern bzw. Hauptverkehrsstraßen sind typische Anwendungsgebiete für moderne Verkehrssteuerungssysteme, die darauf abzielen, den Verkehr möglichst effizient fortzubewegen. Insbesondere durch Optimierungen der Steueralgorithmen, können Verbesserungen des Verkehrsflusses, erreicht werden. Vor jedem Optimierungsschritt steht jedoch eine objektive Qualitätsanalyse, sowie die Feststellung von Mängel. Dafür sind verkehrliche Kennzahlen sowie ein dazu passendes Beurteilungskonzept nötig.

Im Fokus dieser Arbeit steht deshalb ein Verfahren, mit dem der Zustand von innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen detailliert analysiert und qualitativ bewertet wird. Um eine umfassende Analyse und Qualitätsbeurteilung zu ermöglichen, ist eine Bewertung anhand mehrerer Kenngrößen notwendig. Durch die Kombination von unabhängigen Einzelbewertungen, wird in der Arbeit versucht, städtische Hauptverkehrsstraßen samt VLSA, detailliert zu beurteilen und örtliche Mängel aufzuzeigen. Dafür wird ein neuartiges Bewertungsverfahren entwickelt, das umweltrelevante Aspekte, in Form von Schadstoffausstoß bzw. Kraftstoffverbrauch, zu einem Qualitätsmerkmal macht. Um örtliche Mängel entlang der Hauptverkehrsstraße zu erkennen, ist eine Einteilung des Streckenzuges in Teilstrecken erforderlich, die einer einzelnen VLSA zugeordnet werden kann (siehe Abbildung 1).

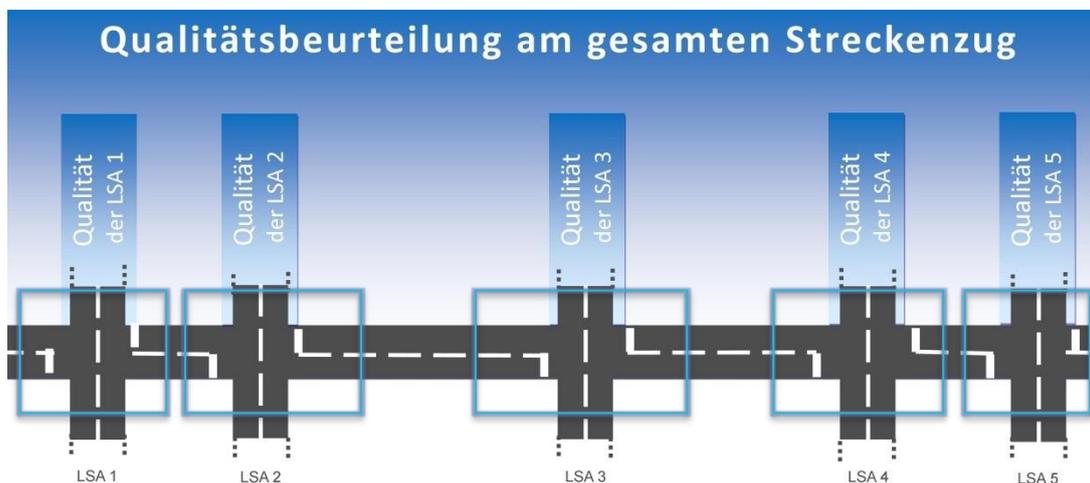


Abbildung 1: Qualitätsbewertung auf Ebene der Strecke und der Einzelanlagen

Die Abgrenzungen der Teilbereich werden hinsichtlich des Einflusses der Lichtsignalanlage auf den Verkehr, näher untersucht. Dabei wird der Kernfragestellung nachgegangen: „Wie weit vor und nach der Haltelinie, wird ein Fahrzeug von der VLSA, beeinflusst?“ Im derzeitigen Stand der Forschung, sind diesbezüglich keine Hinweise zu finden.

Für diese detaillierte Bewertungsmethodik ist es nötig, eine geeignete Datenquelle zu finden, die den geforderten Informationsgehalt enthält. Übliche Verkehrserhebungen z.B. mit Detektorschleifen oder Querschnittszählstellen, liefern örtliche Verkehrsinformation. Im Gegensatz dazu stehen

Erhebungsmethoden die inmitten des Verkehrsflusses, stattfinden, sog. Floating Car Data (FCD). Dabei werden Messfahrzeuge in den fließenden Verkehr integriert und während diese Fahrzeuge mit dem vorherrschenden Verkehr „mitschwimmen“ (engl.: floating), werden kontinuierlich Daten aufgezeichnet. Üblicherweise werden die Messwagen u.A. mit GPS-Technik ausgestattet. Das Ergebnis der GPS-Messfahrten dann zeitlich bestimmte Wegveränderungen, sog. Trajektorien (Weg-Zeit Diagramm). Der Informationsgehalt solcher Daten ist sehr hoch, da sämtliche Bewegungsvorgänge entlang der Messstrecke aufgezeichnet werden.

Über eine Vielzahl an Messfahrten kann die Verkehrssituation während des Messzeitraumes, wiedergegeben werden.

Diese Erhebung bildet die Grundlage der Bewertungsmethodik. Die Qualität der Hauptverkehrsstraße samt Lichtsignalanlagen, wirkt sich direkt auf das Fahrverhalten der Messfahrzeuge aus und Steuerungsmängel bzw. Problemstellen wiederholen sich während der GPS-Messfahrten. Örtliche Mängel im Verkehrsgeschehen können damit gezielt identifiziert werden.

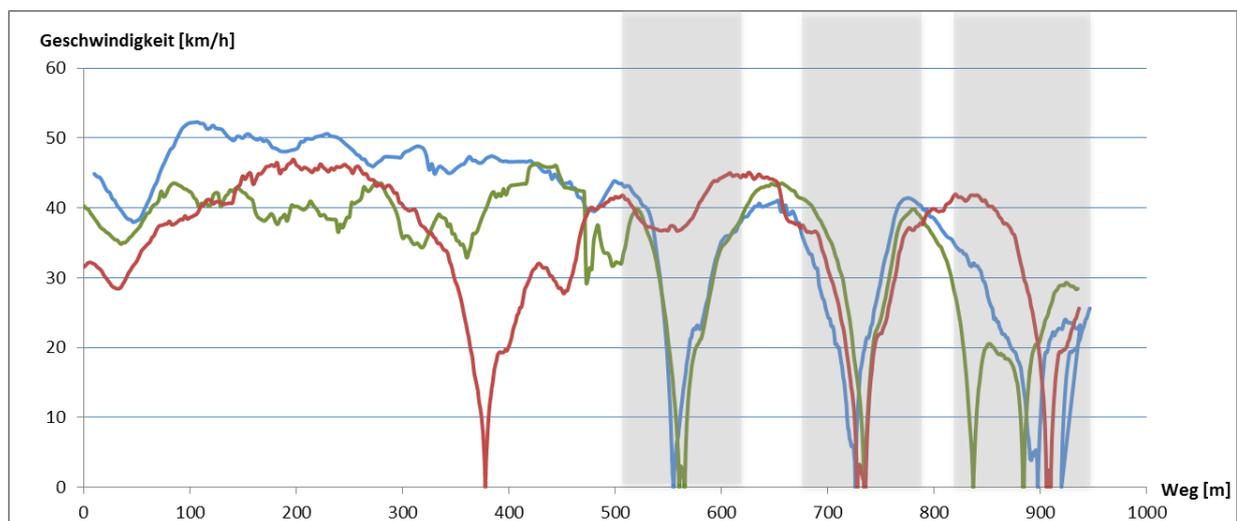


Abbildung 2: Drei Geschwindigkeitsprofile auf einem Streckenzug mit vier VLSA

Zur Verdeutlichung der Problemstellenidentifikation mittels Fahraufzeichnungen, dient die Abbildung 2. Dort sind zur besseren Ansicht nicht Trajektorien, sondern das daraus abgeleitete Geschwindigkeitsprofil dargestellt. Das Profil zeigt die aufgezeichneten Geschwindigkeiten entlang eines signalisierten Streckenzuges mit 4 VLSA. Schon bei 3 Messfahrten lassen sich Problemstellen erkennen. In den grau hinterlegten Bereichen, kommt es bei einem Großteils der Messfahrten, zu markanten Geschwindigkeitseinbrüchen.

Den Zusammenhang zwischen Emissionen und Qualität der Hauptverkehrsstraße bilden ebenfalls die Trajektorien, aus den GPS-Messfahrten. Dabei wird versucht, eine kinematische Kenngröße zu identifizieren, mit der eine qualitative Beurteilung anhand des Emissionsausstoßes oder Kraftstoffverbrauchs auf der Strecke möglich ist.

Im Zuge der Arbeit sollen folgende forschungsrelevante Fragestellungen diskutiert und beantwortet werden:

(1) *Ist eine Bewertung der Verkehrssteuerung sowie der Qualität des Streckenzuges auf Grundlage von GPS-Trajektorien möglich?*

Die derzeit im Stand der Technik befindlichen Bewertungsverfahren werden auf Grundlage von Messfahrten (ohne GPS), Zählungen oder Verkehrserhebungen durchgeführt. Der Informationsgehalt von Trajektorien steht dem gegenüber und soll hier als Datenquelle für Qualitätsbewertung näher untersucht werden. Dabei soll auch die Praxistauglichkeit diskutiert und auf Besonderheiten der Datenprozessierung hingewiesen werden.

(2) *Lassen sich Schadstoffemissionen sowie der Kraftstoffverbrauch, anhand von fahrdynamischen Kenngrößen, beschreiben?*

Schadstoffemissionen und der Kraftstoffverbrauch sind durch komplexe Wechselwirkungen zwischen Fahrzeugleistung, Fahrzeugkinematik und Fahrwiderständen bestimmt. Eine streckenbezogene Zuordnung ist nur durch Simulationen oder Testmessungen am Prüfstand, möglich. In dieser Arbeit wird jedoch versucht, die komplexe Emissionsberechnung zu umgehen und über eine fahrdynamische Kenngröße qualitativ abzuschätzen.

(3) *Kann ein Einflussbereich von VLSA abgeschätzt werden?*

In derzeit dem Stand der Technik befindlichen Bewertungs- und Bemessungsverfahren von VLSA und Streckenzügen, wird in den meisten Fällen eine getrennte Beurteilung von signalisierten Knotenpunkten und dazwischenliegender freien Strecke angewendet (HBS, HCM, RILSA). In einigen Bewertungsverfahren für gesamte Streckenzüge wird von einer getrennten Beurteilung der beiden Bereiche (Strecke und Knotenpunkt) abgesehen (z. B. Spangler, 2009 oder Schnabel, 2003). Dadurch ist eine Qualitätseinschätzung für die gesamte Strecke möglich, nicht jedoch für die darin enthaltenen Einzelanlagen (VLSA). Dafür bedarf es einer geeigneten Unterteilungsmöglichkeit der Gesamtstrecke, die in dieser Arbeit untersucht wird.

2 Innerstädtische Verkehrssteuerung an Knotenpunkten

Die Einwohnerdichte in europäischen Ballungsräumen wächst stetig an. Auch in österreichischen Ballungsräumen werden in den kommenden Jahren weiterhin Zuwächse zu bemerken sein. Am Beispiel von Wien werden laut Bevölkerungsprognose im Jahr 2030 rund 1,9 Millionen Menschen leben, um etwa 200.000 mehr als heute. Auch für die Ballungsräume Graz, Innsbruck, Linz und St. Pölten wird eine deutliche Zunahme der Bevölkerung prognostiziert (VCÖ, 2011).

Mit der Bevölkerungszunahme in Ballungsräumen steigt auch die Verkehrsnachfrage und somit das tatsächliche Verkehrsaufkommen. Die weitere Steigerung des Straßenverkehrsaufkommens, mit der in jedem Fall zu rechnen ist, führt an die Grenzen der Leistungsfähigkeit des gesamten Straßensystems und vor allem deren Knotenpunkte. Aus verkehrsplanerischer Sicht, gilt es deshalb neben der Vermeidung von zu hohem innerstädtischem Verkehr die vorhandene Infrastruktur im Sinne einer Nutzungsoptimierung bestmöglich auszunutzen. Dies ist durch gezieltes Eingreifen in den Verkehrsablauf mittels geeigneten Steuerorganen möglich. Insbesondere an Knotenpunkten ist eine Steuerung mittels Lichtsignalanlagen nicht mehr wegzudenken. Es wird derzeit in Versuchsprojekten und kleinräumigen Anlagen im sog. Shared Space versucht, gänzlich ohne Verkehrssteuerung, sei es durch Lichtsignale oder durch Verkehrsgebotstafeln, auszukommen. Diese Art von Verkehrsabwicklung ist jedoch nur in speziellen Teilen mit niedrigen Verkehrsbelastungen sowie niedrigen Geschwindigkeiten einsetzbar. Um eine höhere Verkehrsbelastungen kontrolliert abzuwickeln zu können, insbesondere in Hinblick auf die Verkehrssicherheit, sind geeignete Knotenregelungen unabdingbar.

Im englischsprachigem Highway Capacity Manual, kurz HCM, ist eine Vorauswahl an Knotenpunktlösungen anhand der Verkehrsstärken der Knotenarme enthalten. Grundsätzlich ist es überall möglich den Verkehrsablauf mittels Lichtsignalanlagen zu steuern, jedoch wird es aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Qualität des Verkehrsflusses Grenzen der Einsetzbarkeit geben.

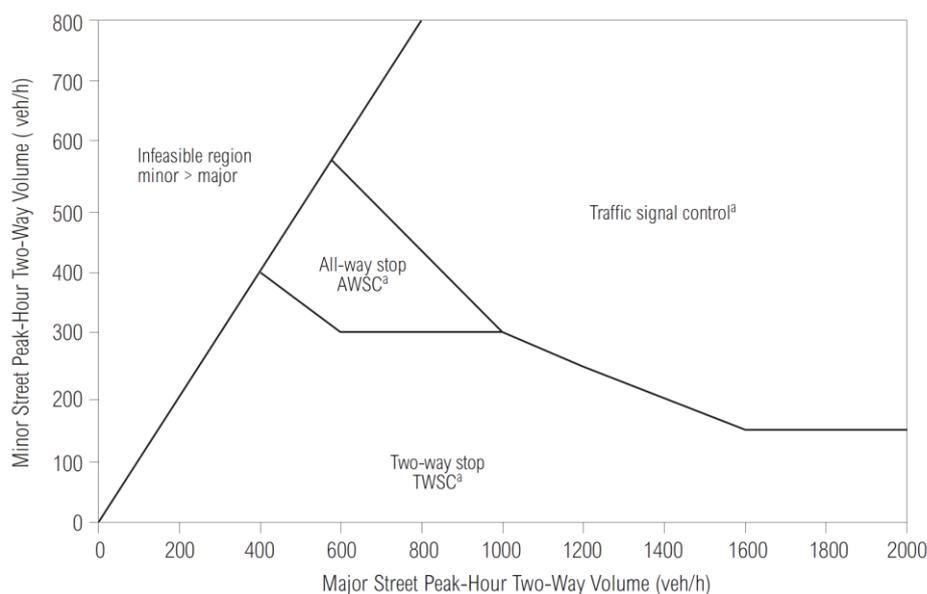


Abbildung 3: Einsatzbereiche unterschiedlicher Knotentypen (TRB, 2000, S. 10-21)

Dieses Diagramm zur Vorauswahl lässt sich auch im deutschsprachigen Raum gut übertragen. In der in Österreich gültigen RVS 03.05.12 ist ein Diagramm enthalten, mit dem man ebenfalls anhand der Verkehrsstärken auf die Notwendigkeit einer Lichtsignalsteuerung schließen kann. Kreisverkehre sind

im Diagramm nicht enthalten. Aufgrund der Verkehrsstärken wäre aber ein Kreisverkehr eine Alternative vor allem für lichtsignalgesteuerte Knotenpunkte mit ähnlichen Verkehrsbelastungen der vier Arme. Im hoch belasteten innerstädtischen Straßennetz spielen jedoch Kreisverkehrsanlagen eine eher untergeordnete Rolle, da sie aufgrund baulicher sowie verkehrstechnischer Aspekte unpassend sind. Man bedenke nur beispielsweise die Schwierigkeit einer Priorisierung der öffentlichen Verkehrsmittel in einem Kreisverkehr oder die bauliche Umsetzung von Straßenbahnlinien durch einen innerstädtischen Kreisverkehr. Deshalb wird in weiterer Folge nur mehr auf lichtsignalgesteuerte Knotenpunkte und deren Steuermechanismen eingegangen. „Bei starken Kraftfahrzeugströmen haben Fußgänger, insbesondere ältere Menschen und Kinder, kaum noch Gelegenheit, die Fahrbahn sicher zu überqueren. In solchen Fällen muss zum Schutz der Fußgänger eine Lichtsignalanlage, ohne detaillierte Betrachtung der Knotenstrombelastungen installiert werden“ (Schnabel W., 2010, S. 205).

Verkehrslichtsignalanlagen (VLSA) werden auf plangleichen Knotenpunkten eingesetzt, das bedeutet die Führung der Verkehrsströme verläuft auf einer Ebene, wodurch in weiterer Folge Konfliktzonen aufeinandertreffender Fahrzeugströme hervorgerufen werden. Die Lichtsignalanlage gibt abwechselnd verschiedene Verkehrsströme frei, wodurch sich unverträgliche Verkehrsströme nicht begegnen. Eine gezielte Freigabe ist erst durch die Steuerung möglich welche, die Aufgabe hat, zeitlich getrennte Konfliktströme verkehrssicher abzuwickeln. „Bezüglich der Sicherung und Erhöhung der Mobilität sowie zur Schaffung und Aufrechterhaltung einer guten Qualität des Verkehrsablaufs und einer hohen Verkehrssicherheit kommt ihnen somit eine große Bedeutung zu“ (IVH, 2008, S. 1).

„1913 entwickelte der US-Amerikaner James Hoge das uns bekannte Lichtsignal für den Kfz-Verkehr. Bereits 1917 wurden in Salt Lake City und 1922 in Houston koordinierte Lichtsignalsteuerungen eingerichtet. Im Jahr 1924 übernahm eine handgesteuerte Anlage auf dem Potsdamer Platz in Berlin als erste Lichtsignalanlage in Deutschland die Verkehrsregelung des damals verkehrsreichsten Platzes in Europa. Ende der zwanziger Jahre des letzten Jahrhunderts wurden auch in Berlin bereits mehrere Straßenzüge in „Grüner Welle“ betrieben. Verkehrsabhängige Steuerungen mit Bemessung der Freigabezeiten mittels Zeitlückenmessung kamen ab Beginn der dreißiger Jahre in den USA und Großbritannien zur Anwendung. 1952 wurde in Denver erstmalig ein Analogrechner für die Lichtsignalsteuerung eingesetzt; die an Messquerschnitten erfassten Verkehrsstärken wurden dabei für die Anpassung der Versatzzeiten im Zuge koordiniert gesteuerter Straßenzüge genutzt. Die Entwicklung digitaler Prozessrechner in den sechziger Jahren eröffnete neue Perspektiven auch für die Lichtsignalsteuerung. Mit dem Einsatz von Datenverarbeitungsanlagen wurden Verfahren der verkehrsabhängigen Signalprogrammwahl, zunächst in den USA und Kanada, in der Folgezeit auch in Europa, sowie erste Offline-Optimierungsverfahren bekannt. Hervorzuheben ist insbesondere das 1967 in Großbritannien entwickelte Verfahren TRANSYT, welches auf eine Minimierung der durchschnittlichen Reisezeiten in einem festzeitgesteuerten Straßennetz abzielt und hinsichtlich seiner Zielfunktion mehrfach erweitert wurde. Die Fortschritte auf dem Gebiet der elektronischen Datenverarbeitung ermöglichten in der Folgezeit die Entwicklung und den Einsatz auf komplexen Steuerungslogiken und mathematischen Modellen basierender Steuerungsverfahren. Eines der ersten und bis heute bekanntesten, zentral gesteuerten Optimierungsverfahren ist SCOOT (Split Cycle and Offset Optimizing Technique), welches erstmals 1973 in Großbritannien eingesetzt und seitdem mehrfach weiterentwickelt wurde“ (Vogt, 2005, S. 720).

Im Wesentlichen werden mit einem Lichtsignalgesteuerten Knotenpunkt zwei Ziele verfolgt:

- Verkehrssicherheit:

Durch die wechselnde Freigabe derselben Konfliktflächen für verschiedene Ströme entstehen sicherheitstechnische Risiken. Diese Risiken müssen entweder durch technische Ausgestaltung der Signalgeber oder durch das Signalprogramm selbst abgebaut und auf ein Minimum reduziert werden. Dabei ist Rücksicht auf die jeweilige Situation zu nehmen, beispielsweise sind Sichtverhältnisse oder Übersichtlichkeiten des Kreuzungsbereiches, mit einzuplanen. Insbesondere bei Knotenpunkten, an denen es häufig zu Verkehrsunfällen oder Gefahrensituationen kommt, ist eine Lichtsignalsteuerung fast unerlässlich. Innerorts gilt die Aufmerksamkeit besonders den Fußgängern und Radfahrern, da die Straßenquerungen gesichert sein sollen. Bei komplexeren Knotenpunkten mit asymmetrischen Armen oder mehr als vier Zu- und Ausfahrten wird aufgrund der mangelnden Begreifbarkeit und Unübersichtlichkeit ebenfalls eine Verkehrslichtsignalanlage bevorzugt.

- Leistungsfähigkeit

Die Leistungsfähigkeit eines Knotenpunktes kann durch gezielte Steuerungen der Lichtsignalanlage verbessert werden. Dabei hängt die Leistungsfähigkeit unmittelbar mit den Freigabezeiten der einzelnen Verkehrsströme zusammen. Die Dauer der Freigabezeiten für die Knotenströme beeinflusst die maximale Anzahl an Durchfahrten von Kfz je Zeiteinheit. Die Aufteilung der Freigabezeiten erfolgt im Wesentlichen über die Zufahrtsbelastung an den jeweiligen Knotenarmen. VLSA können durch intelligente Steuerverfahren eine maximale Leistungsfähigkeit anhand von Echtzeitdaten des Zuflusses erreichen. Geht man einen Schritt weiter und betrachtet die einzelnen Lichtsignalgesteuerten Knoten nicht mehr als autark, sondern vernetzt die Einzelknoten zu einem Steuerkollektiv, so ist es heutzutage üblich, die Leistungsfähigkeit von ganzen innerstädtischen Teilnetzen zu erhöhen. Die verschiedensten Steuerungstypen werden in diesem Abschnitt noch ausführlich behandelt.

Da die Leistungsfähigkeit eines Verkehrsabschnittes auch immer mit der Qualität der Überquerung einhergeht, spiegelt sich die Steigerung der Verkehrsleistung auch durch eine Verkürzung der Wartezeiten wider, beispielsweise für Verkehrsteilnehmer aus dem Nebennetz. Beispielsweise muss ein einbiegendes Fahrzeug aus einer niederrangigen Straße auf eine innerstädtische Hauptverkehrsader ohne VLSA mit längeren Wartezeiten rechnen. Parallel dazu kann dies auf Fußgängerübergänge stark befahrener Straßen umgelegt werden, die ebenfalls ohne signalisierte Übergänge mit erhöhten Wartezeiten zu rechnen haben.

„Da sowohl die Fußgänger, Radfahrer, Betreiber und Fahrgäste öffentlicher Verkehrsmittel als auch die Kraftfahrer selbst jeweils für sich fordern, dass durch die Lichtsignalanlage ein sicherer, zügiger und angenehmer Verkehrsablauf gewährleistet wird, kommt es zu Zielkonflikten, da die für sich berechtigten Forderungen der Verkehrsteilnehmergruppen in der Regel nicht gleichzeitig erfüllt werden können“ (Bosserhoff, 2007, S. 4.5-6).

Deshalb bietet eine VLSA im Sinne der Leistungsfähigkeit von unterschiedlichen Verkehrsmitteln die Möglichkeit einer bewussten Bevorzugung (Priorisierung) von einzelnen verkehrsteilnehmenden Gruppen (ÖV, Fußgänger, Radfahrer...).

Üblicherweise wird der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) hinsichtlich der Reisezeiten dem motorisierten Individualverkehr (mIV) bevorzugt, um möglichst pünktliche und schnelle Reisezeiten gewährleisten zu können. Die Priorisierung wird in der Steuerlogik verankert und

kann durch verkehrstechnische Einrichtungen so angesteuert werden, dass ein öffentliches Verkehrsmittel bei Ankunft an den Knoten stets ein Freigabesignal erhält und somit nahezu keine Verlustzeiten auftreten.

Lichtsignalanlagen bieten also eine Fülle an Einsatzgebieten und können nutzerspezifisch angepasst und konfiguriert werden. Aus gesamtheitlicher Sichtweise gibt es jedoch zwei wesentliche Nutzerebenen, die jeweils eigene Zielvorstellungen haben.

Der vorrangige *Nutzen eines Verkehrsteilnehmers* (i.d.R. Fahrzeuglenker), hinsichtlich einer VLSA wird sein, schneller und bequemer am Ziel anzukommen. Sekundäre Nutzerwünsche wären in diesem Fall eine zügige, treibstoffverbrauchsarme Durchfahrt des lichtsignalgesteuerten Abschnittes. Von Seiten der Verkehrsteilnehmer wird insbesondere auf innerstädtischen Hauptverkehrsachsen und zu Spitzenstunden oftmals eine mangelhafte oder nicht funktionierende Lichtsignalsteuerung beklagt. Dies ist meistens auf eine subjektive Meinungsbildung zurückzuführen, in der keineswegs an die übergeordnete Belastung des gesamten Netzes, gedacht wird.

Genau diese Betrachtungsweise ist aus *Sicht des Betreibers* maßgeblich. Als Betreiber sind in diesem Fall die städtischen Verkehrsämter gemeint. In ihrem Fall ist der Nutzeranspruch dahin gehend, dass eine funktionierende Steuerung der VLSA innerhalb des urbanen Straßennetzes zur Minimierung von Überlastungsfällen beitragen soll. Ebenfalls soll im Falle einer starken Auslastung des Netzes (Spitzenstunde) der Verkehr gezielt und effizient abgefertigt werden. Eine individuelle Betrachtung von Verkehrsteilnehmern ist dafür in keiner Weise zielführend.

2.1 Verfahren von Lichtsignalsteuerung

Über das Steuerverfahren von Lichtsignalanlagen wird die Abfolge der Freigabezeiten sowie deren Dauer und zeitliche Wiederkehr gesteuert. Als Eingangsgrößen dienen verschiedene Kenngrößen, die in weiterer Folge für die Freigabezeitaufteilungen herangezogen werden. Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen unterscheiden sich in der Art, wie die Steuerung der Verkehrsströme realisiert wird und im Grad der Beeinflussbarkeit oder Veränderbarkeit der Signalprogrammelemente. Welches Steuerungsverfahren gewählt werden soll, ist in erster Linie nach vorzuziehenden Zielen zu entscheiden. (FGSV F. f., 2010).

Eine grundlegende Einteilung der Verfahren wird über die Steuerungsebenen erreicht. Dabei werden makroskopische und mikroskopische Steuerungsebenen unterschieden.

Die Verfahren der makroskopischen Steuerungsebene sind auf die generelle Abwicklung des Verkehrs im Netz oder in Netzteilen ausgerichtet. Bei der Signalprogrammauswahl wird zeitplan- oder verkehrsabhängig aus einer vorgehaltenen Anzahl von Programmen das Geeignetste ausgewählt und über einen längeren Zeitabschnitt geschaltet. Damit ist es möglich, sich gut an länger- und mittelfristige Änderungen der Verkehrsstärkeverhältnisse anzupassen.

Wenn die Belastungszustände im Tages- und Wochenverlauf prinzipiell wiederkehrend und somit zeitlich vorhersehbar sind, kann die zeitplanabhängige Signalprogrammauswahl eingesetzt werden. Die maßgebenden Auswahlkriterien sind vor allem Kalendertag und Uhrzeit (HBS, 2005).

Bei der verkehrsabhängigen Signalprogrammauswahl werden zur Charakterisierung der Verkehrssituationen und als Auswahlkriterien folgende Kenngrößen verwendet:

- gezählte Verkehrsstärke
- Belegungsgrade von VLSA nahen Detektoren
- Mittlere Geschwindigkeiten
- Mittlere Verkehrsdichte

Anders ausgedrückt werden bei makroskopischen Steuerverfahren Ziele auf Netz oder Teilnetzebene verfolgt, die auf mittel- oder langfristige Änderungen im innerstädtischen Verkehrsnetz reagieren (z. B. Zunahme der Verkehrsbelastung in einem Stadtgebiet).

Als makroskopische Verfahren gelten verkehrsabhängige und zeitplanabhängige Steuerungen von VLSA.

Bei mikroskopischen Steuerverfahren werden hingegen kurzfristige Änderungen des Verkehrszustandes in die Steuerung miteinbezogen. Die mikroskopischen Steuerverfahren werden im Abschnitt 2.1.2 noch näher beschrieben.

2.1.1 Planung eines Festzeitprogramms

„Unter einem Signalprogramm versteht man die hinsichtlich der Dauer und Zuordnung festgelegten Signalzeiten einer VLSA. Der Entwurf des Signalprogramms umfasst mehrere Schritte, die in gegenseitiger Abhängigkeit zu entwickeln sind“ (FGSV F. f., 2010, S. 12).

- 1.) Voruntersuchung
- 2.) Berechnung der Zwischenzeiten
- 3.) Phaseneinteilung und Phasenübergänge
- 4.) Berechnung der Umlauf- und Freigabezeiten

Ad 1.) Als Planungsgrundlage dienen **Voruntersuchungen** am Knotenpunkt, die einerseits die geometrischen Gegebenheiten klären und andererseits auf die verkehrstechnischen Kenngrößen für die VLSA abzielen. Als solche Größen sind in erster Linie Angaben über die Verkehrsbelastungen zum Planungszeitpunkt sowie für vorprognostizierte Zeiträume, i.d.R. 10 Jahre, zu erheben. Diese Verkehrsstärken müssen für mehrere maßgebende Verkehrssituationen im Tages- und Wochenverlauf aufgeteilt werden. So ist in der Regel die Kenntnis über die Verkehrsbelastungen in der Hauptverkehrszeit (morgens sowie nachmittags), in der Normalverkehrszeit (Tag) sowie die Schwachverkehrszeit in der Nacht für die weitere Signalprogrammerstellung maßgeblich. Mit den erhobenen Belastungen können dann in einem weiteren Schritt die nötigen Fahrstreifen abgeschätzt werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt der Voruntersuchung ist die Erhebung der Verkehrsströme und deren Verlauf. Damit können in Hinblick auf die Signalprogrammierung einzelne Verkehrsströme evt. zusammengefasst werden. Ebenfalls stellen sich unter dem Sicherheitsaspekt verträgliche, bedingt verträgliche sowie unverträgliche Verkehrsströme heraus, die in weiterer Folge zur Einteilung der Signalgruppen dienen. „Unter einer Signalgruppe versteht man einen oder mehrere Signalgeber, die bestimmte Verkehrsströme gemeinsam steuern und zu jeder Zeit das gleiche Signalbild (Lichtsignal) zeigen“ (FGSV F. f., 2010, S. 12).

Zu den Instrumenten der Voruntersuchungen zählen Verkehrszählungen, Verkehrsstromanalysen sowie Prognosen verkehrstechnisch relevanter Kenngrößen, die als Ergebnis die maßgeblichen Bemessungsverkehrsstärken liefern.

Die geometrischen Randbedingungen des lichtsignalgesteuerten Knotens werden in einem Signallageplan zusammengefasst. Darin sind alle wesentlichen Informationen des Knotens maßstäblich dargestellt (siehe Abbildung 4):

- Führung der Fahrbahnränder
- Lage der Haltelinien
- Lage der Stauräume
- Signalgeberstandorte und Bezeichnung
- Signalgebergruppen
- Fußgänger- und Radwegführung
- Längsneigungen
- Verkehrszeichen (Vorfahrtsgebote etc.)
- Zulässige Geschwindigkeit
- Bebauung und Grundstückszufahrten, Bäume, Masten, Schächte usw.
- Nordpfeil und Maßstab

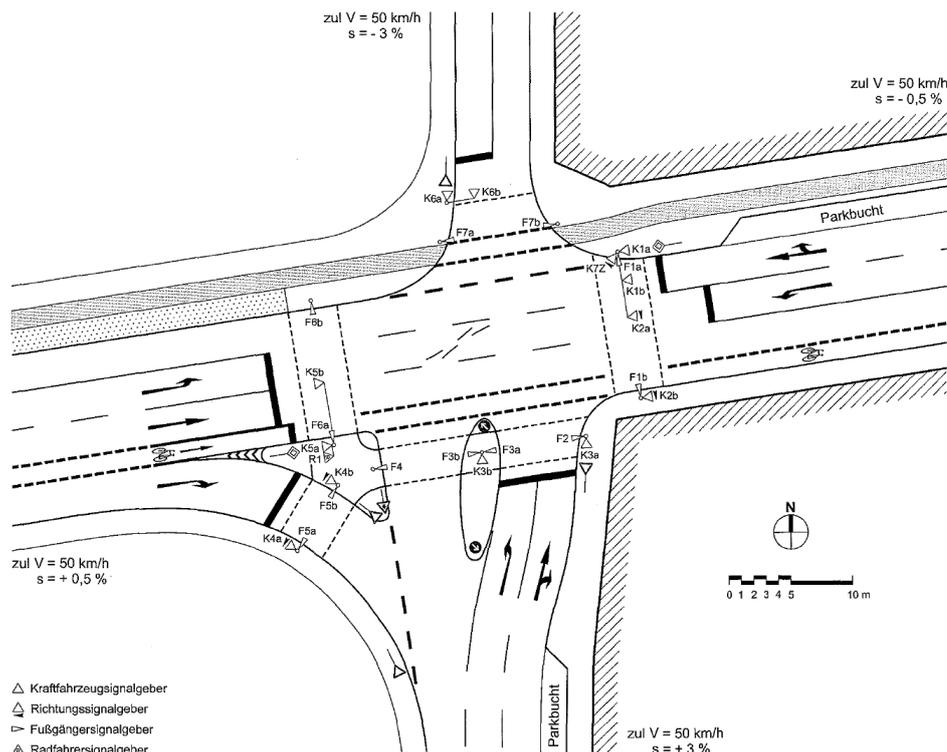


Abbildung 4: Beispiel eines vollständigen Signallageplans (FGSV F. f., 2010, S. 12)

Ist diese Voruntersuchung abgeschlossen und sind alle Daten vorhanden kann mit der eigentlichen Signalprogrammerstellung begonnen werden. Der erste Schritt dabei ist **ad 2.) die Berechnung der Zwischenzeiten**. Die Zwischenzeit ist die Zeitdauer vom Ende der Freigabezeit (Grün) eines Verkehrsstromes bis zum Beginn der Freigabezeit eines anderen, anschließend freigegebenen einmündenden oder kreuzenden Verkehrsstroms.

Die Zwischenzeiten zwischen allen Strömen, die nacheinander die einzelnen Konfliktflächen des Knotenpunktes passieren können, müssen aus Gründen der Verkehrssicherheit unbedingt

eingehalten werden. Die Zwischenzeit setzt sich aus der Überfahrzeit, der Räum- und der Einfahrzeit, zusammen und wird für jede Signalgebergruppe einzeln berechnet (Fellendorf, 2011, S. 47).

$$t_z = t_{\ddot{u}} + t_r + t_e \quad [s] \quad (1)$$

mit :

t_z ...Zwischenzeit

$t_{\ddot{u}}$...Überfahrzeit

t_r ...Räumzeit

t_e ...Einfahrzeit

„Zuvor muss noch geklärt werden, welche Konflikte am Knotenpunkt bestehen. Dazu sind alle Verkehrsströme einzeln zu betrachten und gemeinsam in einer Matrixdarstellung (sog. Verriegelungsmatrix), untereinander in Bezug zu bringen. Diese Matrix ist entscheidend für die Verkehrssicherheit, weil dadurch Konflikte von Verkehrsströmen geregelt werden“ (Brilon W., 1995, S. 132).

Der nächste Planungsschritt besteht darin, die **ad 3.) Phaseneinteilung und Phasenübergänge** zu bestimmen. Als Phase wird derjenige Teil des Signalprogramms bezeichnet, während dessen ein bestimmter Zustand unverändert bleibt. Als Phase bezeichnet man beispielsweise die gleichzeitige Signalisierung für einen oder mehrere bestimmte Verkehrsströme (z. B. Phase für Linksabbieger oder Phase für geradeausfahrende Ströme. Im Wesentlichen geht es in diesem Arbeitsschritt um die Festlegung der Reihenfolge der einzelnen Phasen.

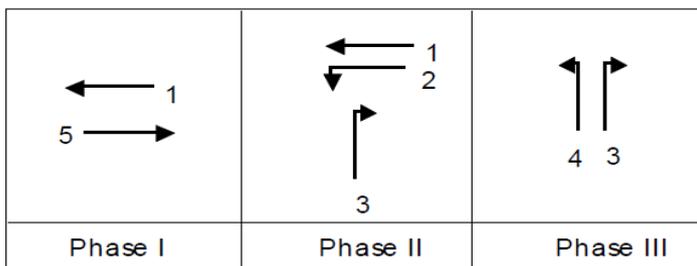


Abbildung 5: Beispiel für eine Phaseneinteilung (Fellendorf, 2011, S. 52)

Durch die zuvor ermittelten Zwischenzeiten entsteht der Phasenübergang, der zumindest die für den Phasenwechsel erforderliche Zwischenzeit enthält. Weil dieser Phasenübergang bei jedem Phasenwechsel auftritt, ist in der Regel darauf zu achten, ein Signalprogramm mit einer geringen Phasenzahl zu entwickeln, dies gilt insbesondere bei hoher Verkehrsbelastung, bei der ein Maximum an Kapazität erforderlich ist.

Die Reihenfolge der jeweiligen Phasen ist entscheidend für die Qualität und Funktionsfähigkeit der VLSA. In einem Festzeitprogramm werden die Phasen zyklisch abgearbeitet. Führt man aber die Phasenfolgen als veränderlich und verkehrabhängig aus so sind gezielte Steuerungen von Verkehrsströmen möglich. Darunter versteht man Priorisierungen des ÖV oder verkehrabhängige Grüne Wellen.

Als Ergebnis der Phaseneinteilung erhält man ein eine übersichtliche Darstellung der einzelnen Phasen und deren Abfolge, der sog. Phasenfolgeplan.

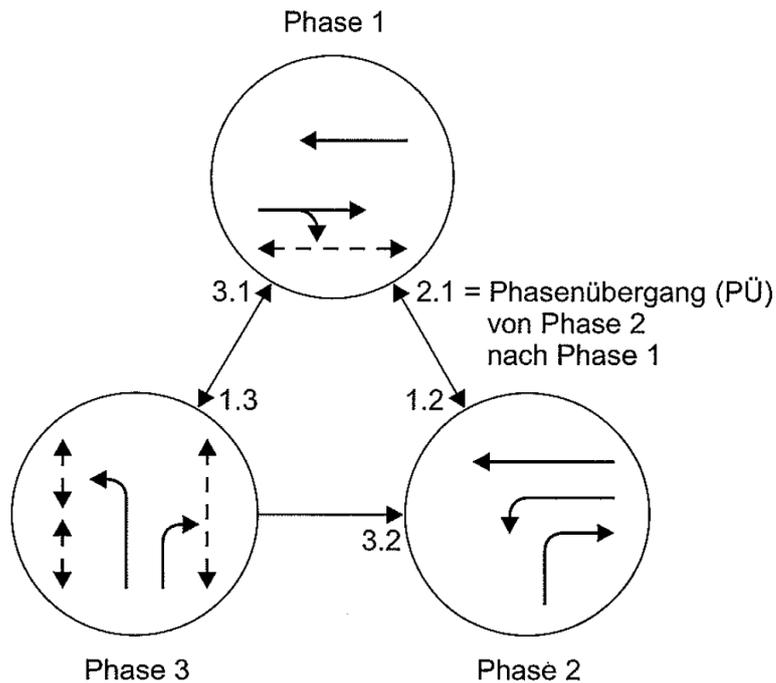


Abbildung 6: Beispiel für einen einfachen Phasenfolgeplan (FGSV F. f., 2010, S. 20)

Sind die Phasen und Phasenfolgen bestimmt worden, gilt es nun das, Signalprogramm mit zeitlichen Attributen zu versehen, so dass in weiterer Folge eine Zuteilung der Freigabezeiten auf die einzelnen Signalgruppen erfolgen kann.

Eine vollständige Abfolge der Phasen und der dazwischen liegenden Phasenübergänge ergibt die Umlaufzeit des Signalprogramms. Die dafür benötigte Zeitdauer wird anhand der erforderlichen Freigabezeiten der einzelnen Phasen sowie der Zwischenzeiten ermittelt.

Ein Grundsatz der bei der Berechnung der **ad 4.) Umlauf- und Freigabezeiten** ist jener, dass ein lichtsignalgesteuerter Knotenpunkte eine ausreichende Kapazität besitzt, wenn die während der Umlaufzeit zufließenden Fahrzeuge der maßgeblichen Verkehrsströme während ihrer Freigabezeiten abfließen können (Vgl. Vogt, 2005).

Dies bedeutet, dass es bei ausreichenden Freigabezeiten zu keinem Rückstau kommt. Ein Rückstau liegt dann vor, wenn nicht alle wartenden Fahrzeuge innerhalb der Freigabezeit (Grün) abfließen können. Als Grundlage für die Berechnung der Freigabe- und Umlaufzeiten dient die Verkehrsstärke des jeweiligen Zuflusses. Demnach ist es auch möglich, die Freigabezeiten als variable Größe in das Steuerprogramm zu integrieren und auf veränderliche Verkehrsstärken direkt über den Freigabezeitanteil zu reagieren. Diese Idee bildet den Grundsatz der verkehrsabhängigen Steuerverfahren, die auf den folgenden Seiten weiter erläutert werden. Die Ergebnisse der Umlauf- und Freigabezeitberechnung werden danach in einem sog. Signalzeitplan dargestellt, in dem alle Signalgruppen und deren Schaltzeiten übersichtlich dargestellt sind.

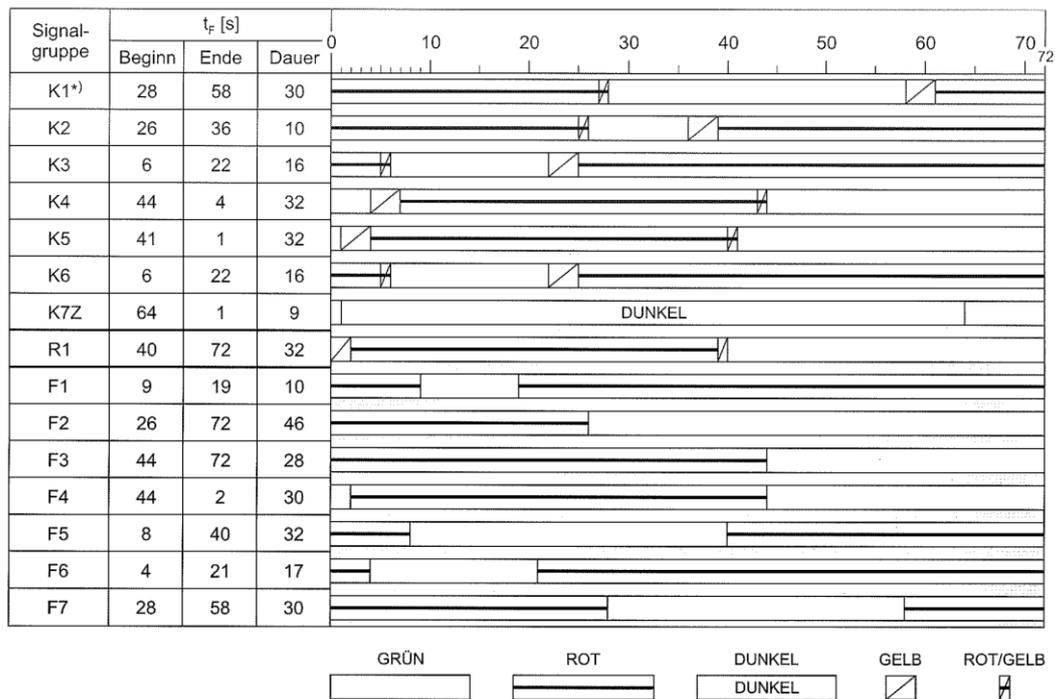


Abbildung 7: Beispiel für einen Signalzeitplan (FGSV F. f., 2010, S. 29)

2.1.2 Übersicht über Steuerverfahren von VLSA

„In der Regel werden von der makroskopischen Steuerungsebene aus die Verfahren der mikroskopischen Steuerungsebene aktiviert. In dieser Steuerungsebene werden Änderungen des jeweiligen Verkehrszustands am Knotenpunkt kurzfristig berücksichtigt, sofern nicht Signalprogramme mit festen Signalzeiten verwendet werden“ (FGSV F. f.-u., 2005, S. 6-7).

Dabei werden kurzfristige Änderung, d. h. im Sekundenbereich, der Verkehrsbelastung berücksichtigt. Innerhalb der mikroskopischen Steuerverfahren können zwei weitere Untergruppen eingeteilt werden:

- Festzeitsteuerungen
- Verkehrsabhängige Steuerungen

Bei Steuerungen mittels *Festzeiten* bleiben die Freigabezeitaufteilung und die Umlaufzeit unverändert. Das bedeutet, dass sich die Lichtsignalanlage in einem zyklischen Betrieb befindet, bei dem sich die Freigabezeiten der einzelnen Verkehrsströme zeitlich konstant wiederholen. I.d.R. sind Festzeitprogramme verkehrsunabhängig.

Im Gegensatz zu Festzeitsteuerungen reagieren *verkehrsabhängige Steuerungen* direkt auf das vorherrschende Verkehrsgeschehen im Einflussbereich der VLSA. Das heißt, die VLSA reagiert auf Änderungen im Zu- oder Abflussbereich des Knotens. Die Steuerlogik ist in der Lage Freigabezeiten und Umlaufzeiten gezielt an die Verkehrssituation anzupassen und zu verändern. Dazu gibt es folgende wesentliche Verfahren:

- Freigabezeitanpassung
- Phasentausch
- Bedarfsanforderung
- Signalprogrammbildung

Steuerungsverfahren		veränderbare Elemente des Signalprogramms							
Oberbegriff	Hauptmerkmal der Veränderbarkeit des Signalprogramms	Umlaufzeit festgelegt		Phasenfolge festgelegt		Phasenanzahl festgelegt		Freigabezeiten festgelegt	
		ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
Festzeitsignalprogramm	keine Veränderbarkeit	X		X		X		X	
Signalprogramm-anpassung (teil-verkehrsabhängig)	Freigabezeit-anpassung	X		X		X			X
	Phasentausch	X			X	X		X	
	Bedarfsphasen-anforderung	X		X			X		X
Signalprogramm-bildung (voll-verkehrsabhängig)	freie Veränderbarkeit		X		X		X		X

Tabelle 1: Vereinfachte Übersicht der Steuerverfahren von VLSA (Bossert, 2007, S. 4.5-37)

Bevor die einzelnen Steuerverfahren im Detail erläutert werden, ist es nötig sich mit den Grundlagen der Signalprogrammierung auseinanderzusetzen. Als Basis für jedes Steuerverfahren dient eine Signalprogrammierung anhand einer Festzeitsteuerung. Von diesem Verfahren ausgehend können weitere verkehrsabhängige Steuerverfahren entwickelt werden.



Abbildung 8: Übersicht über Steuerverfahren von VLSA

1.) Festzeitsteuerung am Einzelknoten

Die Festzeitsteuerung bildet das älteste und einfachste Steuerverfahren für VLSA. Bei der Festzeitsteuerung wird ein vom Verkehrsplaner vorab definiertes Signalprogramm mit festen Freigabezeiten abgearbeitet, d. h. innerhalb einer vorgegebenen zyklischen Umlaufzeit werden alle Signalgruppen wenigstens einmal mit vorgegebener Dauer freigegeben. Alle Elemente des Signalzeitenplans wiederholen sich periodisch in gleicher Weise in jedem Umlauf und unabhängig von äußeren Einflüssen. Für verschiedene Tageszeiten werden oft eigene Signalpläne ausgearbeitet, um den unterschiedlichen Verkehrsbelastungen gerecht zu werden. Typischerweise werden spezifische Signalpläne z. B. für den morgendlichen und abendlichen Spitzenverkehr, für normale Verkehrsverhältnisse (tagsüber) und schwache Belastungen (nachts) entworfen. Eine einfache verkehrsabhängige Variante der Festzeitsteuerung ergibt sich, wenn die Betriebszeiten der einzelnen Festzeitprogramme im Tagesverlauf nicht nach einem zeitlich festgelegten Plan erfolgt, sondern das aktuell laufende Programm mit Hilfe von Messungen des Verkehrsablaufs ausgewählt wird. Festzeitsteuerungen sind noch heute die am meisten verbreitete Methode der VLSA -Steuerung. Einfachheit, Robustheit und preiswerte Realisierung sind die Gründe hierfür. Weiterhin ist eine Vielzahl von Werkzeugen für die Planung von Festzeitprogrammen verfügbar. Die Nachteile sind jedoch auch offensichtlich: Aufgrund des nicht flexiblen Ablaufs entstehen bei veränderlichen Belastungen,

vermeidbare Verlustzeiten an den VLSA, insbesondere ist eine effektive ÖV-Priorisierung auf diese Weise nicht machbar (Vgl. Mertz, 2000).

2.) Festzeitsteuerung mit Koordinierung

„Bei einer Koordinierung werden Freigabezeiten hintereinanderliegender Signalisierungsquerschnitte durch geeignete Zeitversätze, aufeinander abgestimmt. Dadurch soll erreicht werden, dass die Mehrzahl der betroffenen Verkehrsteilnehmer eine Folge von Lichtsignalanlagen ohne Halt passieren kann. Koordinierungen sind an einzelnen oder eng benachbarten Lichtsignalanlagen für alle Verkehrsteilnehmergruppen, das heißt für Kraftfahrzeuge, für ÖPNV-Fahrzeuge, für Radfahrer und für Fußgänger relevant. In Straßenzügen oder in Verkehrsnetzen ist die Koordinierung insbesondere von Bedeutung für den Kraftfahrzeugverkehr und den ÖPNV, für den Radverkehr aufgrund der größeren Geschwindigkeitsverteilung nur sehr bedingt“ (FGSV F. f., 2010, S. 43).

Durch diese Art der Steuerung werden nicht nur die Reisezeiten und Halte verringert, es kommt auch zu einer Bündelung des Verkehrsflusses. Eine funktionierende koordinierte Lichtsignalsteuerung wird auch als Grüne Welle wahrgenommen.

Eine verkehrstechnische Grundvoraussetzung ist, die einheitliche Umlaufzeiten der koordinierten VLSA. Wird eine Festzeitsteuerung mit einer Grünen Welle versehen, werden die Freigabezeiten zeitlich gestaffelt, um somit ein sogenanntes Grünband zu definieren, in welchem sich Fahrzeuge ungehindert durch den Streckenzug bewegen. Der zeitliche Versatz der Freigabezeiten, wird durch die gefahrenen Geschwindigkeiten auf den Strecken zwischen den VLSA bestimmt und wird als Progressionsgeschwindigkeit bezeichnet. Zwischen koordinierten VLSA bildet sich ein Grünband in dem ein Fahrzeugpulk koordiniert entlang des Streckenzuges bewegt wird und an jeder VLSA ein Freigabezeichen bekommt (Grüne Welle).

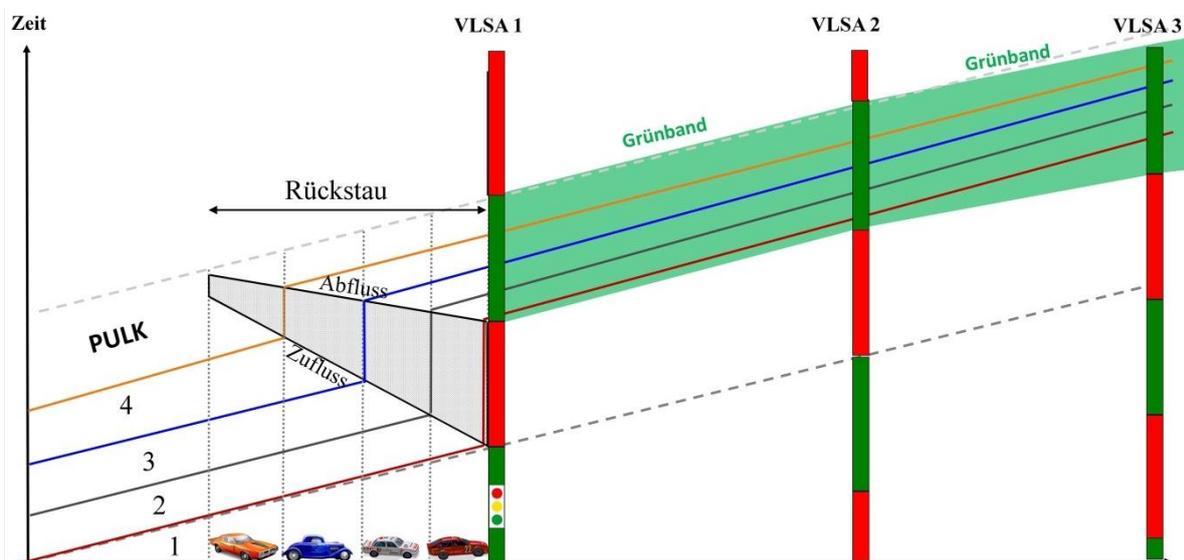


Abbildung 9: Koordinierung eines Fahrzeugpulses

3.) Verkehrsabhängige Steuerung am Einzelknoten und Straßenzügen

Als verkehrsabhängige Lichtsignalsteuerung wird ein Regelkreis verstanden bei dem sich die VLSA, entsprechend verkehrlicher Kenngrößen, an die jeweilige Situation anpasst. Dabei bedarf es einer Steuerlogik die es ermöglicht durch Phasenwechsel, Veränderung der Phasenfolge, Freigabezeiten oder Umlaufzeiten, ein Gesamtoptimum und damit bestmögliche Anpassung, an die verkehrliche Ist-Situation zu gewährleisten. Grundvoraussetzung für die Funktionsweise dieses Regelkreises ist eine gute Abbildung der aktuellen Verkehrssituation durch geeignete Detektoren. Dafür werden in der Regel Induktionsschleifen, Anforderungsdetektoren, Zeit- bzw. Weglückendetektoren verwendet.

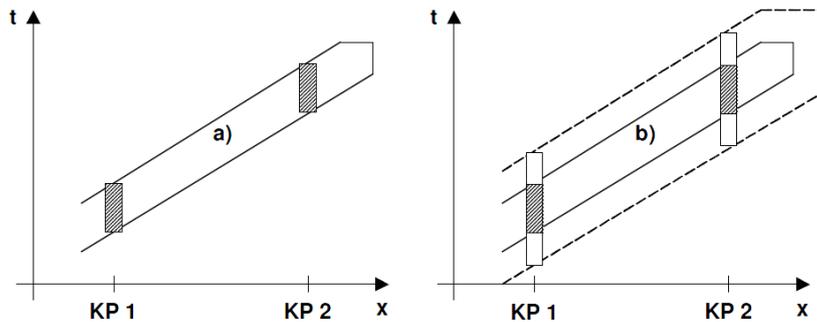


Abbildung 10: Schematischer Vergleich der Grünbänder einer koordinierten a) Festzeitsteuerung und einer b) verkehrsabhängigen Steuerung (Bosserhoff, 2007, S. 4.5-43)

Bei der verkehrsabhängigen Steuerung am Einzelknoten, gibt es keine Koordinierung mit benachbarten VLSA. Dieses Steuerverfahren wird meist an peripheren Knotenpunkten außerorts verwendet.

Im Gegensatz dazu stehen verkehrsabhängige Steuerungen von Streckenzügen. Damit wird versucht, nach dem Prinzip der Grünen Wellen, halbefreie ungehinderte Überfahrten des gesamten Streckenzuges zu erreichen. Das Grundprinzip stützt sich auf die zuvor beschriebene koordinierte Steuerung eines Streckenzuges, wobei nicht statische Festzeitsteuerungen verwendet werden, sondern variable verkehrsabhängige. Damit können festgelegte Grünbänder der koordinierten Festzeitsteuerung, verkehrsabhängig gedehnt oder gestaucht werden (siehe Abbildung 10). Diese Art der Koordinierung wird auch als pulsierende oder atmende Grüne Welle bezeichnet.

4.) Adaptive Netzsteuerung

Eine adaptive Netzsteuerung verwendet nicht nur Koordinierungsmaßnahmen von aufeinanderfolgenden VLSA, zielt darauf ab, ganze Netze oder Teilnetze zu optimieren. Grundlage dafür ist eine Vernetzung von einzelnen verkehrsabhängigen VLSA im Steuergebiet. Diese werden durch eine gemeinsame, übergeordnete Steuerung betrieben, bei der die lokale Verkehrsabhängigkeit bestehen bleibt bzw. nur geringfügig verändert wird.

Dazu ist ein ständiger Datenaustausch zwischen dem übergeordneten Steuerorgan und den Einzelanlagen nötig. Das Steuerorgan (zentraler Verkehrsrechner) muss darüber hinaus über eine Steuerlogik verfügen, die eine netzweite Betrachtung zulässt. Damit ist es möglich auf Bedarfsänderungen im Netz sofort zu reagieren (Vgl. Krimmling, 2007)

2.2 Kenngrößen von VLSA und deren Erfassung

Der Betrieb sowie die Dimensionierung von lichtsignalgesteuerten Knoten und Straßenzügen bedarf einer Reihe an Kenngrößen. Einerseits kann es sich dabei um verkehrliche, also direkt aus der verkehrsbedingten Wirkung erhobenen, handeln oder andererseits auch indirekte Kenngrößen wie Lärm- und Schadstoffemissionen. Viele indirekte Kenngrößen lassen sich anhand von verkehrlichen Größen ableiten.

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Kenngrößen von VLSA und deren Erfassungsmöglichkeiten beschrieben. Die Aussagekraft der Kenngrößen hinsichtlich ihrer Anwendung zu Qualitätsbestimmung wird ebenfalls kurz beleuchtet.

Diese Arbeit beschränkt sich im Wesentlichen auf den motorisierten Individualverkehr (mIV) und geht deshalb auf verkehrliche Kenngrößen des ÖV und nmIV, nur am Rande ein.

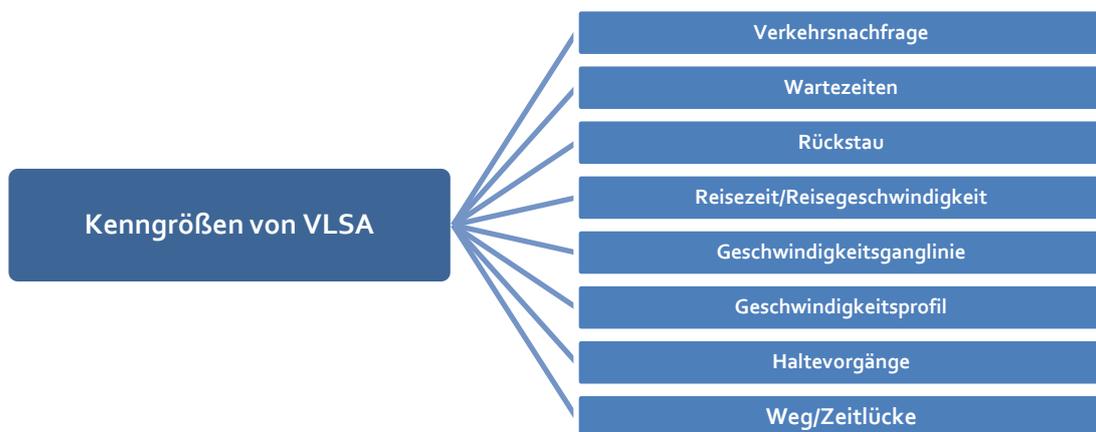


Abbildung 11: Beurteilung des Verkehrsablaufs an signalisierten Knotenpunkten

Verkehrsnachfrage:

Eine der wichtigsten verkehrlichen Kenngrößen für den Betrieb einer VLSA bildet die Verkehrsnachfrage. Darunter ist die Verkehrsstärke, also die Anzahl der Fahrzeuge bezogen auf eine Zeitspanne, zu verstehen. In der Regel wird die Verkehrsstärke in Fahrzeuge pro Stunde angegeben. Zur Erfassung werden vor allem Induktionsschleifen an den zufließenden, Fahrstreifen eingesetzt. Dabei handelt es sich in den meisten Fällen um einfache Schleifen die im Gegensatz zu Doppelinduktionsschleifen, keine Messung der Geschwindigkeit erlauben, was aber für das Steuerprogramm der VLSA nicht relevant ist. Für die Steuerlogik der VLSA umso mehr von Bedeutung ist die Positionierung der Induktionsschleife. Eine weitere Erfassungsmöglichkeit bietet die manuelle Querschnittszählung. Dabei wird durch menschliche Zähler die Verkehrsstärke sowie die Fahrzeugklassen und Abbiegerelationen erhoben.

Wartezeit:

Die Wartezeit an einem Knotenpunkt ist als zeitlicher Mehraufwand definiert, der an einem signalisierten Knotenpunkt gegenüber einer behinderungsfreien Durchfahrt, entsteht. Sie setzt sich aus dem Zeitverlust durch Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen sowie durch die Haltezeit zusammen.

$$t_W = t_B + t_H + t_A \quad [s] \quad (2)$$

mit:

t_W ...Wartezeit

t_B ...Bremszeit

t_H ...Haltezeit

t_A ...Anfahrtszeit

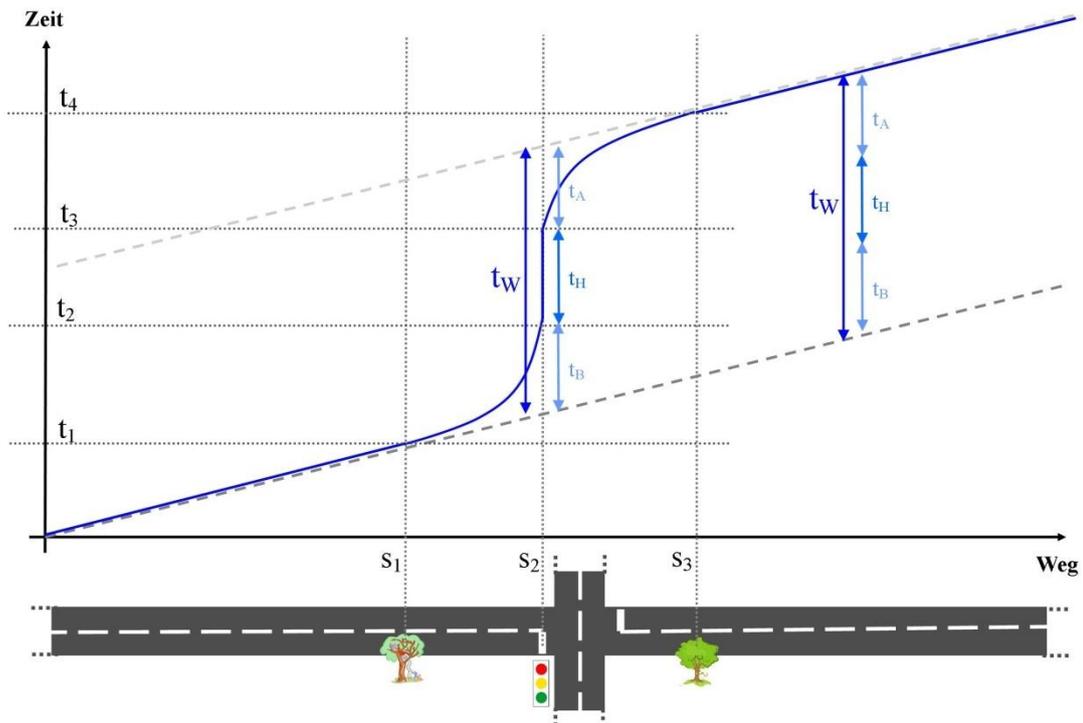


Abbildung 12: Grafische Darstellung der Wartezeit an einer VLSA

In der Literatur (z. B.. RILSA, HBS) ist die Wartezeit auch oft als Verlustzeit angeführt. Durch Minimierung der Wartezeit kommt es zu Zeitersparnissen und in weiterer Folge zu erhöhter mittlerer Reisegeschwindigkeit. Die Verlustzeit an einer VLSA wird auch als Qualitätskenngröße von VLSA (HBS, HCM, RILSA) nicht nur für den IV, sondern auch für ÖV und Fußgänger verwendet. Dabei ist zu beachten, dass die Wartezeit eine stochastische zufällige Größe ist und demnach nur als Mittelwert zu verwenden ist. Bei koordinierten VLSA ist die mittlere Wartezeit alleine aufgrund der Pulkdispersion nur bedingt als Qualitätskenngröße geeignet.

Die Erfassung der mittleren Wartezeit ist direkt über Auswertung von Messfahrten (z. B: GPS-Trajektorien) möglich. Verlustzeiten für Fußgänger sind indirekt über die Kenntnis der Umlaufzeit und der Sperrzeit (Rotphase) unter der Voraussetzung einer Festzeitsteuerung berechenbar (siehe HBS 2005).

Wartezeitmodelle an signalisierten Knotenpunkten:

Der Verkehrsablauf an einem signalisierten Kreuzungspunkt kann durch drei verkehrstechnische Gesetzmäßigkeiten unterteilt werden:

- Zufluss zum Knotenpunkt
- Überfahrt des Knotens (Konfliktfläche)
- Abfluss

Der Zufluss ist in erster Linie durch die Verteilung der ankommenden Fahrzeuge bestimmt (Ankunftsverteilung). Darunter versteht man die Anzahl der zufließenden Fahrzeuge sowie deren zeitliche Abstände. In der Verkehrstechnik wird deshalb näherungsweise eine Poisson-Verteilung verwendet, mit der die Wahrscheinlichkeitsverteilung ankommender Fahrzeuge während eines Zeitbereiches , abgeschätzt wird (Vgl. Fellendorf, 2011).

Die Überfahrt des Knotens sowie das Räumen der Konfliktflächen sind durch das Fahrverhalten beim Phasenwechsel bestimmt. Ausschlaggebend dabei sind die in der Signalsteuerung notwendigen Zwischenzeiten während des Phasenwechsels (siehe Abschnitt 2.1.1).

Der Abfluss ist bestimmt durch die Anzahl der Fahrzeuge die während der Freigabezeit (Grünphase) von der Zufahrt des Knotens, abfließen können. Dabei wird in der Verkehrstechnik ein linearer Zusammenhang verwendet (siehe Schnabel, 2010, Kapitel 2.):

$$n = \frac{t_f - t_{af}}{t_c} \tag{3}$$

mit :

nAnzahl der abfließenden Fahrzeuge [-]

t_fFreigabezeit [sek]

t_a ...Anfahrtszeitverluste [sek]

t_c ...kürzeste Zeitlücke [sek]

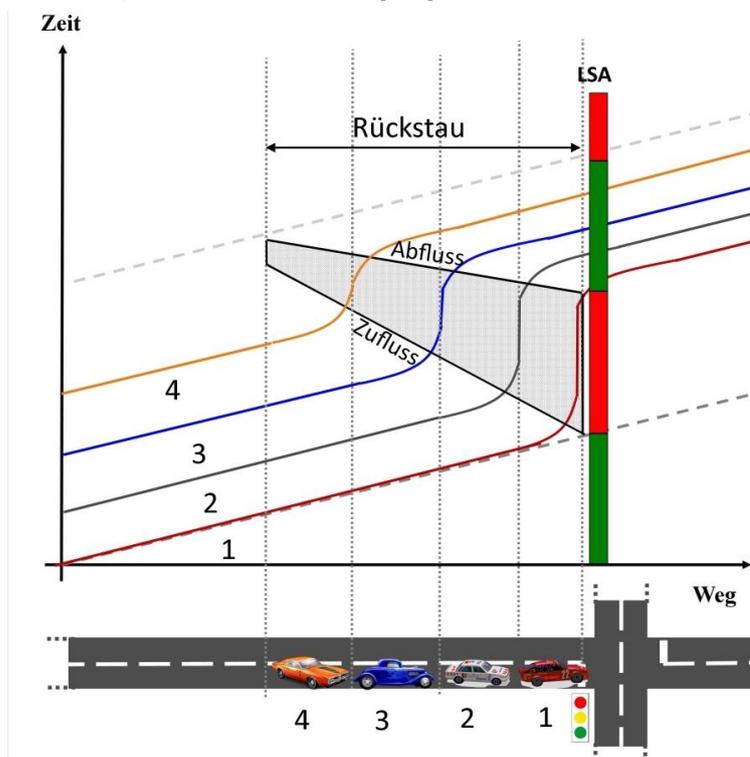


Abbildung 13: Trajektorien einer Fahrzeugkolonne an einem signalisierten Knoten

Abbildung 13 zeigt schematisch den Verkehrsablauf an einer signalisierten VLSA. Es sind vier Fahrzeuge samt Trajektorien, sowie das Schaltbild der LSA, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Fahrzeug 1 (Rot) die längste und das letzte Fahrzeug 4 (Orange) die kürzeste Wartezeit hinnehmen muss. Weiters ist ersichtlich, dass alle Fahrzeuge während der Grünphase den Knotenpunkt überfahren, und die Zeitlücken der abfließenden Trajektorien deutlich enger sind, als die zufällig zufließenden. Der Rückstau reicht bis zur Hinterkante des letzten Fahrzeuges.

Aus diesen Überlegungen und verkehrstechnischen Gesetzmäßigkeiten lassen sich in weiterer Folge Modelle entwickeln, nach denen die mittlere Wartezeit eines Fahrzeuges abgeschätzt werden kann. Diese Größe ist maßgebend für die Bemessung der Freigabe- und Umlaufzeiten. Daraus lassen sich in weiterer Folge auch mittlere Rückstaulängen ableiten, die für die Dimensionierung von Stauräumen maßgeblich sind. In der Abbildung 14 wird anstelle der Wegachse, der Rückstau in Fahrzeugeinheiten aufgetragen. In der oberen Grafik wird Rückstau der sich während der Sperrzeit (Rotphase) bildet, in der darauffolgenden Grünphase, vollständig abgebaut. In der unteren Darstellung ist zu sehen, dass der zufließende Fahrzeugstrom nicht mehr innerhalb einer Grünphase abgebaut werden kann (T1). Bleibt der Zufluss und die Freigabezeiten konstant, setzt sich der wachsende Rückstau auch nach dem zweiten Umlauf (T2) fort. Es bildet sich eine Warteschlange bzw. sukzessiv anwachsender Rückstau.

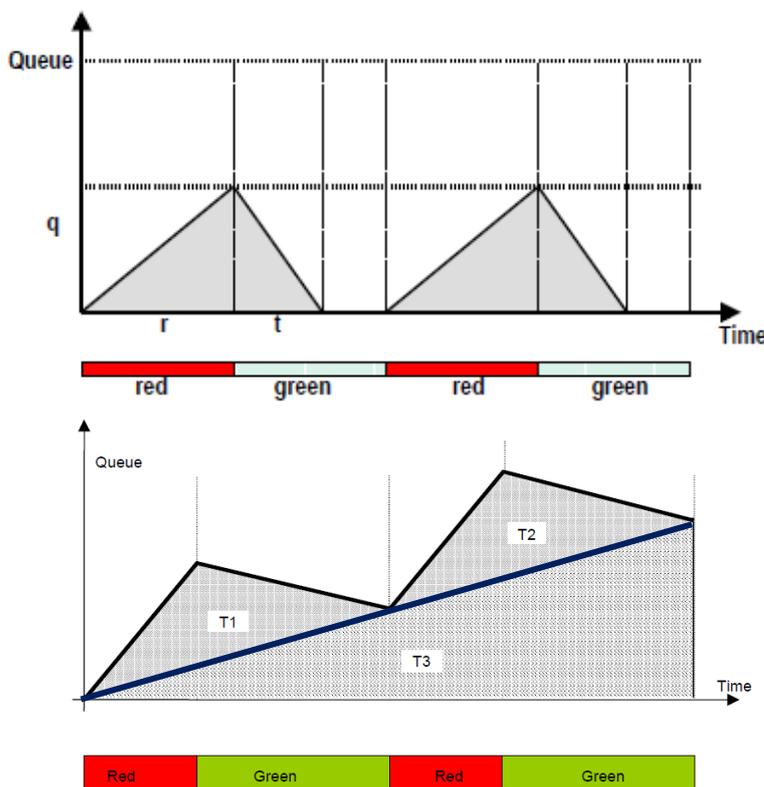


Abbildung 14: Grafisch Darstellung der Wartezeitmodelle (Kang, 2000, S. 10/12)

Die dabei entstehenden Wartezeiten wurden durch Webster schon 1958 in empirische Formeln wiedergegeben. In seinen Untersuchungen setzt sich die mittlere Wartezeit w , eines Fahrzeuges aus zwei Komponenten zusammen.

$$w = w_I + w_{II} \quad [s] \quad (4)$$

w_I ...uniform delay

w_{II} ...incremental (random) delay

w_I ergibt sich aufgrund eines einfachen Wartezeitmodells und wird auch als Grundwartezeit oder uniform delay, bezeichnet. Das Wartezeitmodell setzt voraus, dass am Beginn der Sperrzeit keine Fahrzeuge mehr aus dem vorigen Umlauf gestaut sind (siehe Abbildung 14, oben). Alle Fahrzeuge konnten während der Grünphase abfließen. Der Zufluss zur VLSA ist konstant, das bedeutet die ankommenden Fahrzeuge fließen mit einem konstanten zeitlichen Abstand t_m , zu.

$$w_I = \frac{t_u (1-f)}{2 \left(1 - \frac{q}{q_s}\right)} \quad [s] \quad (5)$$

t_u ...Umlaufzeit [s]

t_f ...Freigabezeit [s]

fFreigabezeitanteil $f=t_f/t_u$ [-]

q ...Verkehrsmenge [Kfz/h]

q_s ...Sättigungsverkehrsstärke [Kfz/h] $q_s = \frac{3600}{t_c}$

t_c ...kürzeste Zeitlücke aufeinanderfolgender Fzg [s]

In der Literatur gibt es für die Grundwartezeit einige verschiedene Schreibweisen. Verwendet wird sie heute noch u.A. in den Standardwerken HCM (2000) sowie HBS (2001).

Der zweite Teil w_{II} , berechnet die Wartezeit die aus einem möglichen Reststau (siehe Abbildung 14, unten) und nichtlinearem Zufluss hervorgerufen wird. Dieser Teil wird auch als Reststauwartezeit oder inrimental bzw. random delay, bezeichnet.

$$w_{II} = \frac{g^2}{2q_s(1-g)} - 0,65 * \sqrt{\frac{t_u}{q_s^2}} * g^{2+5f} \quad [s] \quad (6)$$

$$g = \frac{q}{C} = \frac{q}{f * q_s}$$

g ...Sättigungsgrad [-]

Der zweite Term der Reststauwartezeit w_{II} stellt eine Kalibrierungsmöglichkeit zur Anpassung an die tatsächlichen Verhältnisse dar.

Neben den Ergebnissen von Webster hat es, Weiterentwicklungen und Verbesserungen z.B. durch Miller gegeben. Der Grundgedanke der Aufteilung in Grundwartezeit und Rückstauwartezeit ist jedoch der selbe geblieben.

Rückstau :

An Lichtsignalanlagen kommt es naturgemäß während der Sperrzeiten (Rotphasen) zu Staubildungen hinter der jeweiligen Haltelinie. Die Länge des Rückstaus ist dabei maßgeblich abhängig von der Sperrzeit, dem zufließenden Verkehrsstrom und der Aufstellflächen (Fahrstreifen). Bis zu einem Grenzzufluss ist bei guter Steuerung der VLSA ein vollständiger Abbau des Rückstaus der Idealfall. Da Rückstauf Flächen in der Regel begrenzt vorhanden sind, gilt die Länge der Warteschlange oft als maßgebende Bemessungsgröße von VLSA -Steuerungen. Kritische Staubereiche sind beispielsweise der Anfang eines Abbiegestreifens der unter Umständen den geradeausfahrenden Fahrzeugstrom behindert. Als Qualitätskriterium gilt oftmals der Teil des Rückstaus der während eines vollständigen Umlaufes samt Freigabezeit nicht abfließen kann. Im zyklischen Betrieb der VLSA kommt es dadurch bei gleichbleibendem Zufluss zu einer stetigen Vergrößerung der Warteschlange weil, nach jedem Umlauf ein Rückstau bleibt, der sich aufsummiert. Dies kann in weiterer Folge stromaufwärts zu Behinderungen des Querverkehrs sowie zu Beeinflussungen stromaufwärtiger VLSA führen.

Je länger der Rückstau ist, desto länger werden auch die Wartezeiten, anhand derer man einfach die Qualität ableiten kann (siehe Kapitel 2.3).

Sich bildende Warteschlangen werden aber auch direkt als Eingangsparameter von VLSA - Steuerungen verwendet. Dabei wird über messtechnische Einrichtungen ein Rückstau erkannt und diese Information wird an die Steuerlogik weitergegeben, die in weiterer Folge darauf reagieren kann und die Freigabezeiten verlängert, um den Rückstau abzubauen. Dafür können z.B. Induktionsschleifen oder Infrarotdetektoren eingesetzt werden. Eine statische Aufnahme der mittleren Rückstaulänge ist auch über händische Zählung möglich.

Reisezeit / Reisegeschwindigkeit :

In Spangler (2009), wird die Reisezeit als wesentlich Nutzeranforderung genannt, weil das Ziel des Fahrzeuglenkers in der Regel in möglichst kurzer Zeit erreicht werden soll. Um streckenbezogene Vergleiche verschiedener Routen gewährleisten zu können, wird die Reisezeit in den entfernungsbezogenen Kehrwert Reisegeschwindigkeit umgerechnet.

„Die Reisegeschwindigkeit wird als wichtigste Größe der subjektiv wahrgenommenen Verkehrsqualität beschrieben. Dies wurde durch Befragungen und statistischen Analysemethoden erhoben. Begründet wird der hohe Einfluss der Reisegeschwindigkeit am subjektiven Qualitätsempfinden durch die verstärkte Wahrnehmung der Reisegeschwindigkeit als Qualitätsurteil. Am wichtigsten scheint es den Verkehrsteilnehmern zu sein, schnell und pünktlich am Ziel anzukommen“ (Mailer, 2008, S.273).

Schon in den 1970er Jahren wurde in Untersuchungen nachgewiesen, dass sich eine Verbesserung der Lichtsignalsteuerung positiv auf den Verkehrsablauf auswirkt und dabei eine Erhöhung der Reisegeschwindigkeit und gleichzeitige Verminderung der Wartezeiten/Verlustzeiten erreicht wird (Vgl. Vogt, 2005). Deshalb wird sie oft als maßgebliche verkehrliche Kenngröße zur Qualitätsbeurteilung herangezogen.

Gemessen werden kann die Reisezeit bzw. Reisegeschwindigkeit nur beschränkt über herkömmliche lokale Detektorschleifen, aufgrund ihrer räumlichen Aussagekraft. Sie kann entweder über manuelle Querschnittszählungen an Start und Ziel einer Strecke, über Kennzeichenerfassungssysteme und deren Auswertungen sowie durch moderne Induktionsschleifen mit Musterwiedererkennung oder Messfahrten erhoben werden. Je nach verwendeter Methode wird dabei eine Stichprobe entnommen und über statistische Verfahren auf einen Mittelwert der Reisegeschwindigkeit geschlossen (z. B. Reisezeiterhebungen durch Messfahrten). Bei Messerhebungen mit hoher Einzelerfassungsrate wird in der Regel über Mittelwertbildung gearbeitet (z. B. Reisezeitmessung mittels Kennzeichenerfassung). Im Abschnitt 4.3. wird der Begriff der Stichprobe sowie die Abschätzung der erforderlichen Messfahrten.

Weg- und Zeitlücke:

Für eine Steuerungsmethoden an einer VLSA, wird oft die Weg- bzw. Zeitlücke zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen als Kenngröße verwendet. „Bei der Bemessung mit Zeitlücken werden über einen Detektor in der Knotenpunktzufahrt die zeitlichen Nettoabstände aufeinanderfolgender Fahrzeuge eines Fahrzeugstroms gemessen. Die Freigabezeit wird so lange verlängert, bis der zeitliche Abstand zwischen zwei Fahrzeugen mindestens so groß ist wie ein vorgegebener Zeitlückenwert oder bis die längste festgelegte Freigabezeit oder der späteste Verlängerungszeitpunkt im Umlauf, erreicht wird“ (FGSV F. f., 2010, S. 39). Als übliche Brutto-Zeitlückenabstände werden 2 bis 5 sek. verwendet.

Geschwindigkeitsganglinie und Geschwindigkeitsprofil :

Durch Aufzeichnungen der zurückgelegten Strecke und der dabei verstrichenen Zeit, während einer Messfahrt erhält man eine Fahrlinie oder Trajektorie. Damit ist der Bewegungsvorgang des Fahrzeuges vollständig erklärt.

In der Abbildung 2-11 sind die Zusammenhänge zwischen Weg-Zeit und Geschwindigkeit dargestellt. Im Weg-Zeit Diagramm ist die Geschwindigkeitsinformation als zeitliche erste Ableitung des Weges und folglich als Steigung der Fahrtlinie (Trajektorie) enthalten. Auf Grundlage der Trajektorie kann das Geschwindigkeitsprofil $v(x)$ oder die Geschwindigkeitsganglinie $v(t)$ über die kinematische Grundbeziehung $v(t) = ds / dt$, ermittelt werden.

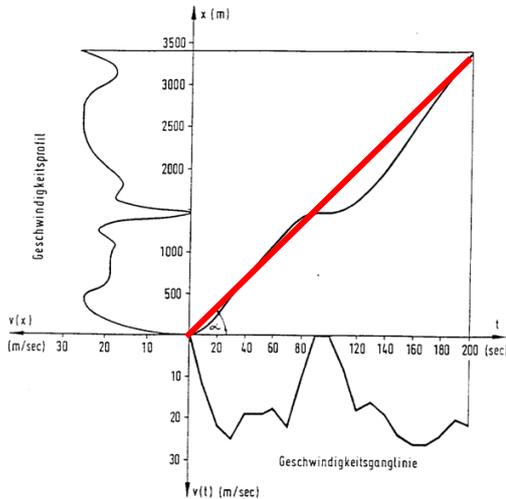


Abbildung 15: Kinematische Zusammenhänge (Fellendorf, 2009)

Die mittlere Reisegeschwindigkeit ist definiert als Steigung α , der Geraden, die den Ursprung mit dem Ende der Trajektorie verbindet.

Die Abbildung 16 zeigt ein Geschwindigkeitsprofil und eine Geschwindigkeitsganglinie als Auswertung einer realen Trajektorie die über eine GPS-Messfahrt erhoben wurde (siehe Kapitel 4.1).

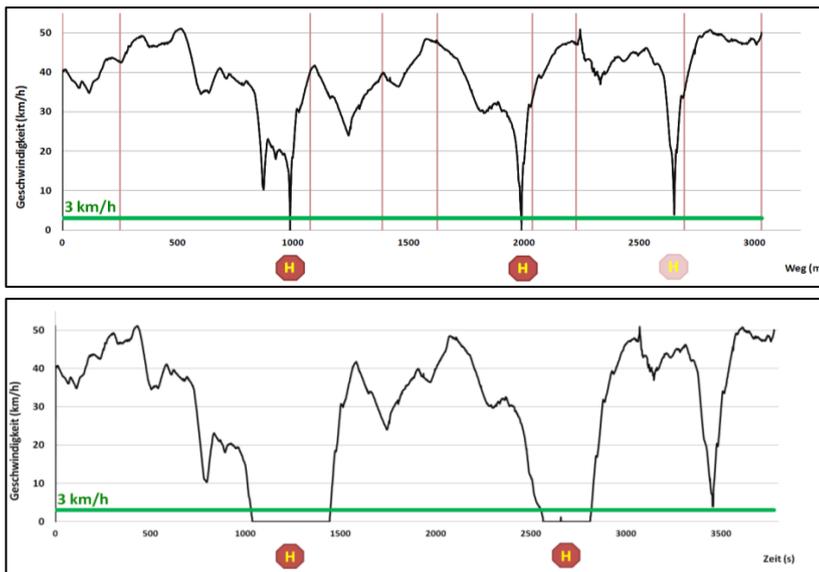


Abbildung 16: Geschwindigkeitsprofil und Geschwindigkeitsganglinie

Trajektorien liefern alle wesentlichen Kenngrößen (siehe Abbildung 17), die zur Beurteilung des signalisierten Streckenzuges nötig sind und darüber hinaus lassen sich weitere indirekte Kenngrößen daraus ableiten. Der Informationsgehalt von Trajektorien kann heute übliche Verkehrserhebungen

(z.B. Verkehrszählungen oder Reisezeitmessungen) ersetzt. Dabei ist lediglich sicher zu stellen, dass eine erforderliche Mindestanzahl an Trajektorien aufgenommen wurden (siehe Kapitel 4.3). Diese Masse an Messfahrten könnte jedoch in Zukunft als FC-Data zugänglich sein. Dabei wird das Fahrzeug selbst zu einem mobilen Sensor der im Verkehrsfluss „mitschwimmt“ und u.A. Verkehrsdaten, aufzeichnet bzw. versendet.

Direkte Kenngrößen aus GPS-Messungen:	Beispiele für Indirekte Kenngrößen aus GPS-Messungen (FCD) :
<ul style="list-style-type: none"> • Zurückgelegter Weg 	<ul style="list-style-type: none"> • Wartezeiten/Verlustzeiten
<ul style="list-style-type: none"> • Reisezeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Beschleunigungen/Verzögerungen
<ul style="list-style-type: none"> • Haltevorgänge 	<ul style="list-style-type: none"> • Antriebsleistung
<ul style="list-style-type: none"> • Reisegeschwindigkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Schadstoffemissionen (Simulation)

Abbildung 17: Datenerhebung aus GPS-Messfahrten bzw. FCD

Zukünftig werden immer mehr Fahrzeuge in der Lage sein, mit der Infrastruktur sowie mit anderen Verkehrsteilnehmern (Car-to-Car, Car-to-X) zu kommunizieren und Daten auszutauschen. Auf diese Art können auch GPS-Daten, also Geschwindigkeitsprofile, und Geschwindigkeitsganglinien übertragen werden (FCD), was eine große Datengrundlage für Auswertungen gewährleistet.

Haltevorgänge :

Haltevorgänge sind eine maßgebende Kenngröße für Lichtsignalanlagen, da durch einen Haltevorgang eine Reihe an negativ behaftete Situationen auftreten (z.B. erhöhte Verlustzeiten, Rückstauungen, erhöhter Kraftstoffverbrauch etc.) Bei nicht koordinierten VLSA können Halte nicht verhindert werden da sie von der Ankunftszeitpunkt, jedes Fahrzeuges abhängig. Durch eine verkehrsabhängige Steuerung ohne Koordinierung, können zwar Rückstauungen vermieden werden, jedoch damit nur indirekt Haltevorgänge. Im Gegensatz dazu stehen koordinierte Verkehrssteuerungen, deren vorrangiges Ziel es ist, Haltevorgänge von durchfahrenden Fahrzeugen entlang des Streckenzuges, zu vermeiden. Deshalb kann die Qualität von koordinierten Streckenzügen anhand der detektierten Haltevorgänge wiedergespiegelt werden. Die Detektion und Messung von Haltevorgängen, an einzelnen Knotenpunkten, kann durch einfache Zählungen erhoben werden. In HBS (2005), wird eine Verkehrsflusserhebung vorgestellt, bei der an jeder koordinierten Signalzufahrt die Anzahl der haltenden, behinderten und durchfahrenden Fahrzeuge gezählt und empirisch ausgewertet werden.

Eine weitere Möglichkeit der Erhebung bietet die Messwagenmethode, bei der ein Fahrzeug mit dem Verkehrsstrom „mitschwimmt“ und während der Fahrt Informationen über Halte sowie Halteursachen gesammelt werden. Dabei ist ein Messkonzept nötig, dass eine Mindestanzahl an Messfahrten auf einem zu untersuchenden koordinierten Streckenzuges garantiert. In HBS (2005), sowie Schnabel (2006), werden 4-6 Messfahrten je Steuergebiet als ausreichend beschrieben, wenn keine maßgeblichen Störungen im Verkehrsfluss durch beispielsweise Parkvorgängen oder sonstige Blockierungen durch arbeitenden Verkehr hervorgerufen wurden.

2.3 Systeme und Verfahren der Qualitätsbewertung von VLSA

In diesem Abschnitt werden die Qualitätsbeurteilungsmöglichkeiten in den heutzutage bedeutendsten Regelwerken und Bemessungsrichtlinien sowie andere Werken vorgestellt und dadurch miteinander in Vergleich gebracht. In einem abschließenden Kapitel 2.3.7, werden die Verfahren zusammengefasst und Mängel aufgezeigt. Mithilfe des neuen Bewertungsverfahrens dieser Arbeit, sollen hier vorgestellte Beurteilungsverfahren verbessert bzw. weiterentwickelt werden.

2.3.1 Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA 2010) :

„Die RiLSA beschäftigt sich neben grundlegenden verkehrstechnischen Bestimmungen und Empfehlungen für die Einrichtung und den Betrieb von Lichtsignalanlagen auch mit der Qualität des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten im Hinblick auf die Untersuchung der Notwendigkeit einer Lichtsignalanlage sowie der Bewertung der vorliegenden Steuerung“. (Schmietendorf, 2010, S. 32). In einem eigenständigen Kapitel wird auf das Qualitätsmanagement von VLSA eingegangen. Dabei wird die Qualität hinsichtlich der Beachtung von Vorschriften, Hinweisen, Kriterien und Richtwerten sowie der Erfüllung von Verpflichtungen und Anforderungen geprüft.

Wichtige Kenngrößen zur Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs sind:

- Wartezeiten [s] und
- Anzahl der Halte

„Weitere Kenngrößen wie Reisezeiten im Netz, Kraftstoffverbrauch und Lärmemissionen können daraus abgeleitet werden. Kenngrößen der Verkehrssicherheit beschreiben Anzahl und Schwere von Verkehrsunfällen. Dabei werden die Unfallkostenrate (für das Sicherheitsniveau) und die Unfalldichte (für Unfallhäufungen) genutzt“ (FGSV F. f., 2010, S. 78).

Eine direkte Qualitätsbeurteilungsmethodik wird von der RiLSA nicht vorgeschlagen. Es wird vielmehr auf eine Ermittlung von Mängelursachen und Identifikation von Verbesserungspotenzialen, die im Handbuch für die Bemessung von Straßenanlagen (HBS) enthalten sind, verwiesen.

„Stattdessen werden in der RiLSA Richtwerte zur Verfügung gestellt. So werden beispielsweise Wartezeiten von mehr als 2 bis 3 Minuten für einzelne wartepflichtige Kraftfahrzeuge sowie Wartezeiten für einzelne Fußgänger und Radfahrer länger als 60 Sekunden (Geduldsschwelle) als unzumutbar lang angesehen. Auch die zeitlichen Abstände aufeinanderfolgender Fahrzeuge eines Fahrstroms, die als Nettozeitlücken über einen Detektor in der Knotenpunktzufahrt gemessen werden können, sollten z. B. bei der Zeitlückensteuerung feste Beträge (sog. Zeitlückenwerte) zwischen 2 und 5 Sekunden nicht unterschreiten, bei stark belasteten Knotenpunkten liegen diese zwischen 2 und 3 Sekunden“ (Schmietendorf, 2010, S. 33). Weil in der RiLSA keine eigenständige Bewertungsmethodik bzw. Bewertungsskalen enthalten sind, kann diese für die Qualitätsbeurteilung einer Verkehrssteuerung nicht direkt verwendet werden. Mit den Richtwerten ist jedoch eine Vorprüfung der Steuerung möglich.

2.3.2 Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS Fassung 2005):

Das HBS ist ein umfassendes Werk und enthält Bemessungs- und Bewertungsverfahren für Straßenverkehrsanlagen. Im deutschsprachigen Raum ist es eines der wichtigsten Standardwerke seit seinem Erscheinen im Jahr 2000. Der große Vorteil der darin enthaltenen Verfahren ist die relativ einfache Anwendung der Verfahren aufgrund einer einheitlichen Verfahrensstruktur und Vorgehensweise.

„Es werden sechs Qualitätsstufen festgelegt, von Stufe A (völlig unbeeinflusstes Fahren oder Gehen auf der freien Strecke, praktisch keine oder nur sehr kurze Wartezeiten an Knotenpunkten oder Abfertigungsanlagen) bis Stufe F (Überlastung). Für die meisten Straßentypen (Autobahnen, Landstraßen, Innerortsstraßen (außer Wohn- und Erschließungsstraßen) und für jede Verkehrsart (individueller Kraftfahrzeugverkehr, straßengebundener öffentlicher Personennahverkehr, Radfahrer, Fußgänger) gelten eigene Werte für die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs.

Das HBS definiert für die einzelnen Stufen der Qualität des Verkehrsablaufs Orientierungswerte, die in den zuständigen Gremien der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) als konsensfähig angesehen werden, es liefert jedoch keine konkreten Vorgaben bezüglich bestimmter gewünschter Qualitätsstufen“ (FGSV F. f.-u., 2005, S. 1-4).

Mithilfe der Bewertungsskalen ist es möglich, verschiedenste Verkehrsanlagen (z.B. Streckenabschnitte, Knotenbereiche,...) anhand von repräsentativen Kenngrößen in ihrer verkehrstechnischen Qualität zu bewerten. Ein Nachteil der im HBS vorgestellten Bewertungsverfahren ist, dass dabei eher die Bemessung der jeweiligen Anlage im Vordergrund steht. Es wird also oftmals die zu erwartende Qualität einer Anlage bestimmt.

Ein weiteres Defizit des HBS, ist die isolierte Betrachtung und Bewertung der Anlagen. Verkehrsanlagen werden autark und unabhängig voneinander untersucht und auch gleichermaßen bewertet. Rückkoppelungen von benachbarten Anlagen können somit nicht oder nur sehr begrenzt ausgemacht werden. Genau dieses Defizit ist bei der Bewertung von Streckenzügen ausschlaggebend. Im HBS ist kein Verfahren angeführt, das einen signalisierten Streckenzug (Knotenpunkte mit VLSA und dazwischenliegende Streckenabschnitte) bewertet. In der derzeit gültigen Ausgabe ist zwar ein Kapitel:“ Streckenabschnitte von Hauptverkehrsstraßen“ enthalten, welches aber nur als Platzhalter für ein zukünftiges Bewertungs- und Bemessungsschema zu verstehen ist.

Die in diesem Abschnitt der Arbeit vorgestellten Bewertungsverfahren aus dem HBS dienen in erster Linie zur Qualitätsbewertung von signalisierten Knotenpunkten (HBS-Kapitel 6: Knotenpunkte mit Lichtsignalanlagen). Darüber hinaus wird auch ein Verfahren angeführt, dass die VLSA -Steuerung von koordinierten Anlagen (Grüne Welle) bewertet.

Die für die Bestimmung der Qualitätsstufen verwendeten Kenngrößen müssen laut HBS entweder in einem realistischen Berechnungsmodell errechnet oder messtechnisch einfach ermittelt werden können.

Im HBS werden mehrere Verfahren zur Qualitätsstufeneinteilung von Knotenpunkten und Hauptverkehrsstraßen beschrieben. Dabei wird nach Verkehrsteilnehmer sowie nach Verkehrssteuerungssystemen unterschieden. Je nach Anwendung der Verfahren kommen unterschiedliche Kenngrößen zum Einsatz.

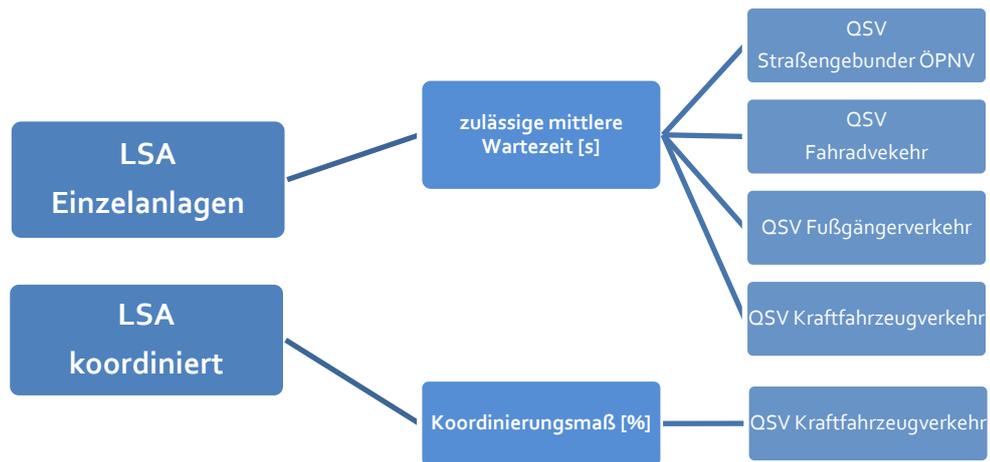


Abbildung 18: Übersicht der Bewertungsverfahren für Lichtsignalsteuerung im HBS 2000

Weil sich diese Arbeit hauptsächlich auf die Qualitätsabschätzung für den Kraftfahrzeugverkehr beschränkt, wird im Folgenden auch nicht auf die Bewertung des nmIV und ÖV eingegangen.

Wie in der Abbildung 18 ersichtlich, stellt die mittlere Wartezeit ein maßgebliches Kriterium für die Qualität einer Einzelanlage auf verschiedenste Modi dar. Im Kfz-Verkehr ist die Wartezeit an einer VLSA definiert als gesamter Zeitverlust, der gegenüber einer ungehinderten Durchfahrt entsteht. Die Wartezeit setzt sich aus der Grundwartezeit (Rotzeit an VLSA) und der Reststauwartezeit (Zeitverlust durch Rückstauungen, Stau während der Freigabezeit) zusammen. Im HBS, Kapitel 6 wird ein Berechnungsverfahren vorgestellt, mit dem die mittlere Wartezeit berechnet werden kann (siehe Abschnitt 2.2)

$$w = w_I + w_{II} \quad [s] \quad (7)$$

mit :

w ...mittlere Wartezeit

w_I ...Grundwartezeit

w_{II} ...Reststauwartezeit

Eine messtechnische Erfassung ist im Wesentlichen nur über Messfahrzeuge möglich, wobei der Erhebungsaufwand relativ hoch ist. Im ÖPNV können auch rechnergesteuerte Betriebsleitsystem (RBL) zur Ermittlung der mittleren Wartezeit an den jeweiligen signalisierten Knotenpunkten verwendet.

Bei der Bewertung von koordinierten VLSA im innerstädtischen Verkehrsnetz wird als Bewertungsgröße das sog. Koordinierungsmaß herangezogen. Diese Größe repräsentiert den Prozentsatz an Durchfahrten eines Knotenpunktes entlang eines koordinierten Streckenzuges. Als Durchfahrt wird eine Überquerung des Knotenbereiches ohne Haltevorgang definiert. Weil durch eine koordinierte Signalsteuerung die Anzahl der Halte entlang des Streckenzuges ein Minimum werden soll, und damit der Verkehrsfluss erhöht wird, kann auch die Qualität der Koordinierung damit abgeschätzt werden.

$$D = \frac{q_D}{q_D + q_H} * 100 \quad (8)$$

mit :

D ...Prozentsatz der Anzahl der registrierten Durchfahrten ohne Halt an der jeweiligen VLSA [%]

q_D ...Anzahl der durchfahrenden Fahrzeuge [-]

q_H ...Anzahl der haltenden Fahrzeuge [-]

Im HBS wird vorgeschlagen, die Anzahl der durchfahrenden und haltenden Fahrzeuge im praktischen Betrieb durch Messfahrten während eines nicht übersättigten Verkehrszustandes zu erheben. Im nächsten Berechnungsschritt wird die für die Qualitätsbeurteilung maßgebliche Kenngröße, das Koordinierungsmaß, bestimmt. Dabei werden die Halte an der jeweils erste VLSA des Streckenzuges nicht berücksichtigt, weil beim Einfahren in den Streckenzug noch nicht von einer Koordinierung des Fahrzeuges ausgegangen werden kann. Der Haltevorgang wäre allein durch den Ankunftszeitpunkt zurückzuführen und nicht auf die Signalsteuerung.

$$k_i = \frac{D_i}{(N_{k,VLSA} - 1) * n} * 100 \tag{9}$$

mit :

k_i ...Koordinierungsmaß für die Verkehrsrichtung i [%]

n ...Anzahl der Messfahrten

D_i ...Anzahl der registrierten Durchfahrten an den Knotenpunkten mit VLSA [-](der Eingangsknotenpunkt wird dabei ausgelassen) für die Verkehrsrichtung i

$N_{k, VLSA}$...Anzahl der Knotenpunkte mit VLSA des Straßenzuges [-]

QSV	Zulässige mittlere Wartezeit w [s]				Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt [%]
	Straßen- gebundener ÖPNV	Fahrrad- verkehr	Fußgänger- verkehr	Kraftfahrzeug- verkehr (nicht koordi- nierte Zufahrten)	Kraftfahrzeugverkehr (koordinierte Zufahrten)
A	≤ 5	≤ 15	≤ 15	≤ 20	≥ 95
B	≤ 15	≤ 25	≤ 20	≤ 35	≥ 85
C	≤ 25	≤ 35	≤ 25	≤ 50	≥ 75
D	≤ 40	≤ 45	≤ 30	≤ 70	≥ 65
E	≤ 60	≤ 60	≤ 35	≤ 100	≥ 50*
F	> 60	> 60	> 35	> 100	< 50*

Tabelle 2: Qualitätsstufeneinteilung von signalisierten Knotenpunkten nach HBS 2000 (FGSV F. f.-u., 2005, S. 6-9)

Mit diesem Bewertungsverfahren ist es möglich, einen koordinierten Streckenzug anhand der bei der Durchfahrt entstandenen Haltevorgänge zu bewerten. Die Beurteilung findet auf Ebene des gesamten Streckenzuges statt. Eine Bewertung der Teilabschnitte sowie die Steuerungsqualität der einzelnen VLSA sind nicht möglich.

2.3.3 Highway Capacity Manual (HCM Fassung 2000):

Das englischsprachige HCM, gilt als internationales Standardwerk zur Bemessung und Bewertung von sämtlichen Straßenverkehrsanlagen. Ebenfalls gilt es weltweit als Vorlage für nationale Regelwerke, so wurde auch das deutschsprachige HBS in Anlehnung an HCM entwickelt.

Im HCM werden ebenfalls Verfahren zur Bewertung der Qualität von Straßenverkehrsanlagen vorgestellt, dabei wird der Fokus nicht wie im deutschen HBS auf die nach der Bemessung zu erwartenden Qualität gelegt, sondern auch Konzepte zur Qualitätsbestimmung von bestehenden Anlagen gezeigt.

„Der Qualitätsnachweis im HCM 2000 erfolgt auf Grundlage des vom HCM im Jahre 1965 erstmals

eingeführten Konzepts der Qualitätsstufeneinteilung (Level-of-Service kurz: LOS), das sich weltweit durchgesetzt hat und unter Anpassung an die jeweiligen Bedingungen der Straßenverkehrsanlagen auch in anderen Ländern als Bemessungsgrundlage übernommen wurde“ (Schmietendorf, 2010, S. 40).

Die für die Arbeit relevanten Kapitel beschränken sich auf innerstädtische Hauptverkehrsstraßen. Darin werden Qualitätskriterien und Bewertungsverfahren für den gesamten Verlauf von innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen beschrieben. Die Bewertung von einzelnen Lichtsignalanlagen wird ebenfalls über die mittlere Wartezeit (control delay/veh) ermöglicht, welche über Berechnungsformeln schon in der Planungsphase erhoben werden können. Die Qualität der Koordinierung wird im HCM über eine Hilfsgröße, den Platoon Ratio (Pulkverhältnis), bestimmt. Über die mittlere Reisegeschwindigkeit wird die Qualität eines gesamten Streckenzuges bestimmt.

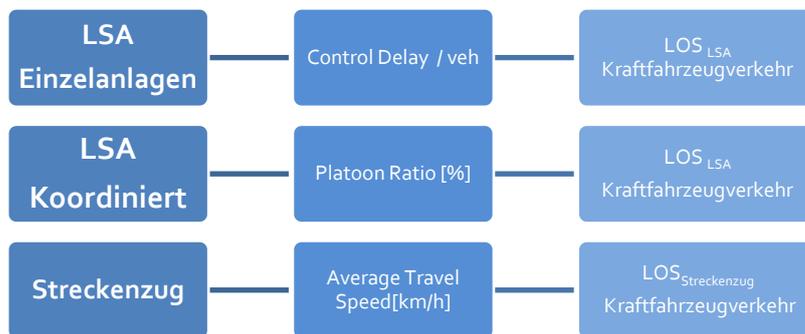


Abbildung 19: Übersicht der Bewertungsverfahren von signalisierten Hauptverkehrsstraßen nach HCM 2000

Die Berechnung der mittleren Wartezeit erfolgt ähnlich dem HBS. Die Ergebnisse sind jedoch aufgrund verschiedener Bemessungszeiträume in den beiden Werken nicht direkt vergleichbar. Im HCM wird ein kürzeres Bemessungsintervall (15 min) als im HBS (Spitzenstunde) verwendet.

LOS	Control Delay per Vehicle (s/veh)
A	≤ 10
B	> 10–20
C	> 20–35
D	> 35–55
E	> 55–80
F	> 80

Abbildung 20: Einteilung der Qualitätsstufen (LOS) für einzelne VLSA nach HCM (TRB, 2000, S. 16-2)

Miteinander koordinierte VLSA entlang eines Streckenzuges werden nach HCM über das sog. Pulkverhältnis (Platoon Ratio) qualitativ bewertet. Dieses Verhältnis steht im Zusammenhang mit dem Verkehrsablauf bzw. Abfluss bei signalisierten Knotenpunkten. Im HCM werden für die jeweilige Qualitätsstufe charakteristische Ankunftsszenarien (Arrival Types) von Fahrzeugen an den Knotenpunkt verwendet. Insgesamt werden 6 Ankunftsszenarien, die den Level of Service (siehe Anhang A-4) gleichzusetzen sind, definiert. Die Ankunftstypen beziehen sich auf die Ankunft eines koordinierten Fahrzeugpulses an einer koordinierten VLSA entlang des Streckenzuges. Ein sehr mangelhaftes Ankunftsszenario wäre etwa die Ankunft eines sehr dichten Pulkes am Beginn der Rotphase (Arrival Type 1), was für eine sehr schlechte Koordinierung und damit für sehr viele Halte- und Beschleunigungsvorgänge sowie hohe Verlustzeiten steht. Eine gute Koordinierung ist dadurch gekennzeichnet, dass sich ein möglichst dichter Fahrzeugpulk ungehindert über den Knotenbereich

während der Grünphase bewegen kann (Arrival Type 5-6).

Für die Berechnung des Pulkverhältnisses ist es jedoch notwendig, Kenntnis über die Grünzeiten und die Umlaufzeit der VLSA Steuerlogik zu haben (siehe Berechnungsformel):

$$R_p = \frac{P}{g_i / C} \tag{10}$$

mit :

R_p ...Pulkverhältnis, Platoon Ratio [%]

P...Verhältnis der während der Grünphase ankommenden Fahrzeuge [%]

g_i...effektive Grünzeit [s]

C...Umlaufzeit [s]

Eine Bewertung einer verkehrabhängigen VLSA -Steuerung ist aufgrund der sich ständig ändernden Freigabezeiten nur bedingt möglich.

Arrival Type	Range of Platoon Ratio (R _p)	Default Value (R _p)	Progression Quality
1	≤ 0.50	0.333	Very poor
2	> 0.50–0.85	0.667	Unfavorable
3	> 0.85–1.15	1.000	Random arrivals
4	> 1.15–1.50	1.333	Favorable
5	> 1.50–2.00	1.667	Highly favorable
6	> 2.00	2.000	Exceptional

Tabelle 3: Einteilung der Ankunftstypen bei koordinierten VLSA nach HCM (TRB, 2000, S. 16-12)

Im HCM ist ebenfalls ein Verfahren zur Qualitätsstufeneinteilung von Hauptverkehrsstraßen samt den VLSA, enthalten. Die dabei verwendeten Kenngrößen sind die mittlere Reisezeit bzw. die daraus einfach zu berechnende mittlere Reisegeschwindigkeit. Weil die Reisegeschwindigkeit eine relative Größe ist können damit auch verschiedene Hauptverkehrsstraßen qualitativ verglichen werden. Ein großer Vorteil des Bewertungsverfahrens ist die praktische Anwendung. Durch Reisezeitmessungen kann die Qualität direkt abgeschätzt werden, es ist kein Berechnungsverfahren anzuwenden. Alternativ zu den Reisezeitmessungen können auch Simulationsmodelle für die Bestimmung von Reisezeiten herangezogen werden.

Nach der Ermittlung der mittleren Reisegeschwindigkeit wird diese in ein Verhältnis zum free-flow-speed der jeweiligen Hauptverkehrsstraße gebracht, um danach eine Qualitätsstufeneinteilung zu ermöglichen. Zusätzlich dazu ist es vom Anwender notwendig, Kenntnis über den Abstand von signalisierten Knotenpunkten, die Straßenklasse (lt. HCM) und die Verkehrsbelastung zu haben. Dabei wird entlang der Hauptverkehrsstraße der Hauptstrom also Durchgangsverkehr betrachtet.

Urban Street Class	I	II	III	IV
Range of free-flow speeds (FFS)	90 to 70 km/h	70 to 55 km/h	55 to 50 km/h	55 to 40 km/h
Typical FFS	80 km/h	65 km/h	55 km/h	45 km/h
LOS	Average Travel Speed (km/h)			
A	> 72	> 59	> 50	> 41
B	> 56–72	> 46–59	> 39–50	> 32–41
C	> 40–56	> 33–46	> 28–39	> 23–32
D	> 32–40	> 26–33	> 22–28	> 18–23
E	> 26–32	> 21–26	> 17–22	> 14–18
F	≤ 26	≤ 21	≤ 17	≤ 14

Tabelle 4: Einteilung der Qualitätsstufen von Hauptverkehrsstraßen nach HCM (TRB, 2000, S. 15-3)

Die Straßenklasse kann anhand von Geschwindigkeitsmessungen über den free-flow-speed oder über Kenntnis der Verbindungsfunktion ermittelt werden. Ist die Straßenklasse definiert, wird in einem nächsten Schritt die mittlere Reisegeschwindigkeit ermittelt, um damit auf die Qualitätsstufe der Hauptverkehrsstrecke bzw. eines Streckensegmentes zu gelangen.

Wie in Abbildung 6 ersichtlich, gelten für verschiedene Straßentypen unterschiedliche Qualitätsstufen. Dies ist eine Besonderheit im Bewertungsschema des HCM. Damit wird eine gewisse Erwartungshaltung der Verkehrsteilnehmer in die Qualitätsbeurteilung mit eingebunden. Das bedeutet, dass an unterschiedliche Straßenklassen auch verschiedene Nutzeransprüche des Verkehrsablaufes gestellt werden. So gelten niedrigere Geschwindigkeiten in einem sehr unterrangigen Netz (z. B.. 30 km/h Zonen) dennoch für eine gute Verkehrsqualität (Vgl. Schmietendorf,2010).

2.3.4 Verfahren nach Spangler (2009)

Spangler (2009), entwickelt ein Verfahren zur Analyse und Bewertung des Verkehrszustandes von innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen. Die Bewertung beinhaltet dabei eine Qualitätsstufeneinteilung von längeren Streckenzügen mit mehreren VLSA. Zu diesem Zweck wird als Bewertungsmerkmal die Reisezeit als geeignetste Kenngröße identifiziert. Die Reisezeit ist ein direkt vom Verkehrsablauf ableitbarer Indikator für eine betrachtete Gesamtroute und wird deshalb u.A. als streckenbezogener Kehrwert, also Reisegeschwindigkeit, verwendet. Laut Spangler gibt die Reisezeit oder Reisegeschwindigkeit die Verkehrsqualität auf einer Gesamtstrecke ausreichend wieder. In seinem Verfahren wird von einer Bewertung einzelner VLSA entlang des Streckenzuges abgesehen. Sollte auf Basis der Qualitätsbewertung mittels Reisezeit eine mangelhafte bzw. schlechte Verkehrsqualität auf einem Streckenabschnitt diagnostiziert werden, so wird eine Detailuntersuchung mit Einzelkenngrößen (Wartezeiten an VLSA, Haltevorgänge...) vorgeschlagen.

„Neu ist in seinem Ansatz der sog. Pufferzeitindex, der als Kenngröße zur Beschreibung der Gewährleistung der ausreichenden Verbindungssicherheit bzw. Zuverlässigkeit und der damit verbundenen Prognostizierbarkeit dient und die Zielerreichung innerhalb einer gewünschten Zeit mit einer statistischen Sicherheit widerspiegelt. Über diesen Index können zufällige Störungen im Verkehrsablauf wie z. B. verkehrsnachfragebedingte Halte, aber auch wiederkehrende und prognostizierbare Zeitverluste (beispielsweise Wartezeiten an VLSA) berücksichtigt werden“ (Schmietendorf, 2010, S. 41).

$$PZI^5 = \frac{t_r^{P95} - t_r^{P5}}{t_r^{P5}} \quad (11)$$

mit :

PZI^5 ...Pufferzeitindex [-]

t_r^{P95} ...95 Perzentil der Reisezeit

t_r^{P5} ... 5 Perzentil der Reisezeit

Ebenfalls wird in Spangler (2009), die Reisegeschwindigkeit als Qualitätskenngröße für den Verkehrsablauf auf Hauptverkehrsstraßen verwendet. Für beide Qualitätskenngrößen wird in Anlehnung an die bedeutendsten Bemessungsrichtlinien HBS und HCM eine Qualitätsstufeneinteilung mit 6 Qualitätsklassen (A bis F) erarbeitet.

Als Datengrundlage werden Messrouten aus dem Stadtgebiet von München verwendet, die allesamt ähnliche Charakteristik aufweisen. Es handelt sich dabei um wichtige Hauptverkehrsstraßen, die

tangential aber auch radial durch das Stadtgebiet verlaufen. Die Strecken sind also mit den in dieser Arbeit untersuchten Grazer Hauptverkehrsadern durchaus vergleichbar.

QSV	Mittler Reisegeschwindigkeit der PKW [km/h]	QSV	Pufferzeitindex [-]
A	≥ 50	A	≤ 0,25
B	≥ 40	B	≤ 0,50
C	≥ 30	C	≤ 1,00
D	≥ 20	D	≤ 1,50
E	≥ 15	E	≤ 2,00
F	≤ 15	F	≥ 2,00

Tabelle 5: Qualitätsstufeneinteilung für den Verkehrsablauf auf Hauptverkehrsstraßen nach Spangler, 2009

In der Abbildung 21 wird der Zusammenhang zwischen dem Pufferzeitindex und der Reisegeschwindigkeit im Tagesverlauf einer Untersuchungsstrecke verdeutlicht.

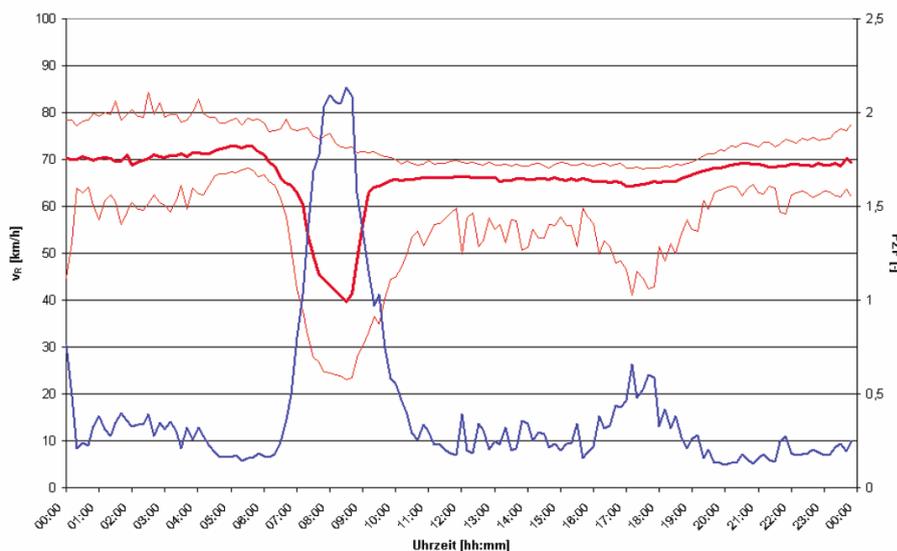


Abbildung 21: Pufferzeitindex (blau) und mittlere Reisegeschwindigkeit (Spangler, 2007, S. 17)

2.3.5 Verfahren nach Brilon (2003)

Das Verfahren von Brilon und Schnabel (2003) gilt als Vorschlag zur Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufes auf städtischen Hauptverkehrsstraßen, bei dem der Verkehrsablauf über den gesamten Straßenzug, samt Lichtsignalanlagen betrachtet wird. Das Verfahren wird als „Lückenfüller“ für das bisher als Platzhalter geltende Kapitel 8 (Streckenabschnitte von Hauptverkehrsstraßen) des HBS, 2005 vorgeschlagen.

Als Qualitätsmerkmal wird die mittlere Reisegeschwindigkeit verwendet. Ebenfalls fließt die zulässige Höchstgeschwindigkeit in die Qualitätsbeurteilung, nach dem Vorbild des HCM ein. Die Qualität der Hauptverkehrsstraßen wird ebenfalls mittels Qualitätsstufeneinteilung (LOS) gegliedert und vereinfacht (siehe Tabelle 6)

QSV	Mittler Reisegeschwindigkeit der PKW [km/h]	Mittler Reisegeschwindigkeit der PKW [km/h]	Mittler Reisegeschwindigkeit der PKW [km/h]
V _{zulässig}	50 km/h	60 km/h	70 km/h
A	≥ 40	≥ 50	≥ 60
B	≥ 30	≥ 35	≥ 40
C	≥ 25	≥ 25	≥ 30
D	≥ 20	≥ 20	≥ 25
E	≥ 15	≥ 15	≥ 15
F	≤ 15	≤ 15	≤ 15

Tabelle 6: Qualitätsstufeneinteilung für den Verkehrsablauf auf Hauptverkehrsstraßen nach Brilon, 2003

2.3.6 Weitere ausgewählte Bewertungsmöglichkeiten und Ansätze

In der Literatur gibt es darüber hinaus auch Werke die sich mit dem Qualitätsmanagement und der sicherheitstechnischen Bewertung von Verkehrslichtsignalanlagen beschäftigen. Das **Hessische Landesamte für Straßen- und Verkehrswesen** (Bosserhoff, 2007), widmet beispielsweise der Qualitätssicherung einen eigenständigen Abschnitt bei dem ein Beurteilungsprozess beschrieben wird. Eine Besonderheit stellt dabei die Aufteilung der Untersuchungsebenen dar, die auch in weiterer Folge in dieser Arbeit als Ansatz verwendet wird. Dabei wird in einem ersten Schritt auf Ebene des Netzes, also Streckenzügen, und bei Bedarf eine Detailuntersuchung an den einzelnen Knotenpunkten vorgenommen. Neben verkehrstechnischen Kenngrößen sind auch wirtschaftliche Aspekte sowie Handlungsbedarfsabschätzungen, Teil des Bewertungsprozesses.

Zhang et al. (2009) erklären, dass die Funktionsweisen von Hauptverkehrsstraßen aufgrund der lichtsignalgesteuerten Knoten sehr komplex ist und deshalb die Qualität des Straßenzuges schwer erfass- bzw. messbar ist. Dies wird durch mehrere Studien bestätigt, in denen versucht wurde, die Qualität direkt messbar zu machen. Beginnend an den Einzelkonten und über den Straßenzug erfolgt die Bewertung auf 3 Ebenen, wobei die oberste Ebene die Netzebene darstellt.

Die Bewertung am Knoten kann durch Messung folgender Parameter erfolgen:

- Verlustzeit durch den Knoten anhand der durchschnittlichen Fahrzeugwartezeit
- Auslastungsgrad
- Warteschlangenlänge anhand der Anzahl an rückgestauten Fahrzeugen
- Rückstau aufgrund von Übersättigung
- Phasenausnutzungsgrad anhand des Grünzeitanteils während eines Umlaufes
- Ablaufqualität anhand des Prozentsatzes von ankommenden Fahrzeugen während der Freigabezeit
- Anzahl der Halte
- Reisezeit entlang des Straßenzuges

Zur Bewertung von signalisierten Knotenpunkten und Streckenabschnitten sind Messungen des Verkehrsgeschehens (Verkehrsstärke [Fzg/Zeit], Belegungsgrad [%], Anforderungen [-], Geschwindigkeit [m/s] aber auch Daten aus dem verwendeten Signalprogramm (Umlaufzeit [s], Phasen [-], Freigabezeiten [s]) nötig.

In **Li et al. (2008)**, wurde die Qualität auf Hauptverkehrsstraßen aufgrund der Reisezeit, Zuverlässigkeit der Reisezeit sowie Anzahl der Halte bezogen auf den Straßenzug abgeschätzt. Das Hauptaugenmerk dieser Studie bezog sich auf die Verkehrsqualität auf der Hauptverkehrsstraße. Der Detaillierungsgrad wurde demnach nicht auf Einzelknotenbetrachtungen gesetzt.

Nach Zuylen et al. (2007) und Hellinga et al (2008) können über Trajektorien Verlustzeiten am Einzelknoten abgeschätzt werden. Die dafür nötigen Daten sind die Position und Geschwindigkeit des Fahrzeuges

In der Studie von **Zuylen et al. (2008)** wird der Zustand eines lichtsignalgesteuerten Einzelknotens anhand der Haltevorgänge beschrieben. Dabei wird unterschieden zwischen leichtem Verkehrsaufkommen bei dem keine Doppel-Halte (Zweifacher Haltevorgang an einer VLSA) vorkommen, und gemäßigttem Verkehrsaufkommen bei dem es zu beträchtlichen Rückstauvorgängen kommt die Doppelhaltevorgänge beinhalten. Der dritte Zustand beschreibt eine Überlastung des Knotenpunktes, bei dem es auch zu mehr als zwei Halten vor der VLSA kommen kann. Die zuvor beschriebenen Zustände können auch über die Messung der Verlustzeiten in Abhängigkeit vom Einfahrtszustand des Fahrzeuges hergeleitet werden

Ehmke et al. (2010), entwickelten ein Bewertungssystem, das in 6 Qualitätsstufen unterteilt ist. Zum Einsatz kommt dieses Bewertungsschema, um die Verkehrsqualität auf Hauptverkehrsstraßen abzuschätzen. Als Bewertungsgröße wird ein Geschwindigkeitsverhältnis herangezogen. Dabei werden Reisegeschwindigkeiten stündlich gemittelt. Die Bewertungsgröße setzt sich aus der maximal stündlich gemittelten Reisezeit dividiert durch die aktuelle Reisezeit, zusammen.

Die Besonderheit des Bewertungsverfahrens ist, dass sich die Grenzen der Qualitätsstufen abhängig von der Tageszeit (Verkehrsstärke) stündlich ändern und somit an die durchschnittliche stündliche Verkehrsbelastung orientiert.

In **Brilon (2008)**, wird auf die Problematik der Qualitätsbewertung im Überlastungsfall eingegangen. Dabei wird erkannt, dass infolge von Überlastungen lange Wartezeiten an den Knotenpunkten durch sich bildende Rückstauungen verursacht werden. Der Rückstau ist dabei von der Kapazitätsgrenze der Zufahrt abhängig. Die Kapazitätsgrenze ist in weiterer Folge vom Freigabezeitanteil und der Sättigungsverkehrsstärke abhängig.

Die mittlere Reisegeschwindigkeit wird in seiner Arbeit als maßgebendes Qualitätskriterium genannt, mit welcher Hauptverkehrsstraßen unter Berücksichtigung der Knotenpunkte hinsichtlich ihrer Verkehrsqualität beurteilt werden können. Auch in dieser Arbeit wird eine mehrstufige Einteilung in Qualitätsstufen vorgenommen. Dabei wird die mittlere Reisegeschwindigkeit noch in Bezug mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit gebracht.

In **Schnabel (2006)**, wird die Qualitätsbeurteilung anhand des Koordinierungsmaßes noch um eine Mängeluntersuchung der Einzelanlagen erweitert. Kernstück ist eine Aufzeichnung der Halteursachen an den Einzelanlagen entlang von koordinierten Streckenzügen. Der Messaufwand steigt jedoch zum Verfahren nach HBS, da zusätzliches Messpersonal zur Aufzeichnung während der Messfahrt benötigt wird. Zur Erhebung der erforderlichen Daten (Anzahl der Halte) werden Messfahrten nach dem Prinzip des Floating Car vorgeschlagen. Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten werden 6 Messfahrten je Streckenzug und Signalprogramm als ausreichend beschrieben.

2.3.7 Fazit der gängigen Bewertungsverfahren

Für die Beurteilung der Verkehrsqualität entlang von innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen mit signalisierten Knotenpunkten gibt es nach dem heutigen Stand der Technik mehrere Bewertungsverfahren. Zu beachten ist jedoch der jeweilige Einsatzbereich der Beurteilungsmethodik. Zur Beurteilung von gesamten Streckenzügen haben sich die Reisezeit oder davon abgeleitete Qualitätskriterien, wie die Reisegeschwindigkeit durchgesetzt. Sie findet Anwendung in den Standardwerken HCM und HBS sowie bei Spangler (2009) und Brilon (2003). Neben der Beurteilung von Streckenzügen sind auch Bewertungsverfahren für einzelne Lichtsignalanlagen in Verwendung (z. B. HBS, HCM), dabei wird u.A. die mittlere Wartezeit als Qualitätsmerkmal verwendet.

Eine umfassende Beurteilung von Streckenzügen und den darin enthaltenen Lichtsignalanlagen ist nach heutigem Stand nur bedingt möglich. Die dafür verwendeten Verfahren (HBS, HCM, Schnabel, 2006) beurteilen koordinierte Verkehrssteuerung (Grüne Welle) anhand der Haltevorgänge bzw. ungehinderten Durchfahrten an Einzelanlagen. Spangler (2009), sowie Brilon (2003), versuchten die derzeitige Lücke im deutschsprachigen Raum zu füllen, indem ihre Verfahren zur Qualitätsbeurteilung von gesamten innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen samt VLSA ausgelegt sind. Der Detaillierungsgrad der Qualitätseinteilung kommt jedoch über die Ebene des Streckenzuges nicht hinaus. Eine Mängelanalyse an den Einzelknoten ist demnach kein Bestandteil dieser Bewertungsmethoden.

Im Wesentlichen fehlt eine Kombination aus Bewertungsverfahren für innerstädtische Hauptverkehrsstraßen und der darin enthaltenen Einzelanlagen zur Mängeluntersuchung. Weil Hauptverkehrsstraßen oft mit einer koordinierten Lichtsignalsteuerung versehen sind, sollte auch dieser Aspekt mitbewertet werden, um in weitere Folge Steuerungsmängel aufzeigen zu können. Da insbesondere in den letzten Jahren umweltrelevante Aspekte im städtischen Straßenverkehr immer wichtiger werden, stellt sich die nicht vorhandene Berücksichtigung von Schadstoffemissionen auf die Qualität von innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen als großes Defizit heraus. In einer Vielzahl an Projekten wird zwar versucht die Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs durch Maßnahmen der VLSA zu reduzieren, jedoch ist die Bewertung der Steuerungsqualität nicht standardisiert.

2.4 Emissionsberechnung

In diesem Abschnitt wird auf die Emissionsberechnungsmethode eingegangen, die in der Arbeit verwendet wird. Dabei handelt es sich um eine Simulationssoftware die anhand von Fahrzyklen, (Geschwindigkeitsverläufen) den Emissionsausstoß bzw. Kraftstoffverbrauch simuliert. Die Abbildung 22 zeigt schematisch die simulierten physikalischen Zusammenhänge der Emissionsberechnung.

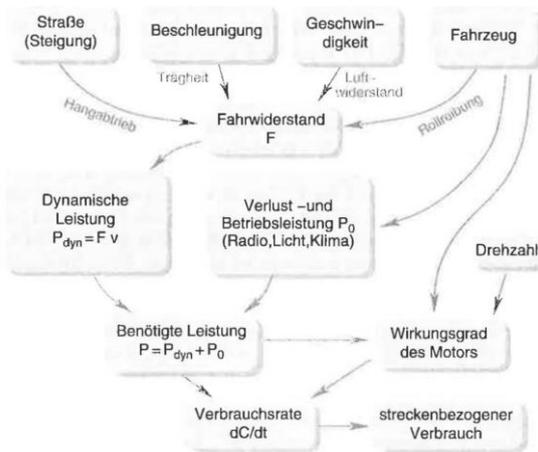


Abbildung 22: Schematische Darstellung der Emissionsberechnung (Treiber, 2010, S. 276)

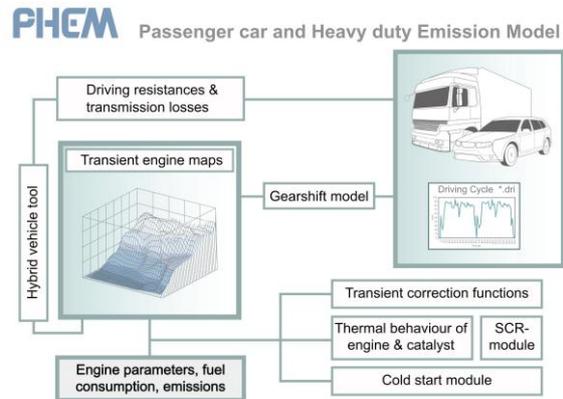


Abbildung 23: Übersicht der Emissionssimulation PHEM (Hausberger, 2010, S. 8)

„Das mikroskopische Emissionsmodell PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model) wurde seit 1999 in mehreren nationalen und internationalen Projekten entwickelt. PHEM liest dabei den Geschwindigkeitsverlauf eines Kfz ein und berechnet dafür Verbrauch und Emissionen in 1 [Hz] Auflösung“ ... „Bei dem Modell PHEM handelt es sich um ein kennfeldbasiertes Emissionsmodell basierend auf einem Fahrzeuglängsdynamikmodell zur Berechnung der aktuellen Antriebs- bzw. Motorleistung. Die Emissionen sind in dreidimensionalen Kennfeldern über Motordrehzahl und Motorleistung abgelegt. Für die Interpolation der Emissionen aus den Kennfeldern wird neben der Motorleistung somit auch die Motordrehzahl benötigt. Diese wird entweder aus dem vorgegebenen Gang errechnet oder, wenn keine Information über das Schaltverhalten vorliegt, mithilfe eines Gangmodells ermittelt. Damit können aus den Emissionskennfeldern für jede Sekunde im Fahrzyklus die Emissionen für den warmen Betriebszustand berechnet werden (Hirschmann et.al., 2009, S. 28).

Aus den Fahrwiderständen und den Antriebstrangverlusten wird die Motorleistung berechnet. Die Motordrehzahl wird aus der Getriebeübersetzung und dem Reifendurchmesser mit zusätzlicher Information über den aktuellen Gang bzw. das Schaltmodell berechnet (Vgl. Hausberger S, 2010).

„Mit Hilfe von Motorkennfeldern kann man nicht nur den Treibstoffverbrauch berechnen, sondern auch verschiedene Emissionen wie Kohlendioxide, Stickoxide, Rußpartikel etc. ermitteln. Die Emission an CO₂ ist beispielsweise direkt proportional zum Kraftstoffverbrauch. Für "Super Plus" mit einer Oktanzahl von 98 ROZ gilt z. B. das Verhältnis von 2.32 kg/l, während es für Diesel bei 2.68 kg/l liegt. Zur Berechnung anderer Emissionen mit komplexeren Abhängigkeiten sind spezielle Kennfelder nötig“ (Treiber, 2010, S.284).

In dieser Arbeit wurde das voreingestellte Motorkennfeld für einen EURO 4 Diesel PKW mit 93 kW und einer Masse von 1550 kg der Simulationssoftware PHEM, verwendet. Dieses Motorkennfeld geht auf die Untersuchungen von Zallinger (2010) zurück. Die Emissionsberechnungen werden als relativ angesehen, absolute Emissions- und Verbrauchswerte (z. B. Gesamtverbrauch) werden nicht verwendet, deshalb ist die Wahl des Motorkennfeldes nebensächlich. Im Wesentlichen geht es bei der emissionstechnischen Betrachtung um Vergleiche von Fahrzyklen untereinander. Dabei kommt

es nicht auf eine Wertung des absoluten Emissionssaustoßes oder Kraftstoffverbrauch sondern auf einen Qualitätsbeurteilung der Strecke samt Verkehrssteuerung an.

Wahl der Einheiten aus der Emissions- und Verbrauchsberechnung

Bei der emissionstechnischen Auswertung von Fahrzyklen, ist auf die richtige Wahl der Einheiten zu achten. Wie in Kapitel 2.2. beschrieben, kann von einer Trajektorie (Weg-Zeit Diagramm) einerseits das Geschwindigkeitsprofil $v(s)$, aber auch die Geschwindigkeitsganglinie $v(t)$, gebildet werden. Beide Geschwindigkeitsverläufe können mittels Verbrauchs- und Emissionssimulation ausgewertet werden. Es ist deshalb eine Wahl zu treffen, auf welche Größe die Verbrauchs- und Emissionswerte zu beziehen sind. In dieser Arbeit werden Streckenzüge bzw. Teilabschnitte von Strecken und Routen untersucht. Deshalb müssen sich die Ergebnisse aus der Emissions- und Verbrauchsauswertung, auf eine Strecke bzw. Streckenabschnitt beziehen. Innerhalb eines Untersuchungsgebietes (siehe Anhang A1), wurden mehrere Fahrzyklen auf derselben Strecke aufgenommen bei denen es zu unterschiedlichen Reisezeiten kommt. Deshalb ist ein Vergleich über die zeitbezogenen Emissionswerte in der Einheit [g/h] nicht möglich.

Weil alle Zyklen eines Untersuchungsfeldes (i.d.R. ein Steuergebiet) auf derselben Strecke mit derselben Weglänge aufgenommen wurden, ist nur der Vergleich über die wegbezogenen Verbrauchs- und Emissionswerte [g/km] gültig.

Validierung und Aussagekraft der simulierten Emissions- und Verbrauchswerte

Das Simulationsprogramm PHEM wurde durch reale Verbrauchs- und Emissionsmessungen validiert. In Vergleichsuntersuchungen zwischen Simulation und Messung konnten insbesondere für den Kraftstoffverbrauch sowie für NOx-Ausstoß sehr gute Ergebnisse erzielt werden (siehe Abbildung 24). Die simulierten Emissionswerte für HC und CO sind schwer abschätzbar und werden bis dato nicht mit der gewünschten Genauigkeit simuliert (Vgl. Hausberger, 2008).

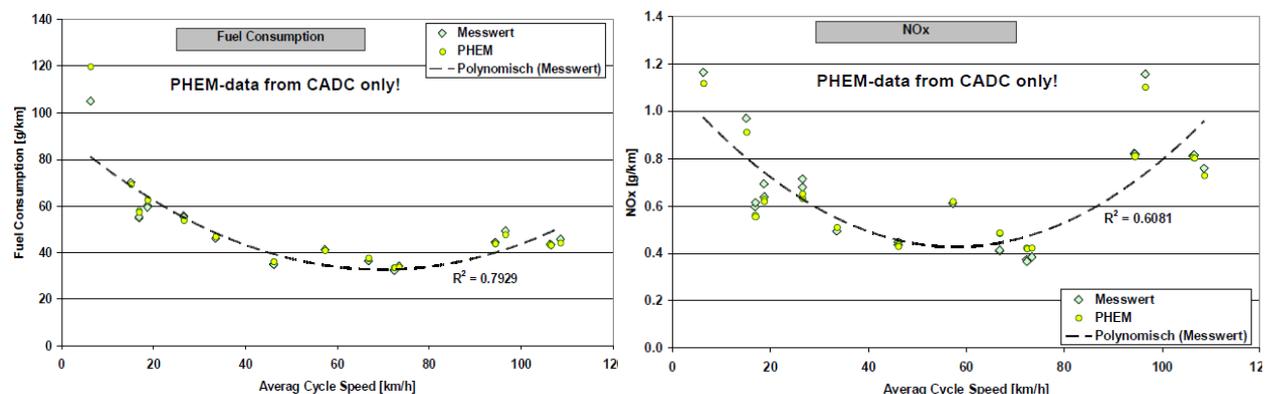


Abbildung 24: Vergleich von Kraftstoffverbrauchsmessung zu Simulationen (Hausberger S., 2008)

In Zallinger (2010, S. 107, Tabelle 7-2), wird die Modellunsicherheit von PHEM für den Kraftstoffverbrauch eines Euro 4, Diesel PKWs im innerstädtischen Gebiet mit 4%, der NOx-Ausstoß mit 45%, CO-Emissionen mit 368% sowie der Partikelaußstoß PM mit 27%, angegeben.

In der weiteren Arbeit wird deshalb der Kraftstoffverbrauch als emissionsrelevante Größe verwendet. Ebenfalls ist der Verbrauch eine „greifbare“ Größe die sowohl von Laien als auch von Experten verstanden wird. Nahezu alle weiteren Schadstoffemissionen werden durch den Kraftstoffverbrauch bzw. den Verbrennungsprozess im Motor hervorgerufen. Die Partikelemissionen PM sowie der CO Ausstoß werden aus Gründen der Vollständigkeit weiterbearbeitet.

3 Die Bewertungsmethodik

Ziel des hier entwickelten Bewertungsverfahrens ist eine Qualitätsbeurteilung der Hauptverkehrsstraße samt Verkehrssteuerung, anhand mehrerer charakteristischer Kenngrößen, die auch eine emissionstechnische Beurteilung zulassen. Die Methodik ist praxisorientiert und soll möglichst einfach anwendbar sein. Ergebnis des Verfahrens ist eine qualitative Aussage über die Steuerung des signalisierten Streckenzuges entlang einer innerstädtischen Hauptverkehrsstraße sowie eine Analyse der darin enthaltenen Einzelknoten. Dabei wird jede VLSA einzeln untersucht, um mögliche Steuerungsmängel oder Mängelursachen auf Ebene des Einzelknotens ausforschen zu können. Es kann durchaus vorkommen, dass eine an sich gute Koordinierungssteuerung durch einzelne mangelhafte VLSA insgesamt mangelbehaftet wird. Als Mängel werden in erster Linie erhöhte Verlustzeiten, überdurchschnittlich hohe Anzahl an Haltevorgängen oder hoher Kraftstoffverbrauch, festgelegt. Die Auswertung der Einzelknoten sowie des gesamten Streckenzuges soll als Grundlage für Verbesserungen der Steuerlogik für den Verkehrsplaner, dienen.

Die derzeit dem Stand der Technik entsprechenden Bewertungssysteme (siehe Kapitel 2.3) sind teilweise vor mehr als 20 Jahren entwickelt worden. Die Datengrundlage der gängigsten Verfahren (HCM, HBS, Schnabel, 2010) sind Verkehrserhebungen aus Zähldaten bzw. Beobachtungen des Verkehrsablaufes sowie Reisezeitmessungen. Daraus werden einzelne Bewertungskenngrößen generiert anhand, derer die Qualität der Verkehrssteuerung am Streckenzug bzw. an den einzelnen VLSA bestimmt werden. Alle derzeit in Verwendung befindlichen Bewertungsmethoden arbeiten mit einer einzigen Bewertungskenngröße. Dies stellt auch das maßgebliche Defizit der Verfahren dar. Der Verkehrsablauf, beziehungsweise die Qualität der Verkehrssteuerung kann damit nicht umfassend abgebildet werden. Dies wird unter anderem auch in Wiethold (2007), erkannt: „In der Untersuchung der Steuerungsverfahren wurde deutlich, dass das Bewertungskriterium nach dem HBS (2001), das Koordinierungsmaß, nicht allein ausreichend ist, um die Verkehrsqualität eines Straßenzuges zu bewerten. Nach der Bewertung des HBS (2001) sind viele Koordinierungen unwirksam, obwohl die mittlere Reisegeschwindigkeit noch ausreichend ist. Es wurde ein gewisser Widerspruch zwischen dem Bewertungsmaß nach dem HBS (2001) und der Bewertung nach Brilon (2003), die sich auf die mittlere Reisegeschwindigkeit bezieht, deutlich. Um einen Straßenzug ausreichend zu bewerten, sollten beide Bewertungskriterien verwendet werden, sowohl die Anzahl der Halte als auch die Reisegeschwindigkeit. Eine direkte Beurteilung der Qualität anhand der emittierten Schadstoffe bzw. des Kraftstoffverbrauchs ist derzeit nicht in Verwendung.“ (Wiethold, 2007, S. 149).

Weil sich auch die Methodik der Datenerhebung in den letzten Jahren verändert hat und in Zukunft neue Technologien wie FCD alltagstauglich werden, verwendet die Bewertungsmethodik als Datengrundlage für alle Bewertungskenngrößen, GPS-Trajektorien. Der Informationsgehalt der aufgenommenen Fahrtverläufe ist im Vergleich mit den derzeit dem Stand der Technik entsprechenden Bewertungsgrößen um ein Vielfaches höher. Aus den Trajektorien können detaillierte Informationen über den Verkehrsablauf gewonnen werden (siehe Kapitel 2.2, S.22), die nach herkömmlichen Messmethoden aufwendig erhoben werden müssten (z.B. Verkehrszählungen). Sämtliche Bewertungsgrößen lassen sich aber auch auf Grundlage von Trajektorien berechnen, was ein Kernpunkt der Arbeit darstellt. Die dafür benötigten Fahrtverläufe können in Zukunft einfach über FCD erhoben werden.

Auf den folgenden Seiten der Arbeit wird im Detail auf die Methodik der Qualitätsbeurteilung eingegangen. Im Wesentlichen wird erklärt, welche Kenngrößen in das Beurteilungssystem Eingang finden und welche Aussagekraft die jeweilige Größe besitzt. Dabei werden nicht nur die technischen

Hintergründe und Begründungen der ausgewählten Kenngrößen beschrieben, sondern ebenfalls erläutert wie die einzelnen Größen aus den aufgezeichneten Fahrtverläufen gewonnen werden. Im ersten Teil des Abschnittes wird zunächst auf die Problematik der Abschnittseinteilung des Streckenzuges eingegangen, da die Festlegung der Abschnittsdefinition eine Grundlage für das weitere Bewertungsverfahren darstellt.

Ein weiterer grundlegender Bestandteil des Bewertungsverfahrens, die statistische Untersuchung der fahrdynamischen Kenngrößen, wird in einem eigenen Kapitel 3.3, erarbeitet. Dabei werden erstmals die zur Bewertung in Frage kommende Qualitätskenngrößen vorgestellt und diskutiert. Mithilfe der Korrelationsanalyse (lineare Regression) können zwei grundlegende Fragestellungen geklärt werden:

- Welches Verfahren zur Einflussbereichsunterteilung von einzelnen VLSA entlang eines Streckenzuges eignet sich am Besten für das weitere Bewertungsverfahren?
- In welcher Abhängigkeit stehen die aus GPS-Trajektorien berechneten fahrdynamischen Kenngrößen mit Schadstoffemissionen?

Nachdem diese Fragen geklärt sind, werden die Eingangsgrößen für das Bewertungsverfahren im Folgeabschnitt 3.4, detailliert vorgestellt und ihre Funktionen im Bewertungssystem erläutert. Danach wird in einem letzten Abschnitt 3.5, die eigentliche Qualitätsbeurteilung vorgestellt. Dabei geht es im Wesentlichen um eine sinnvolle Prozessierung der Eingangsgrößen, um schlussendlich den zu untersuchenden Streckenzug qualitativ bewertbar zu machen.

Die Abbildung 25 zeigt den schematischen Beurteilungsvorgang, von der Datenerhebung bis hin zur letztendlichen Qualitätsbewertung.



Abbildung 25: Schematische Darstellung der Bewertungsmethodik

Als Datengrundlage für die Entwicklung des Bewertungssystems dienen real gemessene Fahrtverläufe an 7 verschiedenen Hauptverkehrsstraßen im Grazer Stadtgebiet, welche im Anhang A1 detailliert beschrieben werden.

3.1 Einflussbereiche von VLSA

Um eine detaillierte Analyse der Einzelknoten entlang des koordinierten Straßenzuges möglich zu machen, müssen Streckenzüge in Abschnitte unterteilt werden, wobei jeder Abschnitt einer VLSA zugeordnet werden muss. Die Unterteilung der aufgenommenen Trajektorien stellt für die weitere Kenngrößengenerierung auf Ebene der Einzelknoten eine Grundlage dar weil ansonsten keine Zuteilung der erfassten Kenngrößen auf einzelne VLSA möglich ist. Wesentlich dabei ist die Festlegung der Abschnittsgrenzen.

Es gilt also gewissermaßen, Einflussbereiche von einzelnen Knotenpunkten entlang eines Straßenzuges zu identifizieren. Dabei ist zu klären, wielange ein Fahrzeuglenker von einer VLSA beeinflusst wird bzw. wie daraus eine Abschnittseinteilung erfolgen kann. Im derzeitigen Stand der Technik gibt es dazu keine Methode oder Verfahren. Aus diesem Grund wurden Ansätze mit Fachleuten diskutiert und schließlich eine Methodik entwickelt, die eine Abschätzung von Einflussbereichen ermöglicht.

Der hier behandelte Einflussbereich ist in der Arbeit definiert als Abschnitt, in dem Fahrzeuglenker das Fahrverhalten direkt vom Signalbild der VLSA abhängig machen. Wesentlich dabei ist die Betrachtung von kinematischen Bewegungsvorgängen. Die Beeinflussung beginnt, an dem Punkt bei dem der Fahrzeuglenker das vor ihm liegende Signalbild erkennt und sein Fahrverhalten demnach anpasst: Sieht er ein rotes Ampelsignal, wird die Geschwindigkeit dementsprechend reduzieren bis er schließlich vor der Haltelinie zum Stillstand kommt. Bekommt er anschließend vom Steuerprogramm ein Freigabesignal (Grünphase), beschleunigt er sein Fahrzeug, bis die gewünschte Endgeschwindigkeit erreicht ist. Als Ende der Beeinflussung gilt demnach das Beenden des Beschleunigungsvorganges infolge einer vorigen Geschwindigkeitsreduktion, die durch das Signalbild der VLSA hervorgerufen wurde.

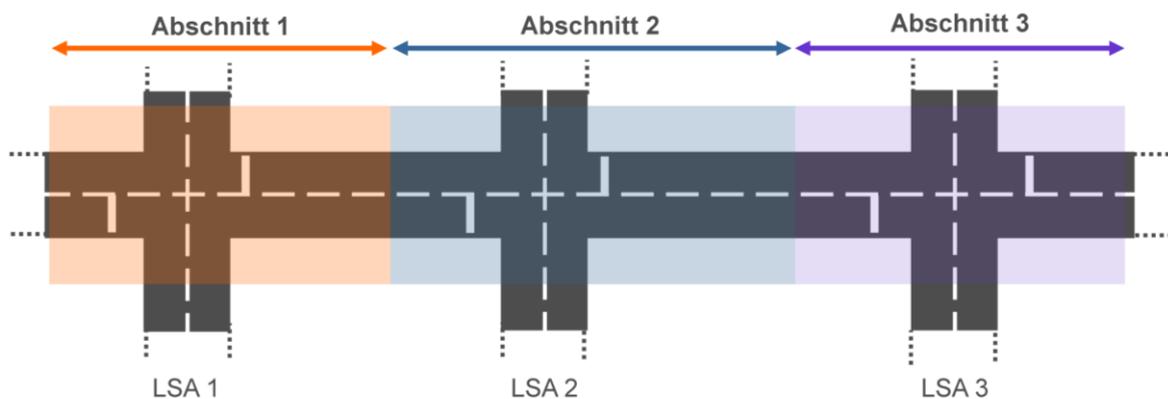


Abbildung 26: Problematik der Abschnittseinteilung des Streckenzuges

Im folgenden Kapitel 3.1 werden mögliche Abschnittsunterteilungen diskutiert und ihre Einsatzbereiche sowie Anwendungsgrenzen aufgezeigt. Ebenfalls werden ausgewählte Ansätze miteinander verglichen und diskutiert. Ziel dieser Analyse ist eine geeignete Abschnittseinteilung für die gesamte Arbeit zu finden.

Untersucht werden folgende Methoden der Abschnittseinteilungen:

- 1. Verfahren: Haltelinien als Abschnittsgrenzen
- 2. Verfahren: Abschnittsgrenze unmittelbar nach der Durchfahrt des Knotenpunktes
- 3. Verfahren: Einflussbereich von VLSA aufgrund des Fahrverhaltens

Als Datengrundlage für die Einteilungen wurden GPS-Trajektorien verwendet, da diese den Einfluss der VLSA anhand des Geschwindigkeitsprofils am besten erkennen lassen. Dies ist vor allem beim letztgenannten Verfahren von Bedeutung, da dort die Einflussbereiche direkt aus den Geschwindigkeitsverläufen abgeleitet werden. Die zwei erstgenannten Abschnittseinteilungen sind im Gegensatz zum 3. Verfahren statisch und nicht abhängig von Fahrtverläufen oder Bewegungsvorgängen.

1. Verfahren: Haltelinien als Abschnittsgrenzen

Bei dieser Methode der Abschnittseinteilung werden die Bereichsgrenzen an den Haltelinienpositionen der nächstgelegenen Knotenpunkte festgelegt. Das bedeutet eine Überlappung von Abschnitten wie aus der Abbildung 27 zu entnehmen ist.

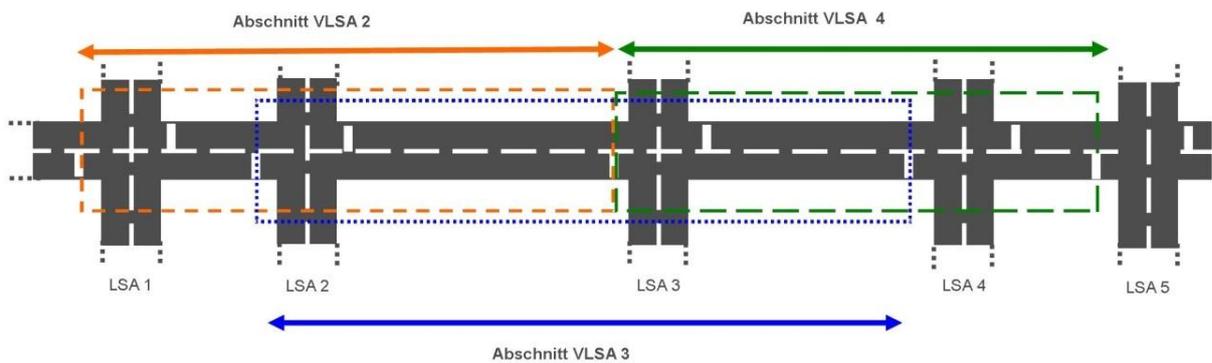


Abbildung 27: Abschnittseinteilung mit Haltelinienpositionen

Der Vorteil ist die einfache statische Einteilung der Abschnitte. Für die erste und letzte VLSA des Streckenzuges kann kein Abschnitt gebildet werden und demnach werden diese auch nicht ausgewertet. Diese Art der Abschnittseinteilung eignet sich für relative Vergleiche von Kenngrößen. Der wesentliche Nachteil ist die entstehende Unschärfe bei großen Abständen zwischen den Knotenpunkten, da der Einflussbereich der VLSA mit freien Streckenabschnitten gemeinsam in einem Abschnitt ausgewertet wird. Eine Trennung von Größen, die dem Einflussbereich der VLSA oder der freien Strecke entsprechen, ist nicht möglich.

Für absolute Betrachtungen von Kenngrößen ist das 1. Verfahren wegen der nicht vorhandenen Trennschärfe, aufgrund der Überlappungen ungeeignet. Verzichtet man auf die Überlappung (siehe Abbildung 28) ist eine kontinuierliche Einteilung des Streckenzuges möglich. Im Kapitel 3.3.2. wird deshalb diese Methode näher betrachtet.

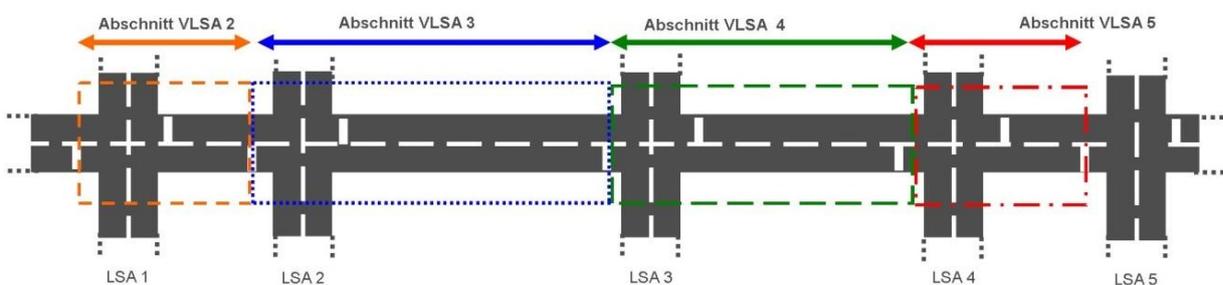


Abbildung 28: Abschnittseinteilung mit Haltelinienpositionen (Verfahren 1 ohne Überlappung)

2.Verfahren: Abschnittsgrenze unmittelbar nach der Durchfahrt des Knotenpunktes

Bei dieser Methode wird der Streckenzug ohne Überlappungen von Abschnittsbereichen gegliedert. Die Abschnittsgrenzen der einzelnen Knotenpunkte werden unmittelbar nach den jeweiligen Kreuzungsbereichen festgelegt. Diese Einteilung ist ebenfalls sehr einfach. Im Sinne der Auswertung und Zuweisung von Kenngrößen, ist dieses Verfahren jedoch ungeeignet, da sich in einem Abschnitt die Einflüsse von 2 VLSA verschmieren.

Man betrachte die Abschnittswechsel in Abbildung 29. Es ist nicht davon auszugehen dass alle Bewegungsvorgänge z. B. Anfahrten aus dem Stillstand, die bei einer Rotphase vor der Haltelinie beginnen, bis zum Abschnittswechsel abgeschlossen sind. Deshalb werden Teile der Beschleunigungsvorgänge in dem nächsten Abschnitt und somit der nächsten VLSA zugeordnet, was der Idee von Einflussbereichseinteilungen entgegenspricht. Die Problematik bei diesem Verfahren ist es, eine passende Distanz von der Haltelinie bis zum Abschnittswechsel zu finden, bei dem dies nicht auftritt.

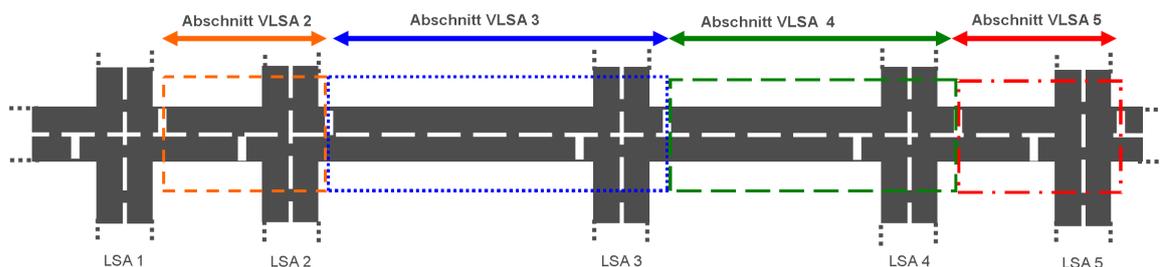


Abbildung 29: Abschnittsgrenzen nach dem Kreuzungsbereich (gegenüberliegende Haltelinie)

3.Verfahren: Einflussbereich von VLSA aufgrund des Fahrverhaltens

Neben der Abschnittseinteilung mit festen Grenzen, wird nun ein Verfahren vorgestellt, das Bereichsgrenzen anhand des tatsächlichen Fahrverlaufes von Messfahrten entlang eines Streckenzuges, festlegt. Die Besonderheit der daraus resultierenden Abschnitte ist, dass diese für jeden Knotenpunkt einzeln berechnet werden. Diese Methodik berücksichtigt also alle Einflüsse, die auf den Fahrzeuglenker wirken. Jeder VLSA des Streckenzuges wird ein individueller Einflussbereich zugeteilt, der die Abschnittsgrenzen definiert.

Als Grundlage für diese Art der Abschnittseinteilung, werde GPS-Trajektorien ausgewertet und analysiert. Vor allem anhand des Geschwindigkeitsverlaufs bzw. der Beschleunigungsvorgänge können direkte Einflüsse der VLSA auf den Fahrtverlauf rückgeschlossen werden. Die Systematik der daraus berechneten Einflussbereiche und Abschnittsgrenzen wird anhand eines Beispiels erläutert.

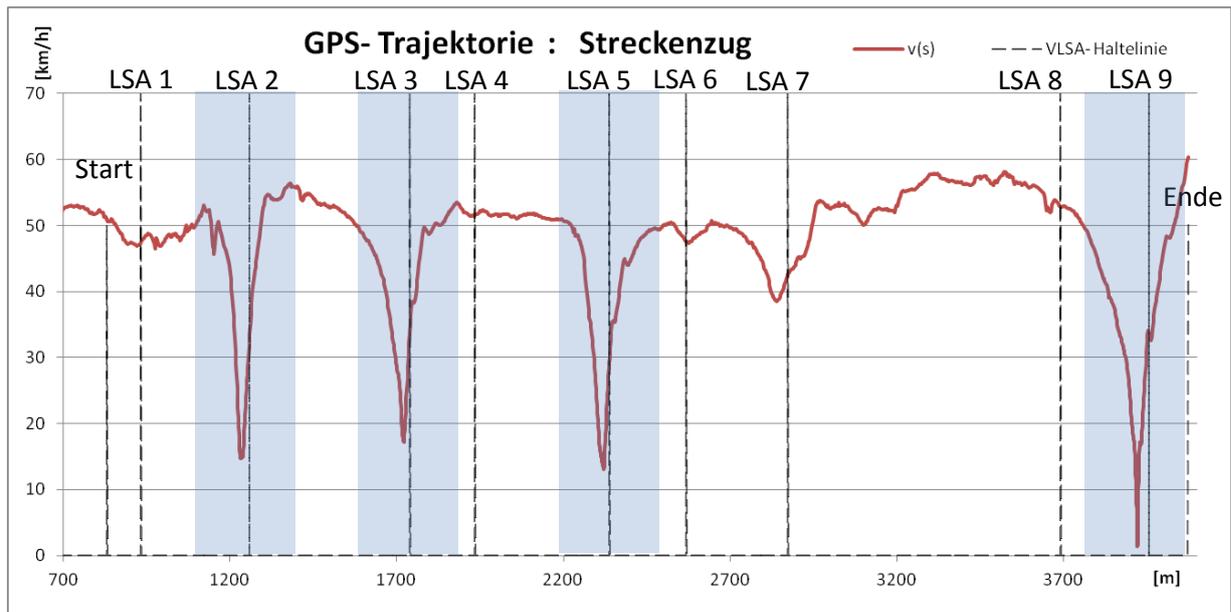
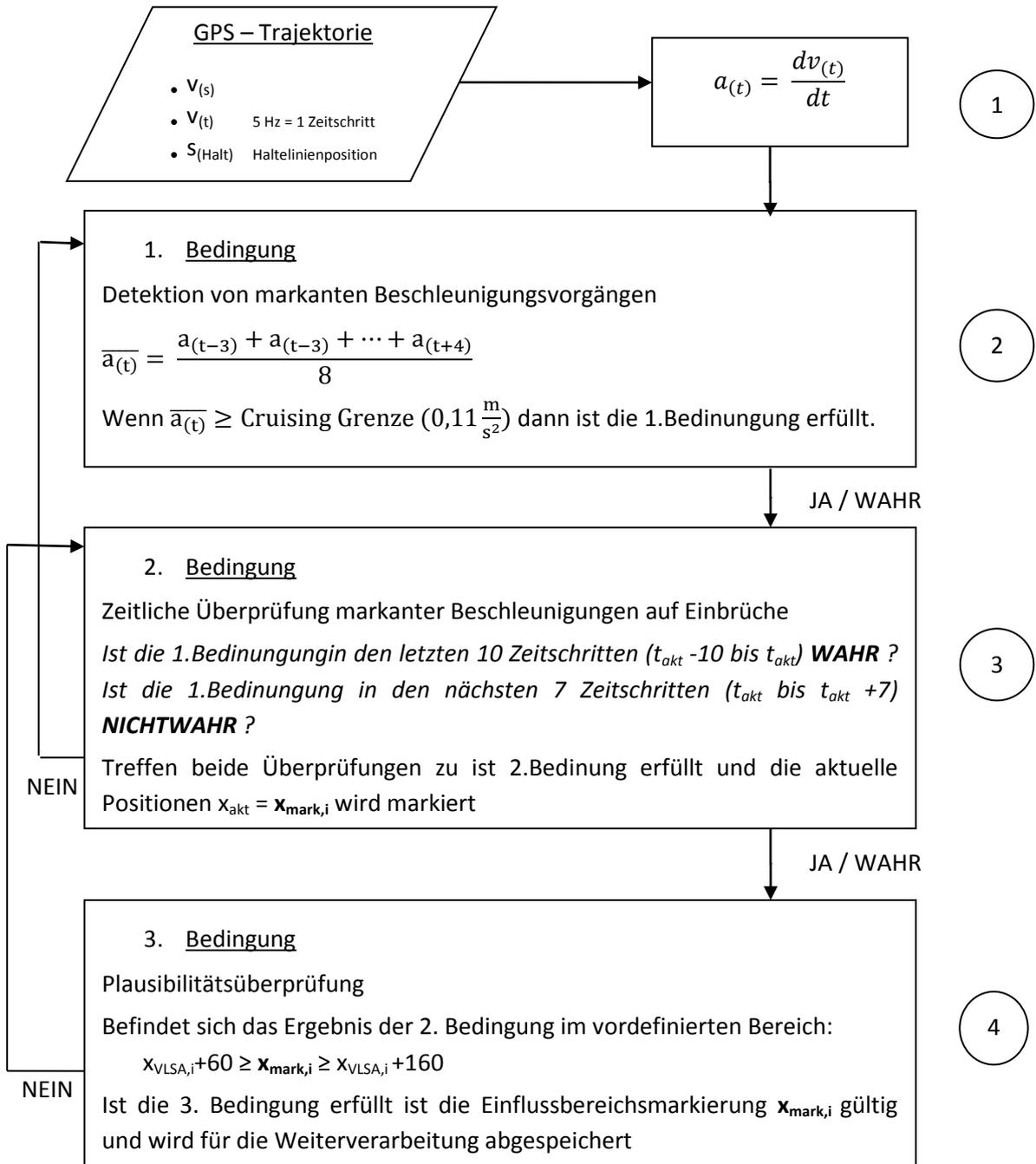


Abbildung 30: GPS – Trajektorie für einen Streckenzug inkl. Haltelinienpositionen

Die Abbildung 30 zeigt eine beispielhafte aufgezeichnete GPS-Trajektorie, entlang eines koordinierten Streckenzuges, als Geschwindigkeitsprofil ausgewertet. Die Haltelinien der einzelnen VLSA sind mit vertikalen Linien markiert. Bei der Fahrt kommt es mehrfach zu markanten Einbrüchen des Geschwindigkeitsverlaufes im Bereich von LSA 2, LSA 3, LSA 5 sowie LSA 9. Diese Bereiche sind in der Abbildung 30 markiert. Innerhalb dieser hervorgehobenen Bereiche sind Brems- und Beschleunigungsvorgänge die durch die Steuerung der VLSA bewirkt, also beeinflusst werden, zu erkennen. Die grundlegende Idee ist nun Einflussbereichsgrenzen anhand der Beschleunigungsvorgänge zu berechnen. Ein Abschnittwechsel soll dann eingefügt werden, wenn der Beschleunigungsvorgang weitgehend abgeschlossen ist und der Fahrzeuglenker nicht mehr durch die VLSA beeinflusst wird und sich auf der freien Strecke befindet. Dafür wurde eine Verarbeitungslogik (siehe Abbildung 31) entwickelt, die den Geschwindigkeitsverlauf über die Strecke, $v(s)$ als auch das Geschwindigkeitsprofil über die Zeit $v(t)$, analysiert und unter bestimmten Bedingungen Abschnittunterteilung einfügt.



Mit:

$v_{(s)}$ Geschwindigkeitsprofil

$v_{(t)}$ Geschwindigkeitsganglinie

$s_{(Halt)}$ Haltelinienposition auf der Strecke

$a_{(t)}$ Beschleunigung

$\bar{a}_{(t)}$ gemittelte Beschleunigung über 8 Zeitschritte

t_{akt} aktuelle Zeit

x_{akt} aktuelle Position

$x_{mark,i}$ markierte Position (Ende der markanten Beschleunigungsbewegung)

$x_{VLSA,i}$ Position der Haltelinie der jeweiligen VLSA

Abbildung 31: Berechnungslogik zur Bestimmung von Einflussbereichen

Eingangsdaten der Verarbeitungslogik sind die Geschwindigkeitsganglinie $v_{(t)}$ und das Geschwindigkeitsprofil $v_{(s)}$ sowie die Positionen der Haltelinien $x_{VLSA,i}$ entlang der gefahrenen Strecke. Die beiden Geschwindigkeitsverläufe können direkt aus den GPS-Trajektorien entnommen werden. Die Position der Haltelinien kann entweder über eine GPS-Messfahrt mit zusätzlicher Video Aufzeichnung (siehe Kapitel 5.1) oder über direkte Feldmessung der Koordinaten mittels GPS Gerät, bestimmt werden.

① Im ersten Schritt wird durch zeitliches Ableiten der Trajektorie die Beschleunigung $a_{(t)}$ berechnet, die dann in 3 aufeinanderfolgenden Schritten (Bedingungen) analysiert wird, um schlussendlich Beeinflussungsgrenzen der VLSA bestimmen zu können.

② Bei der 1. Bedingung wird überprüft, wo sich entlang der aufgezeichneten Strecke das Fahrzeug in einer markanten Beschleunigungsfahrt befindet. Wie in der Fahrzeugtechnik üblich, werden anhand von Geschwindigkeitsverläufen bestimmte Fahrzustände beschrieben. Darunter zählen Beschleunigungs- und Bremsvorgänge, aber auch spezielle Fahrverhaltensmuster wie das Cruisen oder Kriechen (engl. Creeping, (Matzoros, 1992)). Ein markanter Beschleunigungsvorgang wird von der Logik dann erkannt, wenn der arithmetische Mittelwert der Beschleunigung $\overline{a_{(t)}}$ länger als 8 Zeitschritten (1,4 sek bei 5 Hz Aufzeichnungsrate) überhalb der Cruising Grenze von $0,11 \text{ m/s}^2$ liegt. Die Mittelwertbildung beginnt 3 Zeitschritte vor dem aktuellen Wert, $a_{(t-3)}$ und endet 4 Zeitschritte danach $a_{(t+4)}$. Dies ist erforderlich, um kurze Unstetigkeiten der aufgezeichneten Trajektorien zu überspringen.

Die festgelegten Zeitbereiche (Anzahl an Zeitschritten) wurde iterativ bestimmt. Die Auswirkung variierender Zeitbereiche (2-20 Zeitschritte) wurde dabei betrachtet und das Ergebnis auf Plausibilität geprüft. Dabei hat sich die Wahl von 8 Zeitschritten für die Mittelwertbildung ergeben. Ebenfalls hat sich die Festlegung der Cruising Grenze mit $0,11 \text{ m/s}^2$ für das hier vorgestellte Verfahren bewährt.

In jenen Zeitschritten, in denen die 1. Bedingung erfüllt ist, wird an der jeweiligen Stelle entlang der Strecke eine logische Markierung gespeichert.

③ Der nächste Schritt ist die Detektion von relevanten Einbrüchen der zuvor analysierten markanten Beschleunigungsvorgänge. Dies wird in der Logik in die 2. Bedingung eingearbeitet. Dabei wird in jedem Zeitschritt überprüft, ob ein markanter Beschleunigungsvorgang eine zuvor festgelegte Mindestzeitdauer (10 Zeitschritte) anhält und in weiterer Folge für eine Mindestzeitdauer (7 Zeitschritte) nicht eintritt. Diese Überprüfung erlaubt es, das Ende von markanten Beschleunigungsvorgängen zeitlich sowie örtlich zu erfassen. Wie bei der 1. Bedingung wurden die dafür benötigten Zeitschritte iterativ, anhand der besten Ergebnisse, bestimmt. Wenn die 2. Bedingung erfüllt ist, wird wiederum am jeweiligen Ort, eine logische Markierung ($x_{\text{mark},i}$) gesetzt. Diese kennzeichnet das Ende einer markanten Beschleunigungsfahrt und den Übergang in einen anderen Fahrzustand (Bremsen, Kriechen, Cruisen...). Die Idee bei dieser Bedingung ist die Markierung von starken Anfahrtsbeschleunigungen von Fahrzeugen, die vor der VLSA zum Halt bzw. in einen Bremsvorgang gekommen sind und in der Nähe der Haltelinie wieder stark beschleunigen, bis sie ein gewisses Niveau erreicht haben ab dem der Beschleunigungsvorgang endet.

④ Die 3. Bedingung beinhaltet eine statische Plausibilitätsüberprüfung, bei der die Standorte der zuvor ermittelten Markierungen (2. Bedingung) überprüft werden. Aus Voruntersuchungen der Beschleunigungsvorgänge wurde eine untere Grenze von 60m nach der Haltelinie definiert. Markierungen, die zwischen 0 und 60m nach der Haltelinie ($x_{VLSA,i}$) von der Logik gesetzt werden, sind als ungültig zu werten. Die Grenze von 60m ergibt sich aus einer mittleren Beschleunigung von $1,6 \text{ m/s}^2$ bis zu einer angenommenen Endgeschwindigkeit von 50 km/h. Diese Grenze definiert den

Bereich, der auf jeden Fall durch die zuvorliegende VLSA beeinflusst wird. Dies kommt aus dem physikalischen Beschleunigungsweg, den ein zum Halt gekommenes Fahrzeug in jedem Fall zurücklegen muss um eine Endgeschwindigkeit von 50 km/h zu erreichen. Als obere Grenze wird 160 m ausgewählt, da davon ausgegangen wird, dass der wesentliche Beschleunigungsvorgang nach einer VLSA bis dahin abgeschlossen ist.

Zusammenfassend wird ein Gültigkeitsbereich nach der VLSA festgelegt, innerhalb dessen sich die Grenze des Einflussbereiches befinden kann (60-160 m stromabwärts nach der Haltelinie). Diese Grenzen definieren auch den Einsatzbereich des Verfahrens: Haben zwei aufeinanderfolgende VLSA einen kleineren Haltelinienabstand als 60m wird keine separate Grenze gesetzt. Die beiden Einflussbereiche „verschmelzen“ und anhand des Geschwindigkeitsverlaufes nicht aufgeteilt werden können.

Ein beispielhaftes Ergebnis der Auswertungslogik ist in Abbildung 32 dargestellt. Dabei sind die Markierungen der Abschnittswchsel am Ende der jeweiligen Beschleunigungsvorgänge zu erkennen. Bei einer reinen Überfahrt, d. h. keiner markanten Beschleunigung nach der Haltelinie, wird keine Markierung gesetzt. Beispielhaft dafür steht die Überfahrt der Haltelinie LSA 1, LSA 4, LSA 6 sowie LSA 8. Die Markierung nach der letzten VLSA (hier LSA 9) kann verworfen werden, da die Aufzeichnung unmittelbar nach der Haltelinie der letzten VLSA endet und der Gültigkeitsbereich nicht eingehalten werden kann.

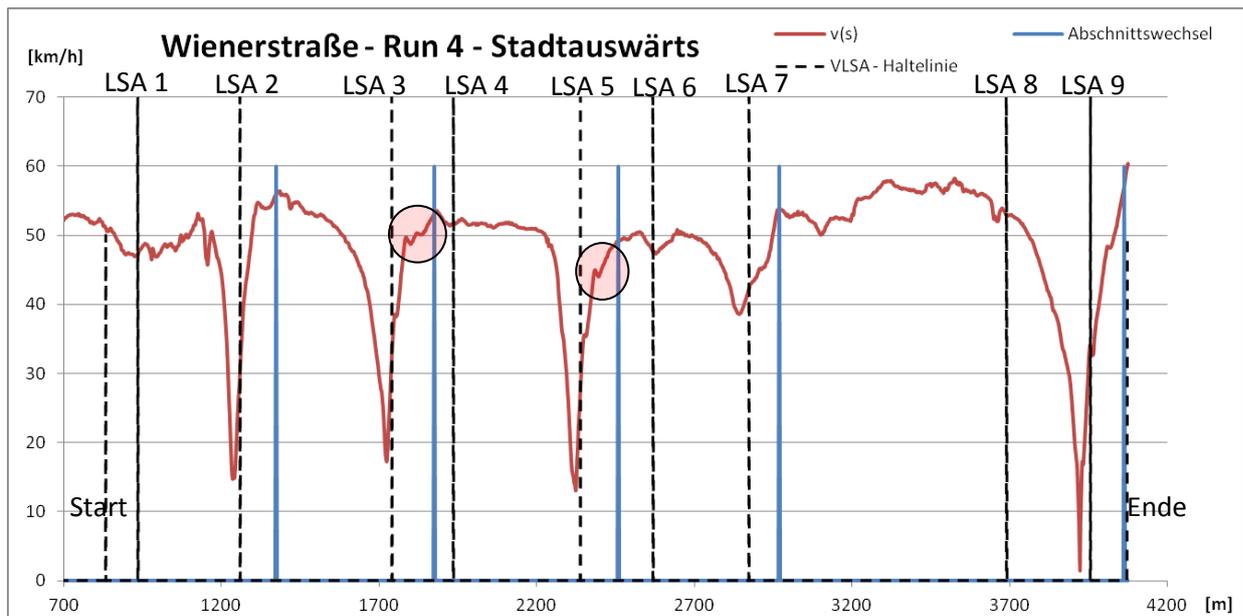


Abbildung 32: Ergebnis des Verarbeitungslogik für den Einflussbereich von VLSA

Durch die Steuerlogik wird gewährleistet, dass sich kurze Geschwindigkeitseinbrüche die vor allem durch Schaltvorgänge hervorgerufen werden, nicht auf die Detektion der Einflussbereiche auswirken. In der Abbildung 32 sind solche Schaltvorgänge beispielhaft hervorgehoben.

Die zuvor vorgestellte Verarbeitung wird für jede Einfahrt im Steuergebiet angewendet und die jeweiligen gültigen Markierungen $x_{\text{Mark},i}$ werden gesammelt. Aus der Vielzahl an Einzelauswertungen werden in weiterer Folge für jeden Einflussbereich bzw. für jede VLSA mehrere Markierungen berechnet. In dieser Arbeit wurden zwischen 28 und 32 Einzeltrajektorien ausgewertet, die über einen ganzen Messtag hinweg aufgenommen worden sind, das bedeutet auch über mehrere

Steuerprogramme (z.B. Morgenprogramm). Im Zusammenhang damit ist die Fragestellung zu klären, ob es einen Zusammenhang zwischen dem Signalprogramm und den Einflussbereich gibt.

In anderen Worten ausgedrückt kann man folgende Hypothese aufstellen:

Die berechneten Einflussbereichsgrenzen sind tageszeitlich unterschiedlich vom Verkehrsflussverhalten abhängig, das in erster Linie durch die Verkehrsbelastung und vom verwendeten Steuerprogramm bestimmt ist. Vor allem das Nachtprogramm weist im Vergleich mit den anderen Tageszeitprogrammen starke Unterschiede aufgrund der verminderten Verkehrsbelastung auf.



Abbildung 33: Verkehrsbelastung für den Durchgangsverkehr entlang des Streckenzuges

Um diese Fragestellung zu klären wurden die Einflussbereichsgrenzen für ein komplettes Steuergebiet berechnet und die Ergebnisse der verschiedenen Steuerprogramme miteinander in Vergleich gebracht. Im Wesentlichen wurden die errechneten Einflussbereichsgrenzen als Abstände von der jeweiligen Haltelinie der VLSA betrachtet. Es wurde ein Streckenzug mit 9 VLSA ausgewählt, bei dem die Verkehrsbelastung tageszeitlich relativ hohen Schwankungen aufweist (siehe Abbildung 33). Als Fahrtrichtung wurde stadteinwärts gewählt.

Einflussbereichsgrenzen (Abstand von der jew. Haltelinie) [m]						
Programm	Morgen	Tag	Abend	Nacht	Mittelwert	Standardabweichung
Messfahrten	8	8	8	8		
LSA 1	81,4	96,6	76,3	89,5	85,9	9,0
LSA 2	86,3	79,5	93,6	112,3	92,9	14,1
LSA 3	106,4	111,5	88,7	114,8	105,3	11,6
LSA 4	111,7	133,6	112,3	114,6	118,0	10,5
LSA 5	99,9	84,2	139,5	81,1	101,2	26,8
LSA 6	126,4	124,0	102,4	80,9	108,4	21,3
LSA 7	97,4	99,4	140,1	135,8	118,2	22,9
LSA 8	114,5	99,2	97,5	122,8	108,5	12,2
LSA 9	88,4	105,4	102,3	130,2	106,6	17,4
Mittelwert	101,4	103,7	105,8	109,1	105,0	16,2
Standard Ab.	14,8	17,4	21,7	20,6		
Mittelwert	105,0					

Tabelle 7: Vergleich der Einflussbereichsgrenzen unterschiedlicher Signalprogramme

In Tabelle 7 sind die jeweiligen Abstände von den Haltelinien aufgelistet. Diese Abstände stellen die Einflussbereichsgrenzen für die jeweilige VLSA dar und wurden aus den Mittelwerten von jeweils 6-8 Einzelfahrtauswertungen gebildet, also insgesamt 32 Fahrten.

Es ist zu erkennen, dass es relativ hohe Schwankungen der Einflussbereichsgrenzen zwischen den einzelnen Steuerprogrammen gibt (siehe Standardabweichung in Tabelle 7). Im Mittel ist die Differenz aus dem größten und geringsten Abstand an den jeweiligen VLSA ca. 35m. In der Tabelle sind jeweils die Maximal- und Minimalabstände hervorgehoben. Diese Schwankungen zeigen, dass die berechneten Einflussbereichsgrenzen stark abhängig von den einzelnen Messfahrten sind. Es scheint als würde die Stichprobe von 32 Messfahrten nicht ausreichend zu sein, um eine Systematik erkennen zu lassen. Es zeigt sich jedenfalls hinsichtlich der verschiedenen Signalprogramme keine maßgebliche Tendenz. Auch bei Betrachtung der Mittelwerte über alle Einflussbereichsgrenzen eines Signalprogramms zeigt sich keine maßgebliche Systematik. Die exakte Halteposition die den Ursprung der Beschleunigungsfahrt darstellt ist durch die Aufstellposition (z.B. drittes Fahrzeug vor der Haltelinie), mit einer Streuung behaftet. Ebenfalls hat jede Einzeltrajektorie eine unterschiedliche Wegachse (z.B. durch Überholvorgänge oder Spurwechsel). Eine Toleranz der berechneten Einflussbereichsgrenzen von ca. +/- 10 m werden daher in Kauf genommen.

Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Einflussbereichsgrenzen nicht vom Steuerprogramm abhängig sind und hauptsächlich aufgrund der örtlichen Situation im Knotenbereich (Geometrie, Steigung, Signalgeber...) beeinflusst werden. Aus diesem Grund wurden in der weiteren Auswertung der Einflussbereichsgrenzen alle ausgewerteten Trajektorien die in einem Steuergebiet aufgenommen worden sind, verwendet, unabhängig vom jeweiligen Steuerprogramm. Die Abbildung 34 zeigt das Schema der Bereichsunterteilung auf Grundlage des zuvor vorgestellten Berechnungsalgorithmus.

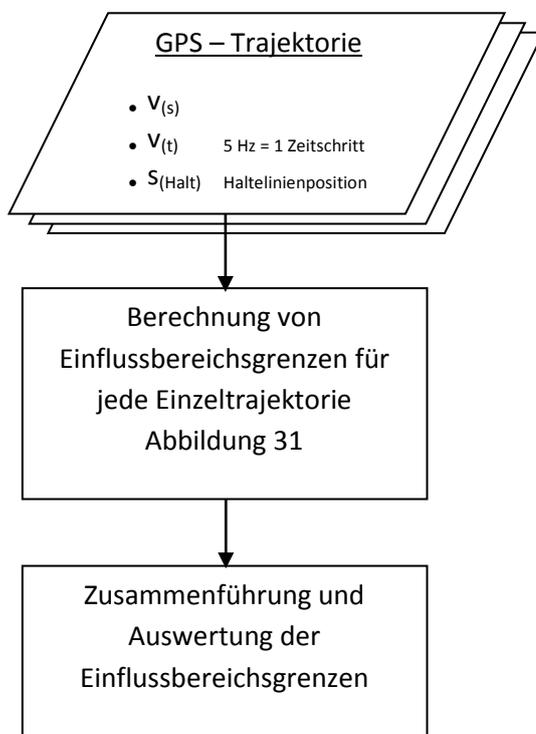


Abbildung 34: Berechnungslogik zur Bestimmung von Einflussbereichen

Das Ergebnis der Berechnungsmethode ist in Abbildung 35 beispielhaft für ein Steuergebiet zu sehen. Dabei ist zu erkennen, dass über die Summe der ausgewerteten Trajektorien eine Vielzahl an Einflussbereichsgrenzen für die jeweilige VLSA berechnet wird.

Nun kommt man jedoch zur Fragestellung, welche Grenze als repräsentativ angesehen wird. Der jeweils Minimal- bzw. Maximalabstand von der jeweiligen Haltelinie hat keine repräsentative Aussagekraft über die Gesamtanzahl der analysierten Trajektorien. Aus diesem Grund wurde das arithmetische Mittel gebildet, um alle analysierten Trajektorien miteinzubeziehen. Denkbar wäre auch einen Quantilwert zu berechnen, jedoch ist die Wahl des Quantils (25%, 50%, 75% etc.) schwierig und nicht eindeutig zu begründen, deshalb wurde davon abgesehen.

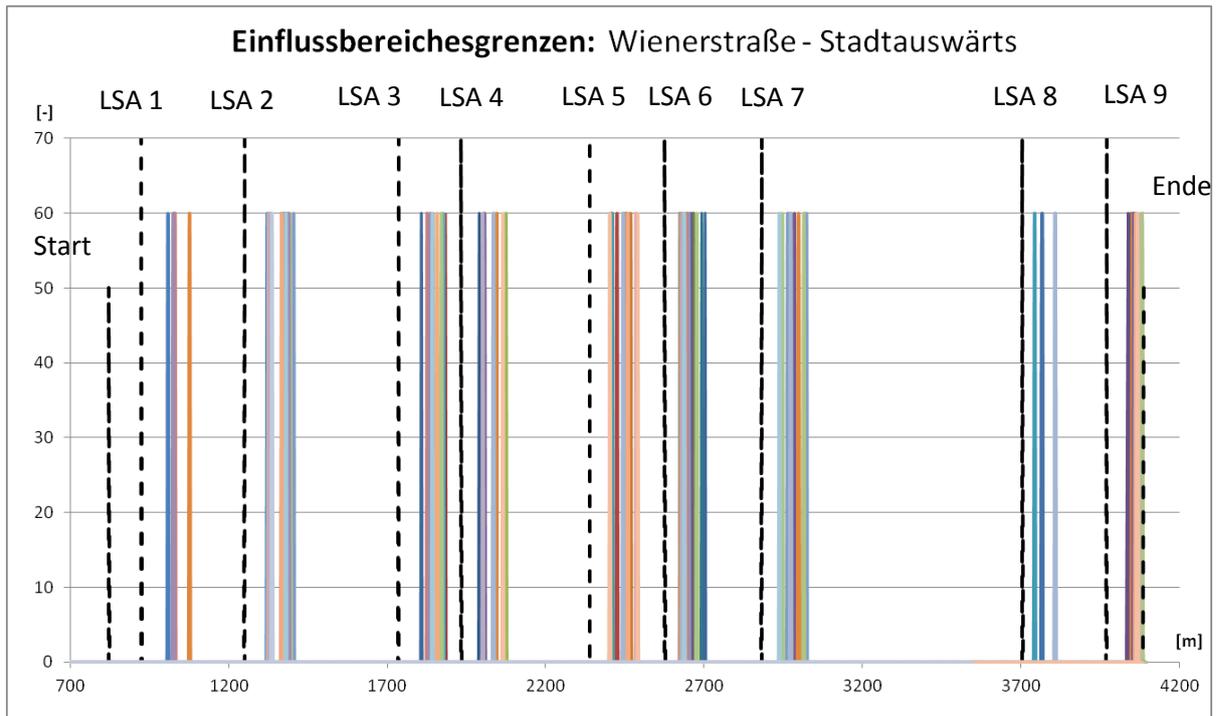


Abbildung 35: Alle berechneten Einflussbereichsgrenzen eines Tages

Auffällig bei der Auswertung der berechneten Einflussbereichsgrenzen ist die relativ geringe Streuung. Vergleicht man den Abstand der festgelegten Einflussgrenze (z. B. arithmetisches Mittel über alle Einzeltrajektorien) zu Haltelinie der jeweiligen LSA, lässt sich erkennen, dass die maximal auftretenden Differenzen in einem Bereich von ca. 10m liegen (siehe Tabelle 7). Das bedeutet, dass Einflussbereichsgrenzen in den meisten Fällen auch als festgelegte Abstände von der Haltelinie definiert werden können, wenn man eine Ungenauigkeit von +/- 10m in Kauf nimmt.

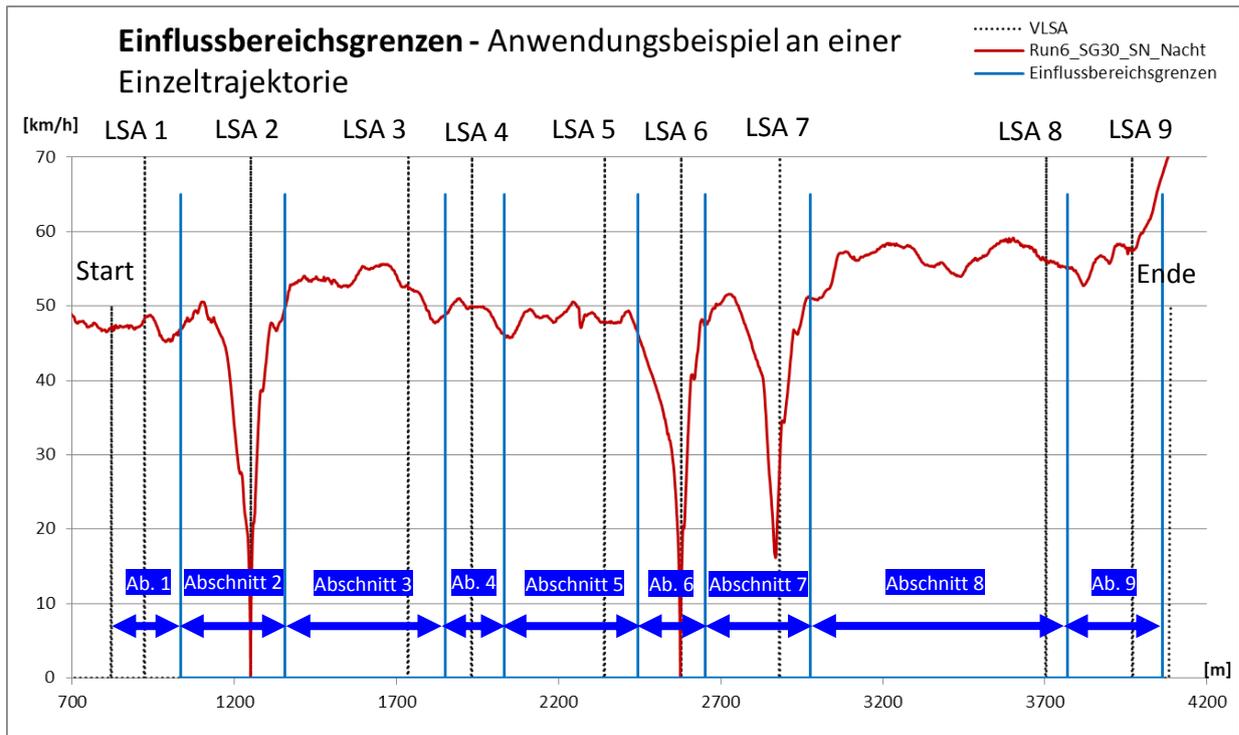


Abbildung 36: Abschnittseinteilung am Beispiel eines Geschwindigkeitsprofils

Abbildung 36 zeigt die Anwendung der berechneten Einflussbereichsgrenzen am Beispiel einer Einzeltrajektorie. Zu sehen sind auch Abschnittsgrenzen in Bereichen keiner markanten Geschwindigkeitsänderungen (z.B. LSA 3).

Überprüfung des 3. Verfahrens anhand von Anfahrten aus dem Stillstand

Um das 3.Verfahren zu überprüfen werden die Einflußbereichsgrenzen anhand ausgewählter Trajektorienverläufen bestimmt. Im Detail werden nur Einflussbereichsmarkierungen weiterverarbeitet, die aufgrund eines vorherigen Haltevorganges entspringen. Damit sollen sichergestellt werden, dass die Abschnittsgrenzen ausschließlich anhand von Beschleunigungsvorgängen aus dem Stillstand bzw. sehr niedrigem Geschwindigkeitsniveau (< 10km/h) berechnet werden. Das setzt aber voraus, dass man für jede VLSA entlang der Strecke solche Beschleunigungsfahrten aus dem Stillstand zu Verfügung hat. Dies hängt stark von den Steuerungsprogrammen ab und kann nicht immer garantiert werden. Als repräsentativ gilt hier eine Mindeststichprobe von 3 Beschleunigungsvorgängen aus dem Stillstand. Sind diese nicht aus den Messfahrten zu entnehmen, so müssen sie durch gezielte Messfahrten, bei denen man vor der LSA zum Halten kommt, generiert werden.

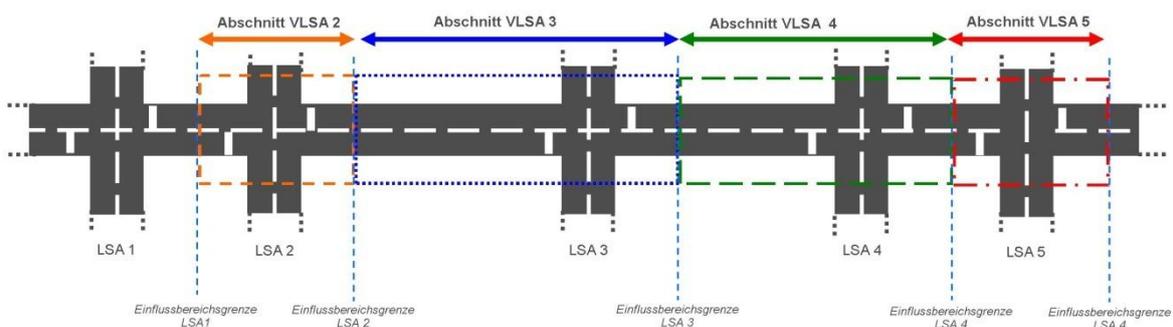


Abbildung 37: Abschnittseinteilung anhand von Einflussbereichen aus den Fahrtverläufen und Anfahrtsbeschleunigung

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Einflussbereichsgrenzen der einzelnen VLSA ist also dieselbe wie bei dem zuvor erläuterten Verfahren, mit dem Unterschied, dass die Abschnittsmarkierungen nur anhand von Anfahrtsbeschleunigungen berechnet werden. Im Wesentlichen soll damit verglichen werden, ob maßgebliche Unterschiede zum vorigen Berechnungsverfahren zu erkennen sind.

Die in diesem Verfahren errechneten Abschnittsgrenzen sind charakteristisch für typische Anfahrtsvorgänge, die auch in Hinblick auf die weiter Verarbeitung von Kenngrößen (Beschleunigungen, Verlustzeiten...) einzuhalten sind.

Im Folgenden wird ein Vergleich zwischen dem 3. Verfahren und der vorher vorgestellten Berechnungsmethode diskutiert: Es ist zu erkennen, dass sich bei einem Großteil der repräsentativen VLSA (d. h. bei mehr als 3 Anfahrtsbeschleunigungen) die Einflussgrenzen, bei der Abschnittsbestimmung mittels Anfahrtsbeschleunigungen, verkürzen. Das bedeutet: repräsentative Beschleunigungsvorgänge aufgrund eines Haltevorganges sind vor dem Erreichen der Bereichsgrenzen aus dem 3. Verfahren abgeschlossen. Weil für die emissionstechnische Betrachtung vor allem diese starken Beschleunigungsvorgänge relevant sind, kann davon ausgegangen werden, dass diese mit dem 3. Verfahren, in den dabei festgelegten Einflussbereich enthalten sind.

Zusammenfassende Anmerkungen:

Im Allgemeinen wurde erkannt, dass sich eine Abschnittsunterteilung eines Streckenzuges in Einflussbereiche einzelner VLSA als komplexe Aufgabenstellung herausgestellt hat. Die in dieser Arbeit vorgestellten und angewendeten Verfahren stellen pionierhafte Ansätze dar, die keinesfalls ausgeforscht sind. Es wird empfohlen, in weiteren Projekten dieser Fragestellung weiter nachzugehen.

Das 3. Verfahren zur Einflussbereichsbestimmung ergibt augenscheinlich relativ gute und plausible Ergebnisse. Es hat sich jedoch gezeigt, dass es bei großen Entfernungen zwischen zwei VLSA zu nicht eindeutig festlegbarer Beeinflussungen des Fahrzeuglenkers kommt. Bei großen Distanzen zwischen zwei VLSA (ab ca. 300m), verschmieren die Einflussbereiche der Strecke und die der VLSA. Man kann nicht mehr klar unterscheiden, ob der Fahrzeuglenker noch von der VLSA oder durch den großen Abstand zur nächsten VLSA beeinflusst wird. Bei größeren Abständen wird also die Fahrt eher von der Strecke (Fahrstreifen, Fahrstreifenbreiten, Verkehrsaufkommen, Verkehrsteilnehmer usw.) beeinflusst.

In Anbetracht der weiteren Kenngrößenermittlung und Verarbeitung der Trajektorien wird das 3. Verfahren für die weitere Arbeit favorisiert. Der ausschlaggebende Vorteil von diesem Verfahren ist ein möglicher Vergleich, der aus den Trajektorien berechneten fahrdynamischen Kennwerte (Beschleunigungen, Verlustzeiten,...). Da jeder Abschnitt eindeutig einer einzelnen VLSA zugeordnet ist, können die daraus gewonnen Kenngrößen direkt zugeordnet werden. Durch Aufsummieren der in den Abschnitten berechneten Größen können ganze Streckenzüge wieder hergestellt werden.

Die fahrdynamischen Kenngrößen, die mit der Abschnittseinteilung anhand des 1. Verfahrens, berechnet wurden, können im Gegensatz nicht sinnvoll aufsummiert werden, weil sich die Abschnitte gegenseitig überlappen. Das 1. Verfahren ist daher für die weitere Auswertung und Analyse unbrauchbar. Weil vor allem die Beschleunigungsvorgänge kurz vor der Haltelinie beginnen und über die Haltelinie hinaus anhalten, ist auch das 1. Verfahren ohne Überlappung unbrauchbar. Im Folgekapitel 3.3.2 werden u.a. die hier beschriebenen Verfahren zur Einflussbereichseinteilung über eine Betrachtung von fahrdynamischen Kenngrößen und andererseits simulierten Schadstoffemissionen miteinander in Vergleich gebracht. Ziel der Untersuchung ist, das geeignetste Verfahren zur Einflussbereichseinteilung auch über statistische Methoden (Varianzanalyse) zu erheben.

3.2 Vorstellung der untersuchten fahrdynamischen Kenngrößen

Die hier beschriebenen Kenngrößen werden anhand der Trajektorien berechnet. Dafür wurde ein computerunterstützter automatisierter Berechnungsalgorithmus auf Basis von R-Statistics entwickelt.

Die verwendeten fahrdynamischen Kenngrößen stammen einerseits aus klassischen Bewertungsgrößen des Verkehrsablaufes als auch aus Untersuchungen des Fahrverhaltens. Alle Größen lassen sich anhand empirischer Formeln aus dem Fahrverlauf berechnen bzw. ableiten. Die Größen sind teilweise absolute Werte oder relativ zur Gesamtzeit bzw. zur Gesamtstrecke.

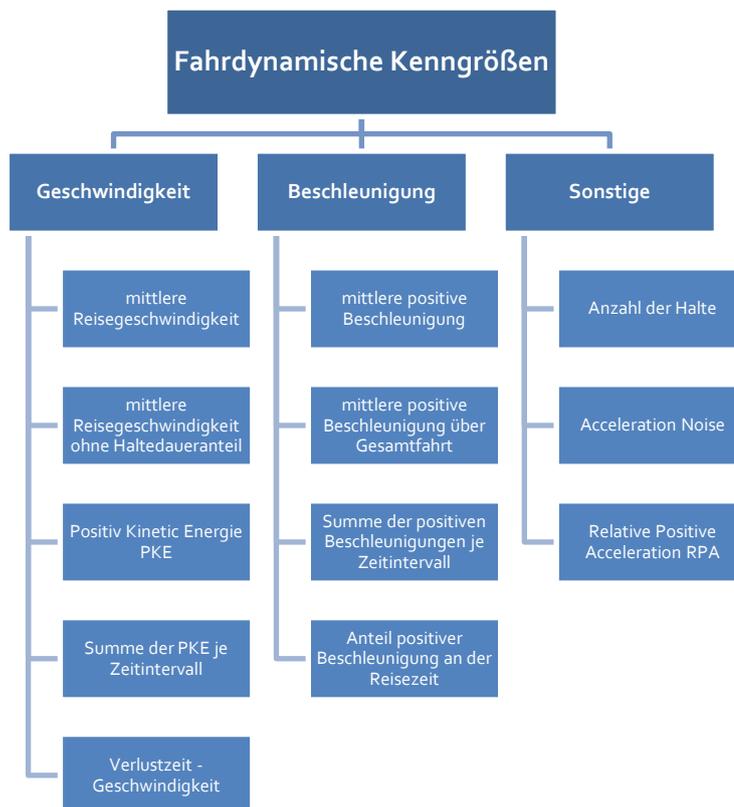


Abbildung 38: Abschnittseinteilung anhand von Einflussbereichen aus den Fahrtverläufen und Anfahrtsbeschleunigung

Geschwindigkeitskenngrößen:

- Mittlere Reisegeschwindigkeit $v_{m,Reise}$

Die mittlere Reisegeschwindigkeit errechnet sich als Quotient der gesamten zurückgelegten Wegstrecke s_{ges} des Abschnittes durch die dafür benötigte Reisezeit t_{ges} .

$$v_{m,Reise} = \frac{s_{ges}}{t_{ges}} \quad [m/s] \quad (12)$$

Mithilfe der mittleren Reisegeschwindigkeit können Strecken oder Streckenabschnitte miteinander in Vergleich gebracht werden, da diese Größe relativ zur Gesamtlänge ist.

- Mittlere Reisegeschwindigkeit ohne Haltedauer $v_{m,netto}$

Die mittlere Reisegeschwindigkeit exklusive der Haltedauer errechnet sich als Quotient der gesamten zurückgelegten Wegstrecke s_{ges} des Abschnittes durch die reine Fahrzeit t_{fahrt} . Die reine Fahrzeit wird dabei definiert als Zeit, in der sich das Fahrzeug schneller als 3 km/h fortbewegt.

$$v_{m,netto} = \frac{s_{ges}}{t_{Fahrt}} \quad [\text{m/s}] \quad (13)$$

- Positiv kinetische Energie PKE

Die kinematische Kenngröße PKE wird hauptsächlich für Untersuchungen von Verbrennungskraftmaschinen. Mithilfe dieser Größe ist es u.a. möglich verschiedene Fahrmodi (z.B. Bremsen, Stillstand, Cruising...) anhand eines Geschwindigkeitsverlaufes zu unterscheiden (Vgl. Konstantas G., 2004). Die Kenngröße selbst geht auf die Arbeit von Watson (1995), zurück.

Diese Größe wurde in dieser Arbeit deshalb verwendet, weil sie sehr sensibel auf starke Beschleunigungsvorgänge reagiert und davon ausgegangen wird, dass starke Beschleunigungsvorgänge einen Zusammenhang mit Schadstoffemissionen haben. PKE errechnet sich aus der quadratischen Geschwindigkeitsdifferenz, gebrochen durch die dabei verstrichene Strecke. Wohlgermerkt nur während das Fahrzeug sich in einem positiven Beschleunigungsvorgang befindet. Um einen PKE-Wert für einen Zyklus zu berechnen wurde in dieser Arbeit ein Mittel über alle Einzelwerte gebildet.

$$\text{PKE} = \frac{v_{i+1}^2 - v_i^2}{\Delta x} \quad \text{wenn} \quad \frac{dv}{dt} > 0 \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (14)$$

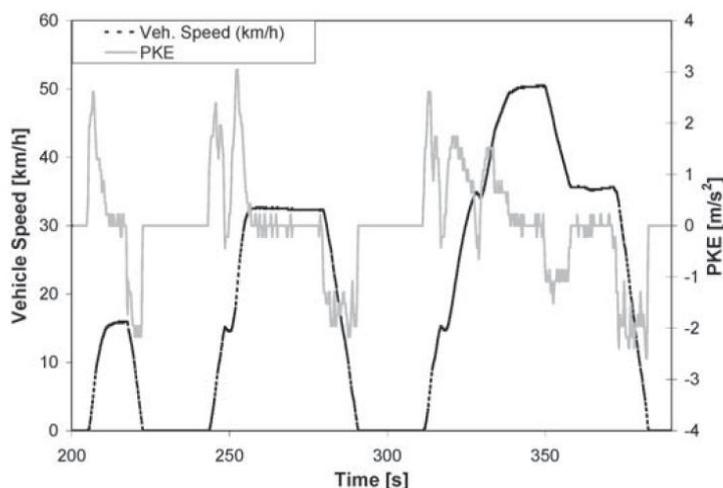


Abbildung 39: Grafische Darstellung des PKE in Abhängigkeit zur Geschwindigkeitsganglinie (Konstantas G., 2004, S. 904)

Im Anhang A5 ist die Anwendung der hier vorgestellten Kenngrößen auf die untersuchten Grazer Hauptverkehrsstraßen (siehe Anhang A1), in Form der Berechnungsergebnisse, tabellarisch dargestellt.

- Summe der Positiv kinetische Energie PKE_{sum}

Als weitere Kenngröße wurde eine Abwandlung des vorhin vorgestellten PKE untersucht. Dabei werden die für jeden Zeitschritt berechneten PKE-Einzelwerte aufsummiert und nicht wie vorhin zur Mittelwertbildung verwendet. Die Summe soll dabei einen Zusammenhang mit den positiven Beschleunigungsvorgängen zeigen.

$$PKE_{sum} = \sum PKE_n \quad [m^2/s] \quad (15)$$

Mit: PKE_N ...PKE-Einzelwerte je Berechnungsschritt (0,2sek bei 5 Hz)

- Verlustzeitgeschwindigkeit $v_{verlust}$

Diese Kenngröße wurde anhand des Zeitverlustes bei der Durchfahrt eines Abschnittes t_{ges} im Vergleich zu einer konstanten Fahrt mit einer Wunschgeschwindigkeit v_{wunsch} bestimmt. Die Geschwindigkeit der konstanten Fahrt wurde mit 50 km/h gewählt, da dies häufig als Geschwindigkeitsbegrenzung an innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen gilt und andererseits ein für Laien und Experten greifbares Geschwindigkeitsniveau darstellt. Die Verlustzeitgeschwindigkeit ist jene Geschwindigkeit die gefahren werden müsste, um den Abschnitt innerhalb der Verlustzeit $t_{verlust}$ zu durchfahren. Der Hintergrund war, eine relative Größe zu entwickeln, die abhängig von der Verlustzeit ist und einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Abschnitten ermöglicht. Je kleiner die Verlustzeitgeschwindigkeit ist, desto größer war der Zeitverlust im Vergleich zur konstanten Fahrt mit v_{wunsch} . Die Idee hinter dieser relativen Größe war die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Schadstoffemissionen und Verlustzeiten.

$$t_{verlust} = t_{ges} - t_{vwunsch} \quad \text{mit } v_{wunsch} = 50 \text{ km/h} \quad (16)$$

$$v_{verlust} = \frac{s_{ges}}{t_{verlust}} \quad [m/s]$$

Beschleunigungskenngrößen:

- Mittlere positive Beschleunigung $a_{pos,avg}$

Der Mittelwert der positiven Beschleunigung wird über den gesamten betrachteten Abschnitt berechnet. Dabei werden lediglich die Beschleunigungen berücksichtigt, die positiv sind.

$$a_{pos,avg} = \frac{\sum a_i^+}{i^+} \quad [m/s^2] \quad (17)$$

wobei $a_i^+ = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}$, $(v_2 - v_1) > 0$

- Mittlere positive Beschleunigung über die Gesamtfahrt $a_{pos,avg,ges}$

Im Gegensatz zur mittleren positiven Beschleunigung $a_{pos, avg}$ wird der Mittelwert nicht nur über die Anzahl der positiven Beschleunigungswerte sondern über die gesamte Wegstrecke gebildet also über i_{ges} .

$$a_{pos,avg,ges} = \frac{\sum a_i^+}{i_{ges}} \quad [m/s^2] \quad (18)$$

wobei $a_i^+ = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}, \quad (v_2 - v_1) > 0$

- Summe der positive Beschleunigung $a_{pos,sum}$

Bei dieser Kenngröße wird die Summe aller positiven Einzelbeschleunigungen gebildet.

$$a_{pos,sum} = \sum a_i^+ \quad [m/s^2] \quad (19)$$

wobei $a_i^+ = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}, \quad (v_2 - v_1) > 0$

- Anteil der Fahrt mit positiver Beschleunigung $P_{a,pos}$

Hierbei wird der prozentuelle Anteil der Fahrt gebildet bei dem eine positive Beschleunigung vorherrscht.

$$P_{a,pos} = \frac{\text{Anz.der Zeitschritte mit pos.Beschleunigung}}{\sum \text{Zeitschritte}} \quad [-] \quad (20)$$

Sonstige Kenngrößen:

- Anzahl der Haltevorgänge während einer Fahrt **AnzHalte**

Die Anzahl der Halte innerhalb eines Fahrzyklus ist eine wichtige Kenngröße z. B. zur Bestimmung des Koordinierungsmaßes (siehe Kapitel 2.4). Zur Bestimmung dieser Größe ist es notwendig einen Halt zuvor zu definieren. In der Literatur wird der sog. Idling-Mode (Leerlauf) in der Beschreibung von Fahrverhalten unter einer Grenzgeschwindigkeit von $v_{idle} = 0$ bis 3 km/h, angegeben (z. B.. Hung et.al., 2004). Für diese Arbeit wird die Grenzgeschwindigkeit eines Haltevorganges mit 3 km/h festgelegt. Dies lässt sich aufgrund der steigenden Ungenauigkeit der Geschwindigkeitsaufzeichnung bei niedrigem Geschwindigkeitsniveaus während der Aufzeichnung mit GPS-Logger (siehe Kapitel 5.1) begründen. Um kurzzeitige Schwankungen (< 1 sek) im Geschwindigkeitsverlauf der GPS-Trajektorie auszugleichen, wurde neben der Grenzgeschwindigkeit auch eine zeitliche Bedingung, t_{idle} eingeführt.

Ein Halt ist damit definiert, dass die Geschwindigkeit für mehr als 2 sek kleiner oder gleich 3 km/h ist. Ein umfassender Vergleich und Überprüfung der damit berechneten Haltevorgänge mit händischen Aufzeichnungen während der Messfahrt wird in Abschnitt 3.4.2 beschrieben.

$$Halt = \begin{cases} v_{idle} \leq 3 \text{ km/h} \\ t_{idle} \geq 2 \text{ sek} \end{cases} \quad [-] \quad (21)$$

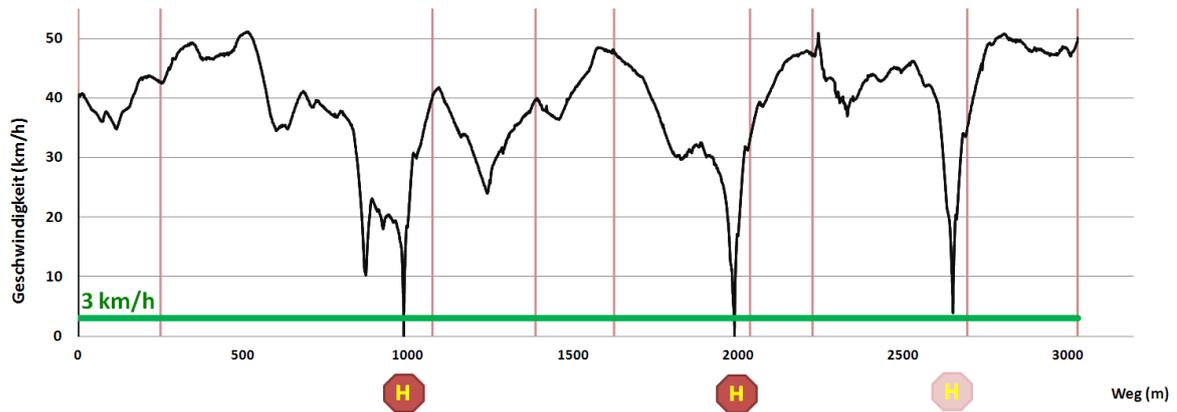


Abbildung 40: Bestimmung der Haltevorgänge anhand des Geschwindigkeitsverlaufes

- Acceleration Noise (Beschleunigungsrauschen) Acc Noise

Die Standardabweichung der Beschleunigung eines Fahrzeugs in einem Verkehrsstrom wird auch als Acceleration Noise bezeichnet. Dieser Parameter wird u.A. dafür verwendet, um den Verkehrsfluss unter verschiedenen Bedienungen (Straßentyp, Verkehrsbelastungsänderungen) zu erforschen (Vgl. Eisele, 1996). Dieser Parameter geht auf Leutzbach (1987), zurück wonach er ein guter Indikator für den Verkehrsfluss, der auch von der Verkehrsdichte abhängig ist. Die weitere Untersuchung dieses Parameters soll zeigen ob er sich auch für die Bewertung von Streckenzügen oder VLSA eignet.

$$\text{Acc Noise} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum (a(t) - a_{\text{mean}})^2} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (22)$$

- Relative Positive Acceleration RPA

Diese Kenngröße wird dazu verwendet um Beschleunigungsvorgänge während eines Fahrzyklus zu beschreiben. RPA ist ein Mittelwert der positiven Beschleunigungen in Verbindung mit der dabei gefahrenden Geschwindigkeit eines Fahrzeuges. Diese Kenngröße soll direkt von der durchschnittlichen Beschleunigungsenergie abhängig sein (Vgl. Pelkmans, 2001).

$$\text{RPA} = \frac{1}{x} \sum a_i^+ v_i \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

wobei $a_i^+ = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}, (v_2 - v_1) > 0$ (23)

T ... Gesamtdauer des Fahrzyklus

3.3 Korrelationsanalyse

Mithilfe der Korrelationsanalyse in Form einer Regressionsanalyse soll der Zusammenhang zwischen simulierten Schadstoffemissionen und zuvor vorgestellten kinematischen Kenngrößen aus dem Fahrtverlauf (Kapitel 3.2) untersucht werden.

In einem ersten Schritt werden über eine Korrelationsanalyse (lineare Regression) diejenigen Kenngrößen bestimmt, die eine große Abhängigkeit zu Schadstoffemissionen aufweisen.

Ein weiterer Arbeitsschritt der Korrelationsanalyse ist die Untersuchung der in Abschnitt 3.1 vorgestellten Verfahren zur Bereichseinteilung von Streckenzügen in Einflussbereiche von VLSA. Dabei soll anhand statistischer Methoden das geeignetste Verfahren ermittelt werden. Im Wesentlichen werden von jedem Verfahren der Einflussbereichsdefinition signifikante Abhängigkeiten zu relevanten fahrdynamischen Kenngrößen miteinander verglichen.

In der Abbildung 41 ist der schematische Prozess der Korrelationsanalyse samt Ein- und Ausgangsgrößen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Berechnung der fahrdynamischen Kenngrößen sowie die Schadstoffberechnung anhand derselben Eingangsdaten (aufgezeichnete GPS-Trajektorien) erfolgen.

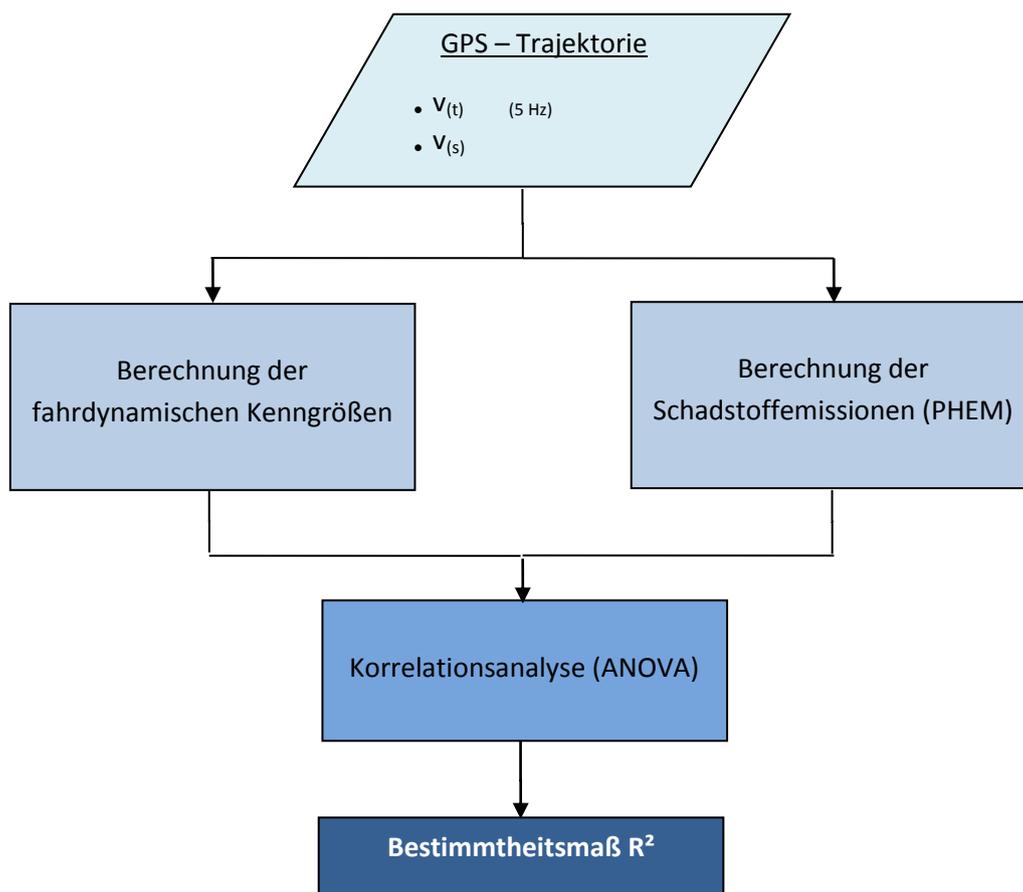


Abbildung 41: Schematische Darstellung der Korrelationsanalyse

3.3.1 Emissionsbezogene Regressionsanalyse der fahrdynamischen Kenngrößen

Wie zuvor beschrieben soll mittels einer Regressionsanalyse der Zusammenhang zwischen den fahrdynamischen Kenngrößen aus Kapitel 3.2 und den simulierten Schadstoffemissionen (PHEM) untersucht werden. In erster Linie wird dabei Augenmerk auf den Kraftstoffverbrauch und NO_x Ausstoß gelegt (siehe Kapitel 3.2.). Vorrangiges Ziel der Untersuchung ist die Identifikation einer fahrdynamischen Kenngröße, die eine große lineare Abhängigkeit zu den Schadstoffkennwerten aufweist. Diese fahrdynamische Kenngröße wird in weiterer Folge als Eingangsgröße für die Qualitätsbewertung der Hauptverkehrsstraße verwendet („Emissionskenngröße“).

Im Allgemeinen stellt die Regressionsanalyse ein außerordentlich vielseitiges und flexibles Analyseverfahren dar, dass sowohl für die Beschreibung als auch für die Erklärung von Zusammenhängen als auch für Prognosen große Bedeutung besitzt. Sie kommt zur Anwendung, wenn Wirkungsbeziehungen zwischen einer abhängigen und einer (oder mehrerer) unabhängigen Variablen, untersucht werden sollen. Mit Hilfe der Regressionsanalyse können Zusammenhänge quantifiziert und damit weitgehend exakt beschrieben werden. Darüber hinaus lassen sich durch dieses statistische Verfahren Hypothesen und Wirkungsbeziehungen prüfen.

Mit Hilfe der linearen Regressionsanalyse kann der Grad des (linearen) Zusammenhangs zwischen zwei oder mehreren Variablen durch statistische Maßzahlen bestimmt werden. Dabei werden die Variablen, abgeschätzt und nach der Methode der kleinsten (Fehler-)Quadrate nach Gauß wird die quadratische Abweichungssumme minimiert. In anderen Worten ausgedrückt wird der Zusammenhang zwischen den zu untersuchenden Variablen anhand des Minimums aus der Summe der quadratischen Abweichungen bestimmt. (Vgl. Fellendorf, 2004).

Für diese Untersuchung wurde die statistische Methode der einfachen linearen Regression mit Varianzanalyse gewählt, weil diese Methode für einfache Zusammenhänge zwischen, einer abhängigen und einer unabhängigen Größe am geeignetsten ist und in Theorie und Praxis oft zum Einsatz kommt. Die größte Abhängigkeit wird durch ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=1$, überhaupt kein Zusammenhang mit $R^2=0$, erreicht. Ein $R^2=1$ bedeutet beispielsweise, dass die unabhängige Variablen zu 100% durch die abhängige Größe erklärt werden kann. Der dabei errechnete Zusammenhang wird in weiterer Folge noch über die Vertrauenswahrscheinlichkeit (Signifikanzniveau) geprüft. Das Signifikanzniveau oder p-Wert ist ein statistisches Gütemaß, die als Testmethode (t-Test) von linearen Regressionsmodellen verwendet wird. Sie wird benutzt um Hypothesen mit einer akzeptierten Irrtumswahrscheinlichkeit zu überprüfen (Vgl. Auer, 2011).

In der verwendeten Statistiksoftware „R-Statistic“ wird das Signifikanzniveau neben dem p-Wert durch eine 4-stufige Bewertungsskala ausgegeben. Dabei bedeutet *** sehr hohe Signifikanz und kein * eine hohe Irrtumswahrscheinlichkeit, sodass die Hypothese verworfen werden muss.

Als Datenbasis der Untersuchung dienen reale GPS-Trajektorien im Grazer Stadtgebiet (siehe Anhang A1). Alle Streckenzüge haben eine ähnliche Charakteristik und können als innerstädtische Hauptverkehrsstraßen mit größtenteils vorhandener Koordinierung der VLSA bezeichnet werden. Insgesamt wurden 410 Einzeltrajektorien zu unterschiedlichsten Tageszeiten aufgezeichnet, sodass die Datengrundlage ein weites Spektrum an Verkehrszuständen und Belastungen aufweist.

Als Hypothese gilt: *Die Schadstoffemissionen sowie der Kraftstoffverbrauch entlang eines signalisierten Streckenzuges einer innerstädtischen Hauptverkehrsstraße sind im hohen Maße abhängig von starken Beschleunigungsvorgängen wie z.B. bei Anfahrten aus dem Stillstand.*

In folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der Korrelationsanalyse samt Punktwolkenplots und Regressionsgerade sowie die dazugehörigen Signifikanzniveaus und Bestimmtheitsmaße für

ausgewählte fahrdynamische Kenngrößen ($v_{m,reise}$, $v_{m,netto}$, RPA und $a_{pos,avg}$) dargestellt. Jede ausgewertete Messfahrt entlang eines Streckenzuges entspricht dabei einem Datenpunkt der Punktwolke.

Im Anhang A2 befinden sich die hier nicht dargestellten Auswertungen.

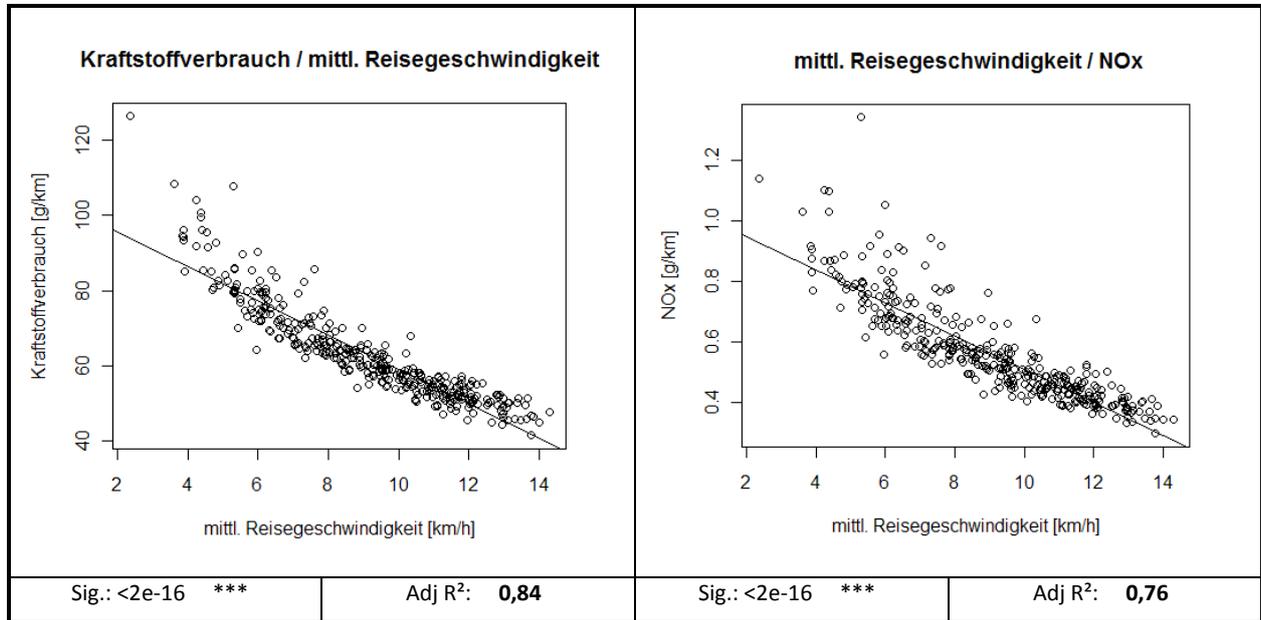


Abbildung 42: Korrelationsanalyse der Kenngröße mittlere Reisegeschwindigkeit, N=410

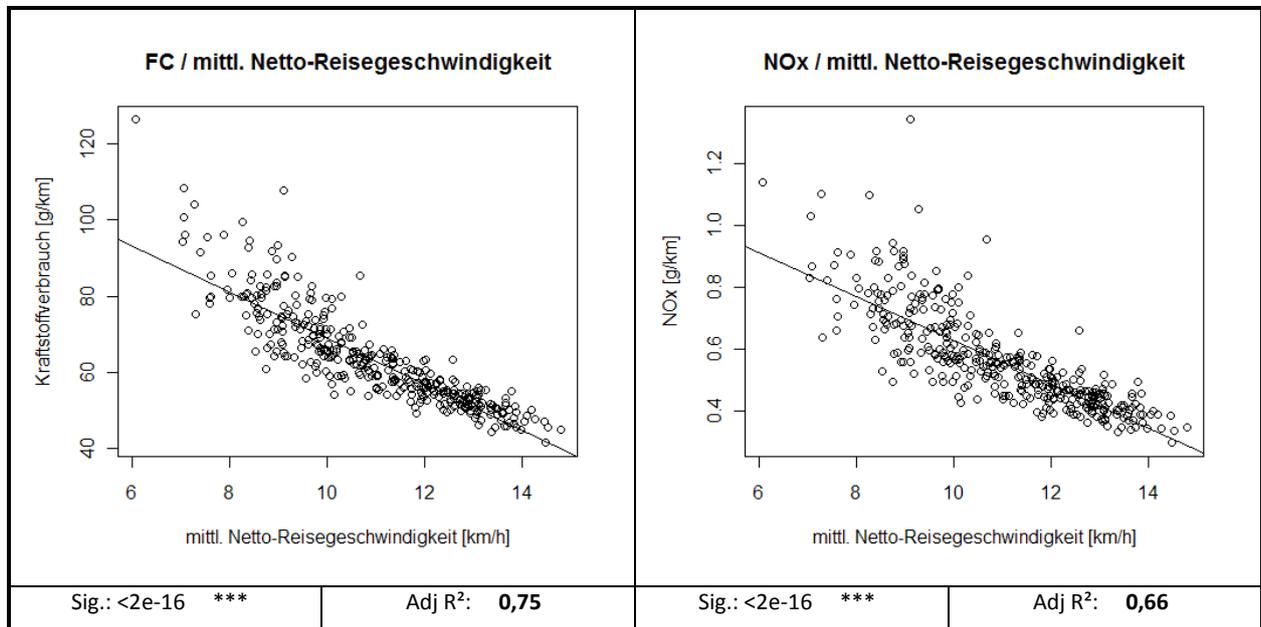


Abbildung 43: Korrelationsanalyse der Kenngröße durchschnittliche Positive Beschleunigung N=410

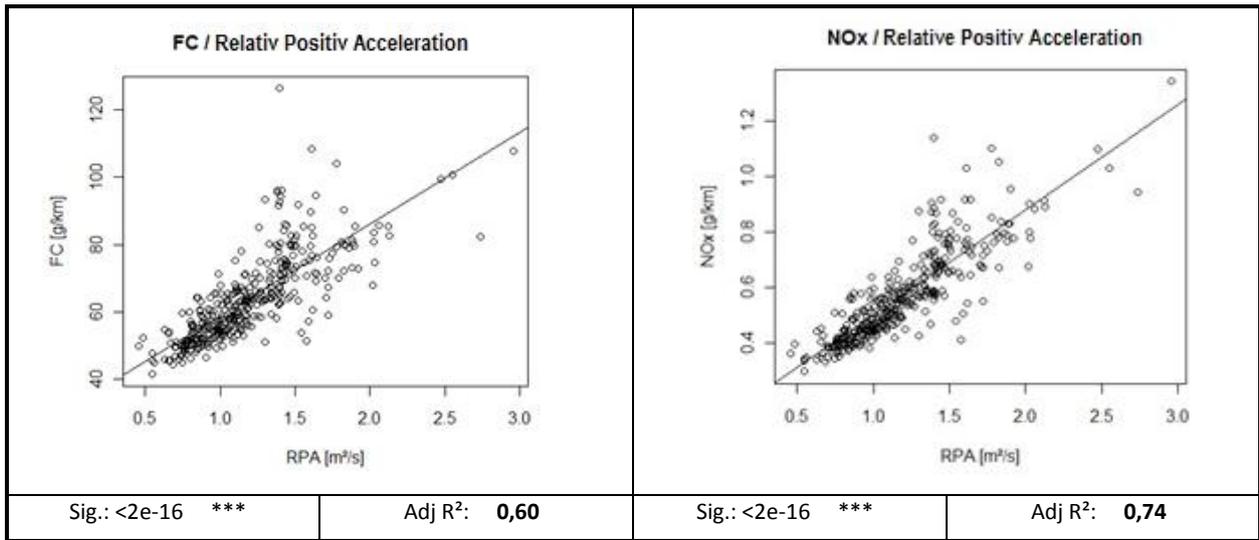


Abbildung 44: Korrelationsanalyse der Kenngröße Relativ positiv Acceleration, N=410

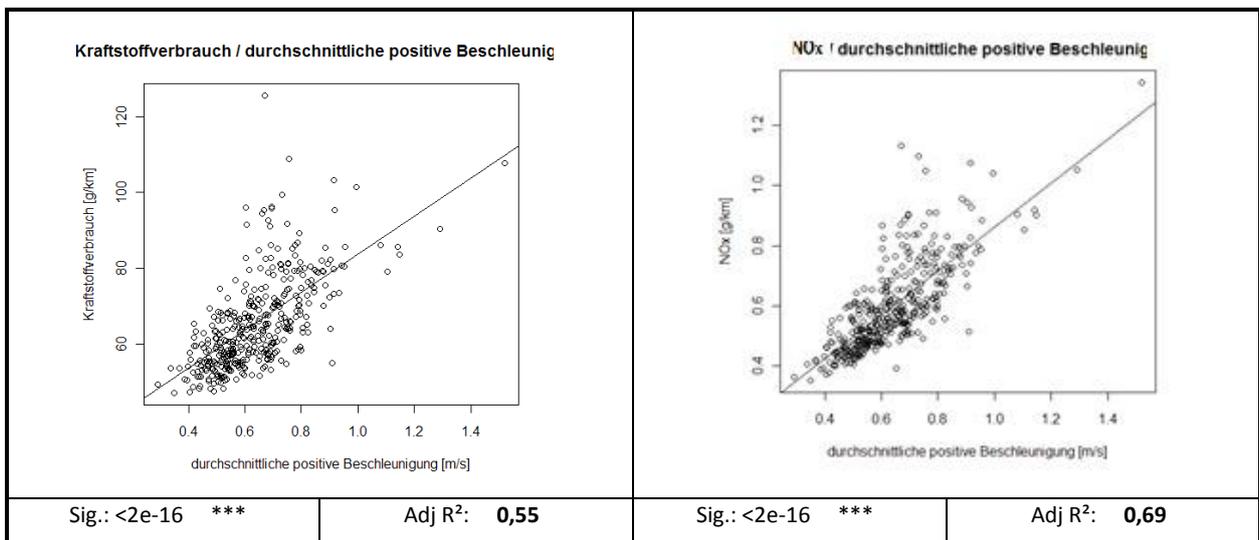


Abbildung 45: Korrelationsanalyse der Kenngröße Summe PKE, N=410

In der Tabelle 8 sind alle Ergebnisse der Korrelationsanalyse zusammengefasst. Neben den vorrangig untersuchten Emissionswerten Kraftstoffverbrauch und NOx-Ausstoß, sind auch Korrelationen von CO und Partikel ausstoß PM zu den fahrdynamischen Kenngrößen enthalten. Die letzte Spalte gibt den Mittelwert über alle Bestimmtheitsmaße wieder. Hier ist schnell ersichtlich, welche Kenngröße große Abhängigkeiten zu allen Schadstoffemissionswerten aufweist. In erster Linie sind dies die mittlere Reisegeschwindigkeit $v_{m,Reise}$, die mittlere Reisegeschwindigkeit ohne Stillstandsanteile $v_{m,netto}$ sowie die durchschnittliche positive Beschleunigung $a_{pos,avg}$ und die RPA.

Ergebnisse der Korrelationsanalyse									
Emissionen	FC		NOx		CO		PM		AVG
kinem. Kenngröße	Signifikanz	adj. R ²	Signifikanz	adj. R ²	Signifikanz	adj. R ²	Signifikanz	adj. R ²	
$v_{m,Reise}$	<2e-16 ***	0.84	<2e-16 ***	0.76	<2e-16 ***	0.75	<2e-16 ***	0.82	0.79
$v_{m,netto}$	<2e-16 ***	0.75	<2e-16 ***	0.66	<2e-16 ***	0.67	<2e-16 ***	0.78	0.71
$v_{Verlust}$	0.00011 ***	0.03	0.0003 ***	0.03	0.0033 ***	0.03	0.000101 ***	0.03	0.03
PKE	0.00982 *	0.01	0.436	0.001	0.293	0.00	0.00127 **	0.02	0.01
PKE _{Sum}	0.007588 *	0.01	0.129	0.00	0.3053	0.00	0.00293 **	0.02	0.01
$a_{pos,avg}$	<2e-16 ***	0.55	<2e-16 ***	0.69	<2e-16 ***	0.72	<2e-16 ***	0.49	0.61
$a_{pos,avg,ges}$	<2e-16 ***	0.24	<2e-16 ***	0.38	<2e-16 ***	0.42	<2e-16 ***	0.22	0.32
$a_{pos,sum}$	5.6e-13 ***	0.12	4.2e-14 ***	0.13	<2e-16 ***	0.15	7.96e-06 ***	0.11	0.13
$P_{a,pos}$	0.002108 **	0.02	0.0015 **	0.02	1.41e-5 ***	0.04	3.5e-05 ***	0.04	0.03
AnzHalte	<2e-16 ***	0.47	<2e-16 ***	0.43	<2e-16 ***	0.46	<2e-16 ***	0.45	0.45
RPA	<2e-16 ***	0.60	<2e-16 ***	0.74	<2e-16 ***	0.75	<2e-16 ***	0.54	0.66
Acc Noise	<2e-16 ***	0.37	<2e-16 ***	0.53	<2e-16 ***	0.53	<2e-16 ***	0.33	0.44

Tabelle 8: Zusammenfassung der Korrelationsanalyse (Streckenzüge)

Im folgenden werden die Ergebnisse interpretiert und diskutiert:

- Es ist deutlich erkennbar, dass der statistische Zusammenhang zwischen der Anzahl an Haltevorgängen entlang eines Streckenzuges und den Schadstoffemissionen bzw. dem Kraftstoffverbrauch nicht wie in der Hypothese angenommen am größten ist. Es ist zwar eine signifikante Abhängigkeit aufgezeigt worden, jedoch liegt das Bestimmtheitsmaß und damit der erklärte Teil der Varianz zwischen 47% und 43 %. Die Halteanzahl allein erklärt also den Schadstoffausstoß bzw. den Kraftstoffverbrauch entlang eines Streckenzuges im Mittel nur zu 45%. In weiterer Folge kann durch eine Qualitätsbewertung anhand der Haltevorgänge (HBS oder Schnabel, siehe Kapitel 2.4) nur eine beschränkte Aussage über Schadstoffemissionen getroffen werden.
- Die fahrdynamischen Kenngrößen, die sensibel auf starke Beschleunigungsvorgänge reagieren (PKE, Summe PKE) zeigen keine Abhängigkeiten und sind aufgrund des sehr geringen Signifikanzniveaus nicht weiter relevant.
- Das Bestimmtheitsmaß der aufsummierten Beschleunigungsvorgänge liegt trotz großteils hohem Signifikanzniveaus im Bereich von 12% bis 13% beim Kraftstoffverbrauch sowie NOx-Ausstoß. Dieses Ergebnis widerlegt die zuvor getroffene Hypothese, dass die Schadstoffemissionen sowie der Kraftstoffverbrauch allein durch die

Beschleunigungsvorgänge erklärt werden können. Deshalb eignen sich diese fahrdynamischen Kenngrößen ebenfalls nicht zur Erklärung der Schadstoffemissionen sowie des Kraftstoffverbrauches bzw. als „Emissionskenngröße“ im Bewertungssystem.

- Auffällig ist die hohe Differenz der Varianzerklärung bei den beiden durchschnittlichen Beschleunigungskenngrößen, $a_{\text{pos,avg,ges}}$ und $a_{\text{pos,avg}}$ beiderseits bei sehr hohem Signifikanzniveau. Das Bestimmtheitsmaß beim Kraftstoffverbrauch liegt bei der durchschnittlichen positiven Beschleunigung bei etwa 55%, bei der durchschnittlichen positiven Beschleunigung über die gesamte Fahrdauer lediglich bei 24%. Im Mittel über alle Emissionsgrößen ist das Bestimmtheitsmaß der durchschnittlichen positiven Beschleunigung um 20% höher als das der durchschnittlichen positiven Beschleunigungen über die Gesamtdauer der Fahrt. Daraus interpretiert werden, dass die simulierten Emissionsgrößen viel besser durch die Mittelung der positiven Beschleunigungswerte erklärt werden als durch die Mittelung über die Gesamtdauer des Streckenabschnittes. Insbesondere der NOx-Ausstoß wird etwa zu 70% durch die durchschnittliche positive Beschleunigung erklärt.
- Die beiden mittleren Reisegeschwindigkeiten, $v_{\text{m,Reise}}$ und $v_{\text{m,netto}}$, zeigen bei sehr hohem Signifikanzniveau beidermaßen starke Korrelationen zu Schadstoffemissionen und dem Kraftstoffverbrauch. Die mittlere Reisegeschwindigkeit exklusive Haltedauer $v_{\text{m,netto}}$ zeigt eine Varianzerklärung des Kraftstoffverbrauches von etwa 75%, die der mittleren Reisegeschwindigkeit $v_{\text{m,Reise}}$ sogar 84%. Ähnlich hohe Bestimmtheitsmaße zeigen sich auch bei den Schadstoffemissionen CO, NOx und PM, die ebenfalls im Bereich von 66 bis 84 % liegen. Die Differenz der Varianzerklärung der beiden Reisegeschwindigkeiten lässt sich durch den Ausstoß von Emissionen und Kraftstoffverbrauch während der Haltephasen erklären. Diese schlagen sich mit einer Differenz von etwa 8% nieder.
- Die mittlere Reisegeschwindigkeit $v_{\text{m,Reise}}$ zeigt im Vergleich mit allen anderen fahrdynamischen Kenngrößen die größte Varianzerklärung des Kraftstoffverbrauches sowie des NOx-Ausstoßes und stellt damit eine mögliche „Emissionskenngröße“ dar. In anderen Worten ausgedrückt, erklärt die mittlere Reisezeit $v_{\text{m,Reise}}$ den Kraftstoffverbrauch entlang eines Streckenzuges einer innerstädtischen Hauptverkehrsstraße zu etwa 84% und die NOx-Emission zu etwa 76%. Dies stellt einen großen statistischen Zusammenhang dar.
- Eine überdurchschnittlich hohe Varianzerklärung bei gleichzeitig hohem Signifikanzniveau zeigt sich auch bei der fahrdynamischen Kenngröße, Relative Positive Acceleration genannt RPA. Dabei wird der Kraftstoffverbrauch entlang des Streckenzuges mit etwa 60%, der NOx-Ausstoß mit etwa 74% erklärt.
- Die Verlustzeitgeschwindigkeit zeigt zwar ein hohes Signifikanzniveau ist aber für statistische Erklärungen der Emissionswerte und des Kraftstoffverbrauches aufgrund der Punktwolkenverteilung ungeeignet. Die Punktwolkenform ergibt sich durch die Charakteristik der Berechnung, wonach die Verlustzeitgeschwindigkeit bei sehr kleinen Verlustzeiten sehr groß werden kann. Wenn die Verlustzeit 0 beträgt, entsteht eine unendlich große Verlustzeitgeschwindigkeit.

Kurzzusammenfassung der Ergebnisse:

Die Schadstoffemissionen und der Kraftstoffverbrauch werden weder durch die Anzahl der Halte noch durch beschleunigungsspezifische fahrdynamische Kenngrößen wie Summe der positiven Beschleunigungen oder durchschnittliche positive Beschleunigungen, im großem Maße erklärt. Ebenfalls sind keine großen Zusammenhänge zwischen Emissionsgrößen und dem Anteil der positiven Beschleunigungen an der Gesamtfahrt und der Kenngröße „Acceleration Noise“ zu erkennen. Die Verlustzeitgeschwindigkeit, PKE sowie Summe PKE sind für die emissionstechnische Beurteilung des Streckenzuges ungeeignet.

Markante statistische Abhängigkeiten sind bei den mittleren Reisegeschwindigkeiten ($v_{m,Reise}$, $v_{m,netto}$) errechnet worden, dabei liegt die Varianzerklärung im Bereich von 66% bis 84%. Nicht ganz so hohe Bestimmtheitsmaße erreichen die Kenngrößen, durchschnittliche positive Beschleunigung sowie RPA Die höchste Korrelation wurde mit der mittleren Reisegeschwindigkeit und dem Kraftstoffverbrauch, mit etwa 84% erklärter Varianz erreicht.

Untersuchungsergebnisse mittels multipler linearer Regression:

Hier werden beispielhaft die Ergebnisse aus der multiplen linearen Regressionsanalyse gezeigt. Die Untersuchungen haben den Zweck zu erheben, ob sich Schadstoffemissionen in Form des Kraftstoffverbrauches durch Kombination von zwei fahrdynamischen Kenngrößen noch vergrößern lassen.

Untersucht wurden ausgewählte „vielversprechende“ Kombinationen mit hohem Bestimmtheitsmaß bei der linearen Regressionsrechnung, um damit eine Aussage treffen zu können, ob eine nähere Berechnung mittels multipler linearer Regression sinnvoll ist.

Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von $v_{m,reise}$ und $v_{m,netto}$			
R ² / F-Statistik	Kenngröße	Signifikanzniveau	Regressionsgeradengleichung
R ² =0,85	$v_{m,reise}$	***	FC ~ 112,20 – 3,57 $v_{m,reise}$ – 1,50 $v_{m,netto}$
F=1136	$v_{m,netto}$	***	
Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von $v_{m,reise}$ und $a_{pos,avg}$			
R ² / F-Statistik	Kenngröße	Signifikanzniveau	
R ² =0,85	$v_{m,reise}$	***	FC ~ 91,58 – 3,92 $v_{m,reise}$ + 12,49 $a_{pos,avg}$
F=1191	$a_{pos,avg}$	***	
Anmerkung: Die Steigungen der Regressionsgeraden sind gegenläufig !			
Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von RPA und Anzahl der Halte			
R ² / F-Statistik	Kenngröße	Signifikanzniveau	
R ² =0,72	RPA	***	FC ~ 32,48 + 20,08 RPA + 2,99 Anz.Halte
F=406	Anz.Halte	***	

Tabelle 9: Ergebnisse aus der multiplen linearen Regressionsrechnung

Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von $v_{m,reise}$ und Anzahl der Halte			
R ² / F-Statistik	Kenngroße	Signifikanzniveau	Regressionsgeradengleichung
R ² =0,84	$v_{m,reise}$	***	FC = 103,36 – 4,46 $v_{m,reise}$ + 0,16 Anz.Halte
F=1066	Anz.Halte	0,46	
Anmerkung: Die Steigungen der Regressionsgeraden sind gegenläufig, Anzahl der Halte hat sehr geringes Signifikanzniveau			
Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von $v_{m,reise}$ und RPA			
R ² / F-Statistik	Kenngroße	Signifikanzniveau	
R ² =0,87	$v_{m,reise}$	***	FC = 86,04 – 3,64 $v_{m,reise}$ + 8,88 RPA
F=1384	RPA	***	
Anmerkung: Die Steigungen der Regressionsgeraden sind gegenläufig !			

Tabelle 10: Ergebnisse aus der multiplen linearen Regressionsrechnung, N=410

Bei Betrachtung der Ergebnisse ist kein markanter Anstieg der erklärten Varianz im Vergleich zu den untersuchten Einzelkenngroßen zu erkennen. Die bedeutendste gültige Kombination ($v_{m,reise}$ und $v_{m,netto}$), erreicht ein Bestimmtheitsmaß von 0,85. Eine Anwendung dieser Kombination ist jedoch nicht sinnvoll, da die beiden Kenngroßen nicht unabhängig voneinander sind.

Auch die restlichen untersuchten Kombinationen sind nicht für weitere Anwendung geeignet, da sich im Grunde keine Verbesserung der Varianzerklärung im Vergleich mit den Einzelkenngroßen erkennen lässt, vor allem mit der mittleren Reisegeschwindigkeit. Zum anderen sind die Regressionsgeraden teilweise gegenläufig, was eine Kombination ebenfalls ausschließt.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse aus ausgewählten Kombinationen von fahrdynamischen Kenngroßen wird von einer näheren Untersuchung mittels multipler linearer Regressionsrechnung abgesehen.

3.3.2 Statistische Untersuchung der Einflussbereiche von VLSA

Auf Grundlage der bisherigen Ergebnissen der Korrelationsanalyse am gesamten Streckenzug werden im Folgenden, statistische Abhängigkeiten der für die Emissionsbeurteilung und Kraftstoffverbrauch wesentlichen fahrdynamischen Kenngrößen auf Einflussbereiche von VLSA geprüft. Dabei sollen die in Abschnitt 4.1. vorgestellten Verfahren zur Einflussbereichseinteilung von einzelnen VLSA entlang eines Streckenzuges statistisch näher untersucht werden. Ziel dieser Untersuchung ist eine Gegenüberstellung der Verfahren und Ermittlung eines für die weitere Bewertung der Signalsteuerung geeignete Unterteilung der Streckenzüge. Hauptaugenmerk wird dabei auf die emissionstechnisch relevanten fahrdynamischen Kenngrößen gelegt, die in weiterer Folge im Bewertungssystem Eingang finden sollen.

Wie bereits im vorigen Kapitel 3.3.1, wird auch in dieser Untersuchung die statistische Methode der linearen Regression mit Varianzanalyse (ANOVA) verwendet. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Prozentsatz der Varianzerklärung, dem Bestimmtheitsmaß R^2 .

Zu Beginn der statistischen Untersuchung wird folgende Hypothese aufgestellt: *Die Varianzerklärung der einzelnen fahrdynamischen Kenngrößen, in Abhängigkeit zu den simulierten Schadstoffemissionen und dem Kraftstoffverbrauch, steigt, je besser der Einflussbereich der VLSA geometrisch definiert wird.*

Diese Hypothese begründet sich hauptsächlich aus den Beobachtungen der Fahrtverläufe in unmittelbarer Nähe zu einer Lichtsignalanlage. Wie bereits in Abschnitt 4.1. beschrieben, ist dabei zu erkennen, dass die Beeinflussung der VLSA schon weit vor den Haltelinien beginnt und sich über die Haltelinie hinaus erstreckt. Werden die Einflussbereichsgrenzen der einzelnen VLSA nicht korrekt gesetzt kommt es vermehrt dazu, dass Beschleunigungs- und Bremsvorgänge abgeschnitten und nicht vollständig verarbeitet werden. Gleichmaßen können auch die daraus berechneten Schadstoffemissionen und der Kraftstoffverbrauch nicht korrekt im Simulationsmodell abgebildet werden. Je besser also die Einflussbereichseinteilung gesetzt wird, desto aussagekräftiger sind die simulierten Schadstoffemissionen und der Kraftstoffverbrauch. Dies wird durch den Prozentsatz der Varianzerklärung (R^2) wiedergegeben, wodurch ein direkter Vergleich der verschiedenen Verfahren zur Bereichseinteilung möglich wird.

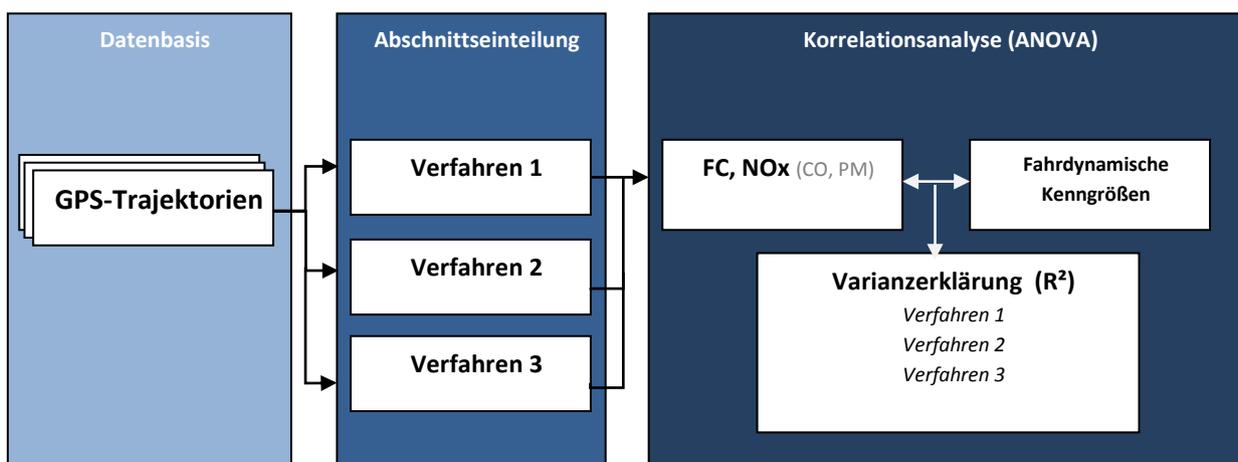


Abbildung 46: Schematische Darstellung der Methodik

Die Abbildung 46 veranschaulicht die Untersuchungsmethodik der Einflussbereichseinteilung von Streckenabschnitten in Bezug auf die Schadstoffemissionen und den Kraftstoffverbrauch während der Durchfahrt des jeweiligen Abschnittes. Für die 3 untersuchten Verfahren zur Abschnittseinteilung

(Verfahren 1-3, siehe Kapitel 3.1) wird dieselbe Datenbasis verwendet. Das bedeutet, die Ausgangstrajektorien sind bei jedem Verfahren dieselben, sodass direkte Vergleiche möglich sind. Die Abbildung 45 zeigt den Unterschied zwischen den Verfahren zur Abschnittsunterteilung. Es handelt sich bei der Darstellung um jeweils denselben Abschnitt aber unterschiedliche Abschnittsgrenzen. Zur Veranschaulichung wurde eine Trajektorie verwendet, bei der ein Haltevorgang enthalten ist. Die rot gestrichelte Markierung stellt dabei die Position der Haltelinie der VLSA dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Abschnittsgrenzen des 3. Verfahrens (EB anhand des Geschwindigkeitsverlaufes - schwarz) weit über die Haltelinie reicht. Beim Verfahren 1 (EB an Haltelinie - blau) wird die Trajektorie direkt an der Haltelinie abgeschnitten. Beim Verfahren 2 wird die Trajektorie unmittelbar nach Überfahren der Haltelinie geschnitten (EB nach LSA – grün).

Bei der Korrelationsanalyse werden von jedem Abschnitt die fahrdynamischen Kenngrößen berechnet und die Schadstoffemissionen sowie der Kraftstoffverbrauch simuliert (PHEM). Im nächsten Schritt werden die statistischen Abhängigkeiten bzw. die Varianzerklärungen der zuvor ermittelten Größen gebildet.

Die hier vorgestellten Analysen beziehen sich auf das Steurgebiet 30, Graz-Wienerstraße stadteinwärts, da in diesem Steurgebiet der mittlere Abstand zwischen 2 aufeinanderfolgende VLSA relativ groß ist und eine gegenseitige Beeinflussung von VLSA daher ausgeschlossen werden kann. Insgesamt wurde dieser Streckenzug 32 mal befahren, das ergibt bei 9 LSA, rund 280 Einzelabschnitte. Da die Verfahren zur Abschnittseinteilung nicht von Streckenzügen abhängig sind kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse auf ähnliche innerstädtische Hauptverkehrsstraßen umgelegt werden können.

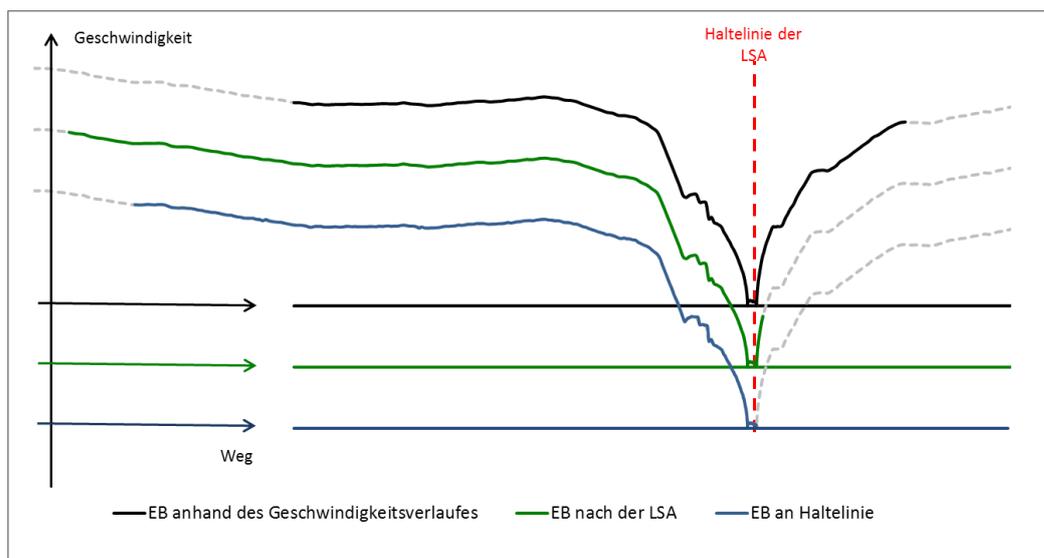


Abbildung 47: Vergleich verschiedener Einflussbereichseinteilungen von Lichtsignalanlagen

Aufgrund der Erkenntnisse gewonnen durch die Regressionsanalyse am gesamten Streckenzug (siehe Kapitel 3.3.1) wurden nicht mehr alle fahrdynamischen Kenngrößen auf ihre statistische Abhängigkeiten zu Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbrauch geprüft. Es sind lediglich die aus Kapitel 3.3.1 als relevant charakterisierten Kenngrößen untersucht worden.

- $v_{m,Reise}$ [m/s] mittlere Reisegeschwindigkeit
- $v_{m,netto}$ [m/s] mittlere Netto-Reisegeschwindigkeit
- $a_{pos,avg}$ [m/s²] durchschnittliche positive Beschleunigung
- **RPA** [m²/s] Relative Positive Acceleration

Darüber hinaus wurden noch folgende Kenngrößen untersucht um weitere Auswirkungen der Abschnittunterteilung auf die Varianzerklärung zu bestimmen.

- $a_{pos,sum}$ [m/s²] Summe der positiven Beschleunigungen
- AnzHalte Anzahl der Halte
- Acc Noise [m²/s] Acceleration Noise

Mittelwert R ² (FC, NOx)	Verfahren 1	Verfahren 2	Verfahren 3
$v_{m,Reise}$	0.46	0.22	0.66
$v_{m,netto}$	0.37	0.28	0.51
$a_{pos,avg}$	0.36	0.57	0.59
RPA	0.21	0.60	0.59

Tabelle 11 : Ergebnisse der Korrelationsanalyse (Abschnittseinteilung von Streckenzügen): Mittelwert der Varianzerklärung des NOx-Ausstoß und Kraftstoffverbrauch.

Die Tabelle 11 zeigt die zusammengefassten und gemittelten Ergebnisse der Varianzuntersuchung. Dabei wurde der Mittelwert der beiden Varianzerklärungen (R^2) des NOx-Ausstoßes und Kraftstoffverbrauches gebildet. Weil nur eine qualitative Aussage getroffen werden soll, stellt die Mittelwertbildung ein probates Mittel dar. Es ist zu erkennen, dass fast alle Mittelwerte der untersuchten Kenngrößen im 3. Verfahren am größten sind. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass dieses Verfahren auch die höchste Varianzerklärung der fahrdynamischen Kenngrößen aufweist.

Die Tabelle 12 zeigt ähnliche Ergebnisse. Dabei wird der Mittelwert der Varianzerklärung über alle relevanten fahrdynamischen Kenngrößen gebildet. Auch in diesem Fall stellt sich heraus, dass das Verfahren 3 die höchste mittlere Varianzerklärung besitzt. Ebenfalls ist zu erkennen, dass der Unterschied zwischen den Verfahren 1 und 2 hinsichtlich des mittleren Bestimmtheitsmaßes relativ gering ausfällt.

Mittelwert R ² (relevante Kenngrößen)	FC	NOx
Verfahren 1	0,44	0,26
Verfahren 2	0,47	0,36
Verfahren 3	0,60	0,57

Tabelle 12 : Ergebnisse der Korrelationsanalyse (Abschnittseinteilung von Streckenzügen): Mittelwert der Varianzerklärung über die relevanten fahrdynamischen Kenngrößen, $v_{m,Reise}$, $v_{m,netto}$, $a_{pos,avg}$, RPA.

Die detaillierten Einzelergebnisse der Varianzanalyse sind in der nachstehenden Tabelle 13 zu sehen. Vergleicht man die dabei errechneten Varianzerklärungen der jeweiligen fahrdynamischen Kenngrößen mit den in Kapitel 3.3.1 Erhobenen bezogen auf einen gesamten Streckenzug, so sind tendenzielle Unterschiede zu erkennen. So wird etwa der Kraftstoffverbrauch mit dem Verfahren 3, anhand der mittleren Reisegeschwindigkeit mit 69% erklärt. Betrachtet man jedoch wie in Kapitel 3.3.1 die Varianzerklärung des Kraftstoffverbrauches anhand der mittleren Reisegeschwindigkeit am gesamten Streckenzug, so wird dieser mit etwa 80% erklärt.

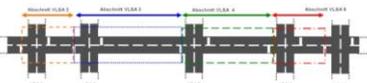
Diese Abweichung lässt sich durch die Simulation der Schadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs erklären. Da die Simulation mit einer Abtastrate von 1 Hz, also 1 Wert je Sekunde, arbeitet, sind Ergebnisse von längeren Streckenzügen mit einer höheren Genauigkeit behaftet. Die PHEM Berechnung der Einzelabschnitte (Einflussbereiche von VLSA) streut aufgrund der geringen Abtastrate im Vergleich mit dem gesamten Streckenzug, wodurch auch die Varianzerklärungen etwas geringer sind. In der Regel sind die Bestimmtheitsmaße bei Betrachtung der Einzelabschnitte um etwa 5-10% geringer als jene am gesamten Streckenzug.

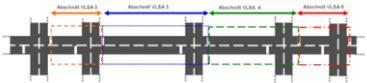
Kurzzusammenfassung der Ergebnisse:

Unter den drei untersuchten Verfahren zur Abschnittseinteilung hat sich gezeigt, dass die Einflussbereichsunterteilung anhand des Geschwindigkeitsverlaufes (siehe Kapitel 3.1) als Geeignetstes gilt. Die Varianzerklärung der Schadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauches in Abhängigkeit zu den fahrdynamischen Kenngrößen steigt je besser der Einflussbereich der VLSA definiert ist. Die zu Beginn des Abschnittes aufgestellte Hypothese wird demnach bestätigt.

Die im vorigen Kapitel 3.5.1 erhobenen fahrdynamischen Kenngrößen mit hoher Korrelation zum NO_x-Ausstoß und dem Kraftstoffverbrauch am gesamten Streckenzug zeigen auch bei der Teilabschnittsbetrachtung hohe Zusammenhänge. Die größte Varianzerklärung liefert auch hier die mittlere Reisegeschwindigkeit sowie die mittlere Netto-Reisegeschwindigkeit mit 50 bis 70 % beim Verfahren 3 (Einflussbereichsunterteilung anhand des Geschwindigkeitsverlaufes).

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird aufgrund der Erkenntnisse aus Kapitel 3.1 (Einflussbereiche von VLSA) und der hier erhobenen Ergebnisse das 3. Verfahren für sämtliche weiteren Berechnungsschritte zur Abschnittsunterteilung von Streckenzügen herangezogen.

Abschnittseinteilung: Verfahren 1 (ohne Überlappung)											
Emission	FC		NOx		CO		PM		AVG 1	AVG	
Kenngroße	Signifikanz	adj. R ²	Signifikanz	adj. R^{2}	Signifikanz	adj. R^{2}	Signifikanz	adj. R^{2}			
V_{m,Reise}	<2e-16 ***	0,58	<2e-16 ***	0,34	<2e-16 ***	0,61	<2e-16 ***	0,48	0,46	0,50	
V_{m,netto}	<2e-16 ***	0,48	<2e-16 ***	0,26	<2e-16 ***	0,61	<2e-16 ***	0,43	0,37	0,45	
a_{pos,avg}	<2e-16 ***	0,44	<2e-16 ***	0,29	<2e-16 ***	0,52	<2e-16 ***	0,16	0,36	0,35	> 0.7 erklärte Varianz
RPA	<2e-16 ***	0,28	<2e-16 ***	0,14	<2e-16 ***	0,35	<2e-16 ***	0,24	0,21	0,25	> 0.6 erklärte Varianz
a_{pos,sum}	9.04e-16 **	0,15	1.11e-05 **	0,06	<2e-16 ***	0,42	1.86e-08 **	0,10		0,18	> 0.5 erklärte Varianz
AnzHalte	<2e-16 ***	0,27	<2e-16 ***	0,19	<2e-16 ***	0,28	<2e-16 ***	0,21		0,24	> 0.4 erklärte Varianz
Acc Noise	<2e-16 ***	0,28	<2e-16 ***	0,23	<2e-16 ***	0,54	<2e-16 ***	0,17		0,30	
Mittelwert (relevant)		0,44		0,26		0,52		0,33			

Abschnittseinteilung: Verfahren 2											
Emission	FC		NOx		CO		PM		AVG 1	AVG	
Kenngroße	Signifikanz	adj. R^{2}	Signifikanz	adj. R^{2}	Signifikanz	adj. R^{2}	Signifikanz	adj. R ²			
V_{m,Reise}	<2e-16 ***	0,26	<2e-16 ***	0,18	<2e-16 ***	0,28	<2e-16 ***	0,24	0,22	0,24	
V_{m,netto}	<2e-16 ***	0,34	<2e-16 ***	0,22	<2e-16 ***	0,34	<2e-16 ***	0,36	0,28	0,32	
a_{pos,avg}	<2e-16 ***	0,61	<2e-16 ***	0,53	<2e-16 ***	0,62	<2e-16 ***	0,43	0,57	0,55	> 0.7 erklärte Varianz
RPA	<2e-16 ***	0,68	<2e-16 ***	0,51	<2e-16 ***	0,64	<2e-16 ***	0,52	0,60	0,59	> 0.6 erklärte Varianz
a_{pos,sum}	<2e-16 ***	0,33	<2e-16 ***	0,25	<2e-16 ***	0,45	<2e-16 ***	0,25		0,32	> 0.5 erklärte Varianz
AnzHalte	<2e-16 ***	0,03	<2e-16 ***	0,03	<2e-16 ***	0,05	<2e-16 ***	0,02		0,03	> 0.4 erklärte Varianz
Acc Noise	<2e-16 ***	0,27	<2e-16 ***	0,26	<2e-16 ***	0,37	<2e-16 ***	0,22		0,28	
Mittelwert (relevant)		0,47		0,36		0,47		0,39			

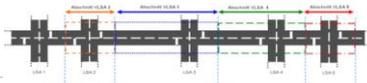
Abschnittseinteilung: Verfahren 3											
Emission	FC		NOx		CO		PM		AVG 1	AVG	
Kenngroße	Signifikanz	adj. R^{2}	Signifikanz	adj. R^{2}	Signifikanz	adj. R^{2}	Signifikanz	adj. R ²			
V_{m,Reise}	<2e-16 ***	0,69	<2e-16 ***	0,63	<2e-16 ***	0,70	<2e-16 ***	0,62	0,66	0,66	
V_{m,netto}	<2e-16 ***	0,55	<2e-16 ***	0,46	<2e-16 ***	0,64	<2e-16 ***	0,53	0,51	0,55	
a_{pos,avg}	<2e-16 ***	0,57	<2e-16 ***	0,60	<2e-16 ***	0,67	<2e-16 ***	0,34	0,59	0,55	> 0.7 erklärte Varianz
RPA	<2e-16 ***	0,60	<2e-16 ***	0,59	<2e-16 ***	0,56	<2e-16 ***	0,51	0,59	0,56	> 0.6 erklärte Varianz
a_{pos,sum}	<2e-16 ***	0,30	<2e-16 ***	0,30	<2e-16 ***	0,51	<2e-16 ***	0,25		0,34	> 0.5 erklärte Varianz
AnzHalte	<2e-16 ***	0,35	<2e-16 ***	0,36	<2e-16 ***	0,44	<2e-16 ***	0,28		0,36	> 0.4 erklärte Varianz
Acc Noise	<2e-16 ***	0,48	<2e-16 ***	0,53	<2e-16 ***	0,76	<2e-16 ***	0,42		0,55	
Mittelwert (relevant)		0,60		0,57		0,64		0,50			

Tabelle 13 : Ergebnisse der Korrelationsanalyse der verschiedenen Verfahren zur Abschnittsunterteilung von Streckenzügen, N= 284

3.4 Eingangsgrößen

3.4.1 Kenngröße für Schadstoffemissionen

In diesem Abschnitt der Arbeit wird versucht eine Bewertungsgröße zu entwickeln, die einen signifikanten Zusammenhang mit Schadstoffemissionen aufweist. Die Größe soll möglichst einfach bestimmbar sein und sich direkt aus einer GPS-Trajektorie ableiten lassen. Zur Auswahl stehen die in Kapitel 3.2 vorgestellten und in Kapitel 3.4 auf ihre Zusammenhänge mit Schadstoffemissionen geprüften fahrdynamischen Kenngrößen.

Ziel dieses Abschnitts ist es auf Grundlage der Korrelationsanalyse, eine Bewertungsmethodik für signalisierte Hauptverkehrsstraße anhand einer emissionstechnischen Kenngrößen, zu entwickeln. Damit soll es möglich sein, die Qualität des Streckenzuges indirekt von den Emissionen abhängig zu machen und innerhalb von Qualitätsstufen (QSV oder LOS) einzugliedern.

Im Kapitel 3.3 wurden die größten Abhängigkeiten zwischen der mittleren Reisegeschwindigkeit und dem Kraftstoffverbrauch bestimmt. Bei der Untersuchung am gesamten Streckenzug kann der Kraftstoffverbrauch mit mehr als 80% durch die mittlere Reisegeschwindigkeit, bei Betrachtung von Teilabschnitten (Einflussbereiche von VLSA), mit etwa 70 %, erklärt werden. Dies prädestiniert die **mittlere Reisegeschwindigkeit als emissionstechnisch relevante fahrdynamische Kenngröße** für die weitere Bewertung.

Grundlage für die weitere Qualitätsbeurteilung ist demnach die starke Abhängigkeit der mittleren Reisegeschwindigkeit und dem Kraftstoffverbrauch. Ein weiterer Vorteil der mittleren Reisegeschwindigkeit als qualitative Kenngröße ist ihre Einfachheit. Sie ist für Experten als auch für Laien verständlich, im Gegensatz zu anderen fahrdynamischen Kenngrößen wie etwa dem Acceleration Noise (Beschleunigungsrauschen), PKE, oder RPA.



Abbildung 48: Schema zur Bewertungsmethodik infolge der Emissionskenngröße

Im Kapitel 2.3.4. wird bereits ein Verfahren vorgestellt, dass anhand der mittleren Reisezeit eine Qualitätsbewertung von innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen ermöglicht. Das angesprochene Verfahren von Spangler (2009), hat keinerlei emissionstechnischen Hintergrund. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Verkehrsqualität einer Hauptverkehrsstraße direkt von der Reisezeit abhängt. Eine Qualitätsstufenunterteilung erfolgt nach Vorbild des gängigen LOS bzw. QSV System in 6 Stufen. Die Grenzen wurden dabei sinngemäß und möglichst einprägsam in einem regelmäßigen Abstand gewählt.

Um die verkehrliche Qualität anhand des Kraftstoffverbrauches mit der fahrdynamischen Kenngröße der mittleren Reisegeschwindigkeit ausdrücken zu können, bedarf es einer angepassten

Qualitätsstufeneinteilung. Die wesentlichen Eckpunkte und Vorgaben bei der Erstellung der Qualitätsstufen waren:

- Eine gängige 6-stufige Einteilung in die Qualitätsstufen A, B, C, D, E und F
- Abdeckung des gesamten Geschwindigkeitsbereiches, der für den innerstädtischen Verkehr auf Hauptverkehrsstraßen charakteristisch ist
- Abdeckung des gesamten relevanten Treibstoffverbrauchsbereich, der für den innerstädtischen Verkehr auf Hauptverkehrsstraßen charakteristisch ist
- Als Datengrundlage für die Einteilung sollen real aufgezeichnete Messdaten herangezogen werden
- Die Qualitätsstufeneinteilung soll anhand mathematischer Verfahren definiert und dementsprechend nachvollziehbar sein

„Anhand derartiger Qualitätskriterien kann in der Praxis festgestellt werden, ob hinreichende Qualitäten vorliegen oder ob maßgebliche Defizite vorhanden sind. Verkehrsingenieure in der Praxis vor Ort benötigen diese Orientierung, weil ihnen akzeptierte Vergleichsmaßstäbe fehlen. In diesen Maßstäben können sie ihren eigenen Handlungsbedarf ausrichten und ihre Arbeit gegenüber der Öffentlichkeit und gegenüber politischen Gremien begründen.“ (Brilon, 2003, S. 22)

Wie auch in den vorigen Kapiteln 3.3 sowie 3.1, dienen die aufgezeichneten Fahrtverläufe an Hauptverkehrsstraßen im Grazer Stadtgebiet als Datengrundlage, welche im Anhang A1 detaillierter beschrieben werden. Dabei weisen alle aufgezeichneten Streckenzüge eine ähnliche Charakteristik auf. Insgesamt wurden 410 Einzeltrajektorien zu unterschiedlichsten Tageszeiten auf insgesamt 7 verschiedenen Streckenzügen aufgezeichnet, sodass die Datengrundlage ein weites Spektrum an Verkehrszuständen und Belastungen aufweist. Aufgrund der sehr breiten Datenbasis ist es möglich, die Qualitätsstufeneinteilung auch auf andere Städte mit ähnlichen Streckenzügen zu übertragen.

Als Grundlage für die emissionstechnische Qualitätsstufeneinteilung gilt der Zusammenhang zwischen der mittleren Reisegeschwindigkeit entlang des Streckenzuges und dem Kraftstoffverbrauch. Damit ist es möglich eine qualitative Aussage über den entstandenen Kraftstoffverbrauch über die Betrachtung der mittleren Reisegeschwindigkeit zu tätigen. Die Datenbasis bildet die bereits in Kapitel 3.3.1. verwendete Punktwolke der mittleren Reisegeschwindigkeit und dem Kraftstoffverbrauch. Dabei werden gesamte Streckenzüge von signalisierten (Großteils koordinierten) Hauptverkehrsstraßen betrachtet.

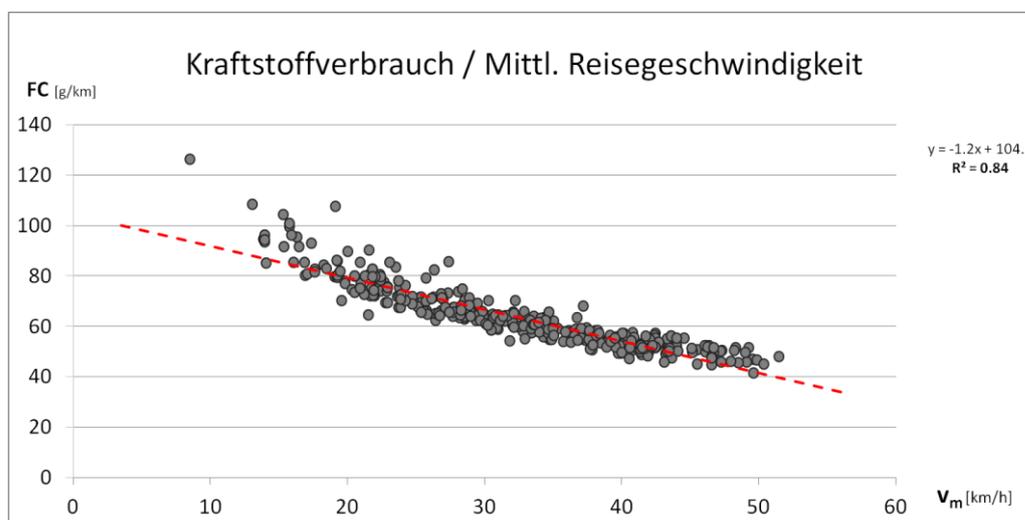


Abbildung 49: Datenbasis der Clusteranalyse, N=410

Eine mögliche Einteilung der Punktwolke in Punktwolkengruppen bildet die Methode der Clusteranalyse. Damit können ähnliche Datenpunkte bzw. Messreihen zusammengefasst und gruppiert werden und somit eine Klasseneinteilung erfolgen.

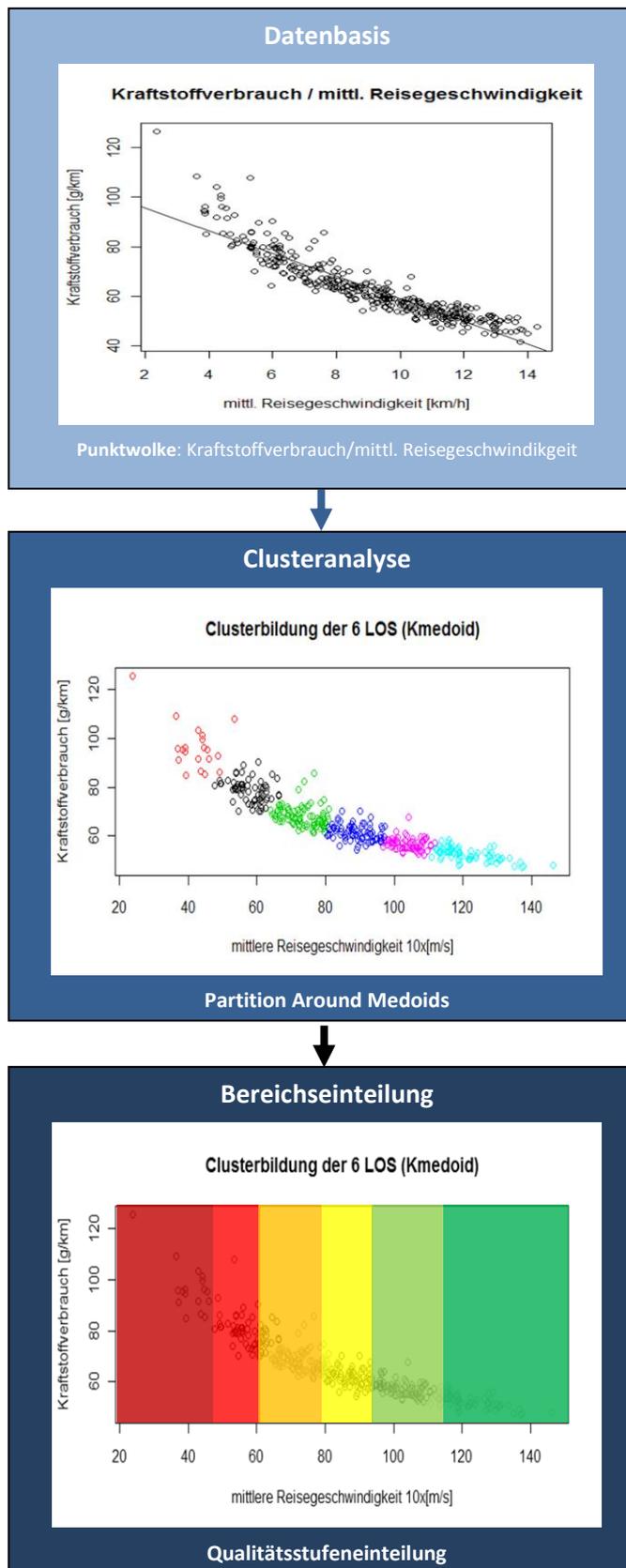


Abbildung 50: Schematische Darstellung zur Qualitätsstufeneinteilung

„Unter Clusteranalyse versteht man strukturentdeckende, multivariante Analyseverfahren zur Ermittlung von Gruppen (Clustern) von Objekten, deren Eigenschaften oder Eigenschaftsausprägungen bestimmte Ähnlichkeiten aufweisen“ (Fellendorf, 2010, S. 36). Als Objekte verstehen sich Punktwolken oder Datenreihen mit einem oder mehreren Merkmalen. Dabei wird die Ähnlichkeit der einzelnen Objekten über ein numerisches Proximationsmaß bestimmt. Handelt es sich bei den Objekten um Einzelpunkte, ist das Proximationsmaß im einfachsten Fall die Distanz zwischen zwei Datenpunkten. Die Gruppierung der Datenpunktwolke erfolgt über eine Fusionierung, bei der iterativ ein Minimum der Distanzsummen gebildet wird.

Anzahl an VLSA je km							
SG	30	51/61	70/41	41	42	82	81
[#/km]	2,6	5	4,5	4,1	3,5	3,8	3,1

Tabelle 14 : Mittler Anzahl an VLSA je Streckenkilometer (Auszug aus dem Anhang A1)

Für die Fusionierung wurde die Methode „Partition Around Medoids“ (kurz: k-medoid) verwendet. Dabei kann die Clusteranzahl vorgegeben werden. Zu Beginn des Verfahrens wird ein willkürlicher Punkt als Mittelpunkt jedes Clusters gewählt. Danach werden die Distanzen zwischen dem vorübergehender Mittelpunkt und den weiteren Datenpunkten gebildet. Im nächsten Schritt wird ein neuer vorläufiger Mittelpunkt in jedem Cluster gewählt und die Distanzen zu den anderen Datenpunkten berechnet und mit den zuvor ermittelten verglichen. Über einen Integrationsprozess wird dann ein Mittelpunkt gesucht, bei dem die Summe der Distanzen ein Minimum ergibt und danach der Cluster gebildet. Ähnliches funktioniert das „k-means“ Verfahren, bei dem der Clustermittelpunkt durch Schwerpunktsberechnung gebildet wird. Das würde jedoch bedeuten, dass bei einer vermehrten Ansammlung von Punkten ein Cluster entstehen würde. In weitere Folge bedeutet das, durch die Vielzahl an Datensätzen innerhalb eines Bereiches innerhalb der Punktwolke ein Schwerpunkt und folglich ein Cluster, entstehen würde. Deshalb wurde die „Partition Around Medoids“ - Methode bevorzugt.

Die dadurch entstandenen sechs Cluster überlappen sich teilweise es sind also keine definierten Clustergrenzen entstanden. Um dennoch Grenzen für die Qualitätsstufeneinteilung zu erhalten, wurde der Mittelwert aus dem Maximalwert und dem Minimalwert des Folgeclusters gebildet und als gerundete Werte für die Qualitätsstufeneinteilung verwendet.

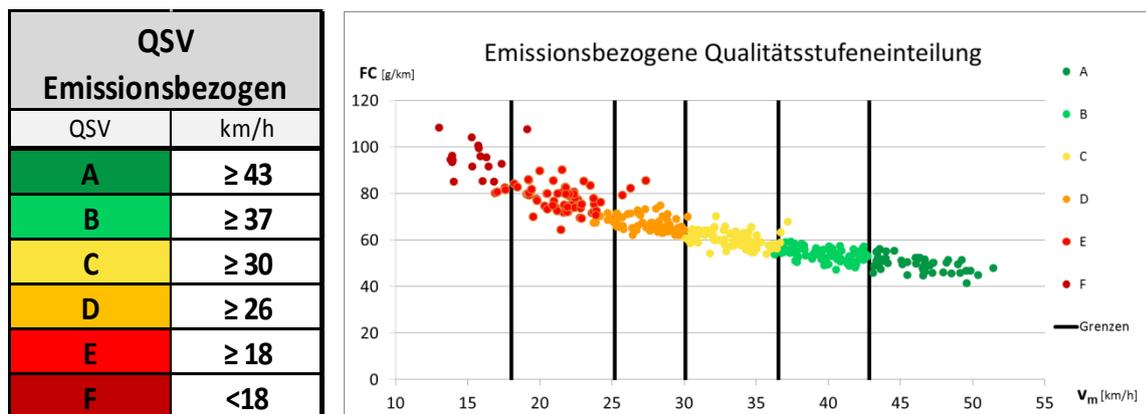


Abbildung 51 : Emissionsbezogene Qualitätsstufeneinteilung

Mithilfe der hier entwickelten Bewertungstabelle ist es möglich klassische Qualitätsstufeneinteilungen auf Schadstoffemissionen in Form des Kraftstoffverbrauches zu beziehen und damit umweltrelevante Aspekte in der Qualitätsbetrachtung, unabhängig von anderen Kriterien (z. B.. Haltevorgänge oder Wartezeiten, abschätzen zu können.

„Auf Straßen, auf denen beispielsweise mit niedrigerer Geschwindigkeit gefahren werden muss, stellen niedrige Geschwindigkeiten bei ungehinderter Fahrt dennoch sehr gute Verkehrsqualitäten dar, auch wenn diese Geschwindigkeiten auf einer anderen schneller zu befahrenden Straßenkategorien als schlechte Verkehrsqualität beurteilt werden würden“ (Schmietenhof, 2010, S.49). Aus diesem Grund muss im Vorfeld sichergestellt werden, dass für die Qualitätsbeurteilung des Streckenzuges anhand der mittleren Reisegeschwindigkeit ähnliche Streckencharakteristika der Untersuchten Strecken vorliegen. Insbesondere die im Mittel gefahrenen Geschwindigkeiten sollten in einem ähnlichen Bereich liegen.

Ein Vergleich der Bewertungsmethoden, anhand der mittleren Reisegeschwindigkeit (HBS, HCM, Spangler 2009) zeigt Unterschiede zur hier entwickelten emissionstechnischen Qualitätseinstufung (siehe Tabelle 15). In Abschnitt 4.5 wird der Vergleich angewendet.

QSV (emissionsbezogen)		QSV (nach Spangler,2009)		QSV (nach HCM,2000)	
QSV	km/h	QSV	km/h	QSV	km/h
A	≥ 43	A	≥ 50	A	≥ 41
B	≥ 37	B	≥ 40	B	≥ 32
C	≥ 30	C	≥ 30	C	≥ 23
D	≥ 26	D	≥ 20	D	≥ 18
E	≥ 18	E	≥ 15	E	≥ 14
F	<18	F	<15	F	<14

Bsp. Urban Street Class IV

Tabelle 15 : Gegenüberstellung der gängigen Qualitätsstufeneinteilungen anhand der mittleren Reisegeschwindigkeit (HBS, HCM) mit den emissionsbezogenen QSV

Die hier entwickelte emissionstechnische Qualitätsstufeneinteilung, ist auch auf andere Städte übertragbar. Voraussetzung dafür ist eine annähernd gleiche Streckencharakteristik der hier als Datengrundlage benutzten Routen im Grazer Stadtgebiet. Eine Anpassung der Qualitätsstufen auf Grundlage einer Vielzahl an Streckenzügen in mehreren Städten würde die Anwendbarkeit der neu definierten Qualitätsstufen noch erhöhen. An der hier entwickelten Methodik der emissionstechnischen Qualitätsstufeneinteilung würde es bei einer größeren Datengrundlage keine Abweichungen geben, lediglich eine geringe Verschiebung der Qualitätsstufengrenzen ist zu erwarten.

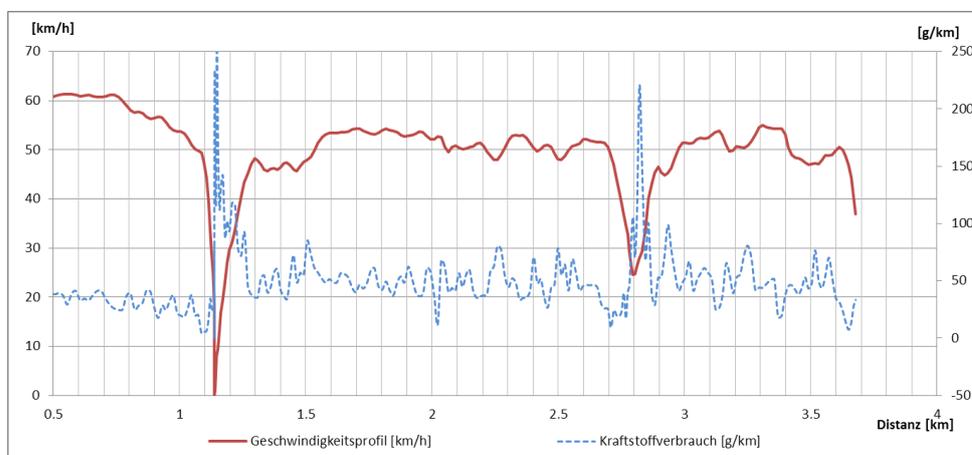


Abbildung 52: Kraftstoffverbrauch aus PHEM für ein Geschwindigkeitsprofil: Wienerstraße (stadteinwärts) am 17.01.2012 um 07:00 Uhr

3.4.2 Haltevorgänge

Haltevorgänge entlang einer Route wirken sich nicht nur negativ auf den Fahrkomfort aus und unterbrechen den Fahrfluss des Einzelfahrzeuges, sie sind auch Indiz für die Steuerungsqualität von koordinierten Streckenzügen mit mehreren hintereinander folgenden VLSA. In Schnabel 2006 wird von einem maßgeblichen Zusammenhang zwischen der Anzahl an Haltevorgängen und dem Kraftstoffverbrauch gesprochen, der aber in dieser Arbeit nicht bestätigt wird (siehe Kapitel 3.3 und Abbildung 52). Der Kraftstoffverbrauch lässt sich allein durch die Haltevorgänge nicht maßgeblich erklären.

Durch eine behinderungsfreie, haltefreie Fahrt entlang eines Streckenzuges wird aber in jedem Fall der Verkehrsfluss begünstigt, was sich in weiterer Folge auch in einer größeren mittleren Reisegeschwindigkeit widerspiegelt.

Eine Qualitätsbeurteilung der Signalsteuerung anhand der mittleren Reisegeschwindigkeit ist jedoch nur eingeschränkt möglich, da auf die Reisegeschwindigkeit viele Einflüsse wirken, die nicht direkt auf das Signalprogramm zurückzuführen sind (Fahrverhalten, Pulkverhalten, geometrische Einflüsse der Strecke, Kurvigkeit, Steigungen etc.). Eine Beurteilung der Signalsteuerung ist durch die Kenntnis und Analyse der Haltevorgänge gut geeignet.

In Kapitel 2.3. wird bereits auf die Verwendung der Haltevorgänge als Kenngröße für die verschiedenen Qualitätsbeurteilungsverfahren (im Wesentlichen HBS und HCM) hingewiesen. Durch Analyse der Haltevorgänge wird das Koordinierungsmaß der Strecke bestimmt, welche den Prozentsatz an ungehinderten Überfahrten (ohne Halte) von VLSA entlang des Streckenzuges wiedergibt.

Um sicher zu stellen, dass die Anzahl der Halte korrekt durch die unten stehende Bedingung berechnet wird, wird ein Vergleich mit manuellen Aufzeichnungen während einer GPS-Messfahrt angestellt. Dabei wurde parallel zur Aufnahme der GPS-Trajektorie mittels GPS-Logger eine händische Mitschrift der Haltevorgänge samt Halteursachen durchgeführt. Ziel ist eine Überprüfung und Validierung der berechneten Haltevorgänge. Die Anzahl der Halte wird mit folgender Bedingung auf Datengrundlage von GPS-Trajektorien errechnet.

$$Halt = \begin{cases} v_{idle} \leq 3 \text{ km/h} \\ t_{idle} \geq 2 \text{ sek} \end{cases}$$

Für die weiter Auswertung ist es wichtig Kenntnis über den Anteil der Halte zu erhalten, welcher direkt auf die VLSA -Steuerung zurückgeführt werden kann, weil man bei der Berechnung der Halte keinerlei Ursachen erhoben werden. Für die weitere Auswertung und Bewertung werden also alle berechneten Haltevorgänge verwendet, unabhängig von ihrer Ursache. Wenn sich herausstellt, dass der Anteil an Haltevorgängen, die nicht direkt auf eine VLSA zurückgeführt werden kann, sehr hoch ist, ist eine weitere Verwendung dieser Kenngröße zur Bewertung anhand der GPS-Trajektorie unbrauchbar. Halte, die nicht auf die VLSA Steuerung bezogen werden können, aber dennoch vom Berechnungsalgorithmus, als solche erkannt werden, verfälschen in weiterer Folge die Beurteilungskriterien die auf Grundlage von Haltevorgängen berechnet werden.

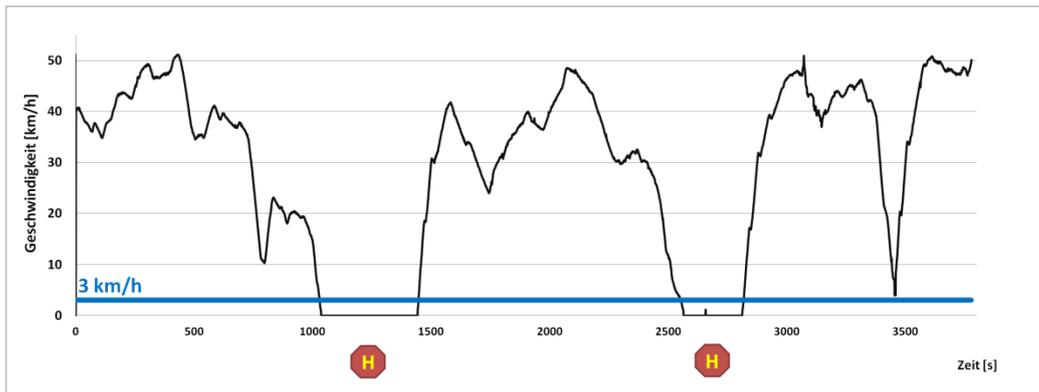


Abbildung 53 : Emissionsbezogene Qualitätsstufeneinteilung

Bei der händischen Aufzeichnung wurden die Halteursachen in Anlehnung an Schnabel, 2006 wie folgt unterschieden:

- H1: Halt durch zu späte oder zu frühe Ankunft an der VLSA (Eintreffen am Anfang oder Ende der Rotphase)
- H2: Halt durch einen Rückstau während der Grünphase
- H3: Halt aufgrund einer Überlastung der VLSA. Der Rückstau kann während einer Grünphase nicht mehr abfließen
- H4: Halt der durch ein abbiegendes Fahrzeug an der VLSA zustande kommt
- H5: Halt der nicht direkt auf die VLSA -Steuerung zurückzuführen ist (Parkvorgänge, Fußgänger, etc.)

In der folgenden Auswertung gelten die Halteursachen H1 und H2 als direkt abhängig von der VLSA -Steuerung, H3,H4 sowie H5 können nicht direkt auf die Steuerung zurückgeführt werden. Kommt es vor einer VLSA zu einem Mehrfachhalt, wird von einer Überlastung ausgegangen. Bei der händischen Aufzeichnung entspricht eine Überlastung (H3) mindestens 2 Haltevorgängen.

Datengrundlage der folgenden Auswertungen liefert die händische Aufzeichnung der Halteursachen bzw. Haltevorgängen bei zeitgleicher Aufzeichnung der GPS-Trajektorie im Untersuchungsgebiet SG 30 – Wienerstraße, stadteinwärts. Nähere Informationen sind aus dem Anhang zu entnehmen.

Vergleich der kalkulierten und aufgezeichneten Halte								
	Berechnete Haltevorgänge	Detektierte Überlastungen	Aufgezeichnete Haltevorgänge					Kommentar
			H1	H2	H3	H4	H5	
SG_30_NS_Morgen	9	1	8	8	1			1x H3 =2 Halte
SG_30_NS_Abend	8	0	8	6	2			
SG_30_NS_Nacht	14	0	15	15				1 Halt wurde fälschlicherweise aufgezeichnet
SG_30_NS_Tag	7	0	8	7	1			1 Halt wurde bei der Berechnung übersprungen
Summe	38		39	36	3	1		

Tabelle 16 : Gegenüberstellung der berechneten und der aufgezeichneten Haltevorgänge/Haltursachen für einen Streckenzug

Zum Einen zeigt sich, dass nahezu alle händisch aufgezeichneten Haltevorgänge auch durch den Berechnungsalgorithmus erkannt wurden. Die Schwellenparameter $v_{idle} = 3 \text{ km/h}$ und $t_{idle} = 2 \text{ sek}$, haben sich nach einigen Variationsuntersuchungen als zweckmäßig herausgestellt. Zum Anderen ist zu erkennen, dass im gesamten Untersuchungszeitraum kein Haltevorgang aufgetreten ist, dessen Ursache nicht auf die VLSA zurückgeführt werden kann. Auch in den restlichen Steuergebieten (siehe Anhang A1) wurden händische Aufzeichnungen der Halteursachen während der Messfahrten aufgezeichnet, die ein ähnliches Ergebnis zeigen. Der Anteil an Halteursachen, die nicht auf die VLSA -Steuerung zurückgeführt werden können, ist vernachlässigbar gering (< 3%).

Zusammenfassend kann also davon ausgegangen werden, dass die durch den Berechnungsalgorithmus detektierten Haltevorgänge korrekt erhoben werden und aufgrund des Ursachenverhältnisses auch für weitere Auswertungen geeignet sind.



Abbildung 54: Schema zur Bewertungsmethodik anhand des Koordinierungsmaßes

Die Anzahl der Halte können durch die Unterteilung in Einflussbereich (siehe Kapitel 3.1) ursachengerecht auf die jeweiligen VLSA zugewiesen werden. Dies ermöglicht eine detaillierte Analyse und Bewertung des Streckenzuges als auch der darin enthaltenen Einzelanlagen. Eine Beurteilung der Koordinierungsqualität und somit der Lichtsignalsteuerung wird anhand der Anzahl an Haltevorgängen über die Hilfskenngröße des Koordinierungsmaßes ausgedrückt. Das

QSV	
Koordinierungsmaß	
k_{STZG}	[%]
A	≥ 95
B	≥ 85
C	≥ 75
D	≥ 65
E	≥ 50
F	< 50

Abbildung 55:QSV anhand des Koordinierungsmaß (Schnabel,2006)

Koordinierungsmaß wird im deutschsprachigem Raum im HBS 2005, Schnabel 2006 sowie Schnabel, 2010 erwähnt und stellt den Stand der Technik zur Qualitätsbeurteilung von koordinierten Streckenzügen dar. Das derzeit in Verwendung befindliche Beurteilungsverfahren bezieht sich jedoch nur auf gesamte Streckenzüge wobei keine Zuteilung von Haltevorgängen auf Einzelanlagen vorgenommen wird. Die qualitative Aussagen über das koordinierte Signalprogramm können deshalb nur auf Ebene des gesamten Streckenzuges erfolgen (siehe Kapitel 2.3).

Die Berechnungs- und Beurteilungsmethodik wird von HBS 2005 übernommen, um die Qualitätsstufeneinteilung anhand des Koordinierungsmaßes zu bestimmen.

3.5 Analyse und Bewertung

3.5.1 Analyse des Streckenzuges

Für die Qualitätsbestimmung Ebene des Streckenzuges werden die zwei zuvor vorgestellten Kenngrößen und Bewertungsverfahren miteinander in Kombination gebracht, um eine umfassende Qualitätsuntersuchung zu ermöglichen.

Mithilfe der mittleren Reisegeschwindigkeit wird die umweltbezogene Qualitätsstufe ermittelt und mit der Qualitätsstufe anhand des Koordinierungsmaßes, die Qualität der koordinierten Signalsteuerung erhoben.

Die Reisegeschwindigkeit als Kenngröße ist als räumlich gemittelte Größe anzusehen. Sie stellt deshalb nur einen Indikator für Probleme entlang des signalisierten Streckenzuges dar. Es kann damit die Qualität des gesamten Streckenzuges und der darin enthaltenen signalisierten Knotenpunkte abgeschätzt werden, jedoch keine detaillierten Mängeluntersuchungen auf Ebene der Einzelknoten.

Die Anzahl der Halte bzw. das daraus abgeleitete Qualitätsmerkmal Koordinierungsmaß, kann im Gegensatz schon bei der Streckenauswertung einer bestimmten VLSA zugeordnet werden und die Qualitätsbestimmung wird dadurch verfeinert. Die Qualitätseinteilung nach dem Koordinierungsmaß, gilt als Qualitätsindikator der koordinierten Lichtsignalsteuerung.

Die beiden Qualitätsmerkmale, mittlere Reisegeschwindigkeit und Anzahl der Halte, haben unterschiedliche Aussagekräfte. Eine Kombination der beiden Informationen ist daher naheliegend.

Die Abbildung 57 soll die Unterschiede der beiden Kenngrößen verdeutlichen: Zu sehen ist das Weg-Zeit Diagramm und das Geschwindigkeitsprofil für 3 Messfahrten, wobei beide Diagramme dieselbe Ordinate (Zeitachse) haben. Für die dargestellten Fahrtverläufe wurde die Qualitätsstufe anhand des Koordinierungsmaßes berechnet. Im Geschwindigkeitsprofil ist zu sehen, dass die LOS-F Messfahrt mehr Halte als die LOS-C Messfahrt aufweist. Die schlechtere Qualitätsstufe ist deshalb gerechtfertigt und bestätigt das Bewertungsverfahren. Betrachtet man im Vergleich dazu das Weg-Zeit Diagramm, so ist deutlich zu erkennen, dass die LOS-F Messfahrt zeitlich kürzer dauert als die LOS-C Fahrt. Da beide dieselbe Distanz zurücklegen müssen, hat die LOS-F Fahrt in weiterer Folge eine höhere mittlere Geschwindigkeit und ist aufgrund dessen bei der Qualitätsbeurteilung anhand der mittleren Reisegeschwindigkeit besser zu bewerten als die LOS-C Fahrt. Emissionstechnisch gesehen wird deshalb die zuvor über das Koordinierungsmaß ermittelte Qualitätsstufe widerlegt. Nur durch eine Kenntnis beider Qualitätsbeurteilungen ist deshalb eine umfassende Analyse möglich.

Zur Qualitätsbeurteilung werden sämtliche Messfahrten in einem Steuergebiet verwendet, dabei sind die Tageszeitprogramme der Signalsteuerung zu berücksichtigen. Sind ausreichende Messfahrten für jedes Programm durchgeführt worden, kann eine komplette Diagnose über einen gesamten Tag erfolgen.



Abbildung 56: Schema der Qualitätsbeurteilung am Streckenzug

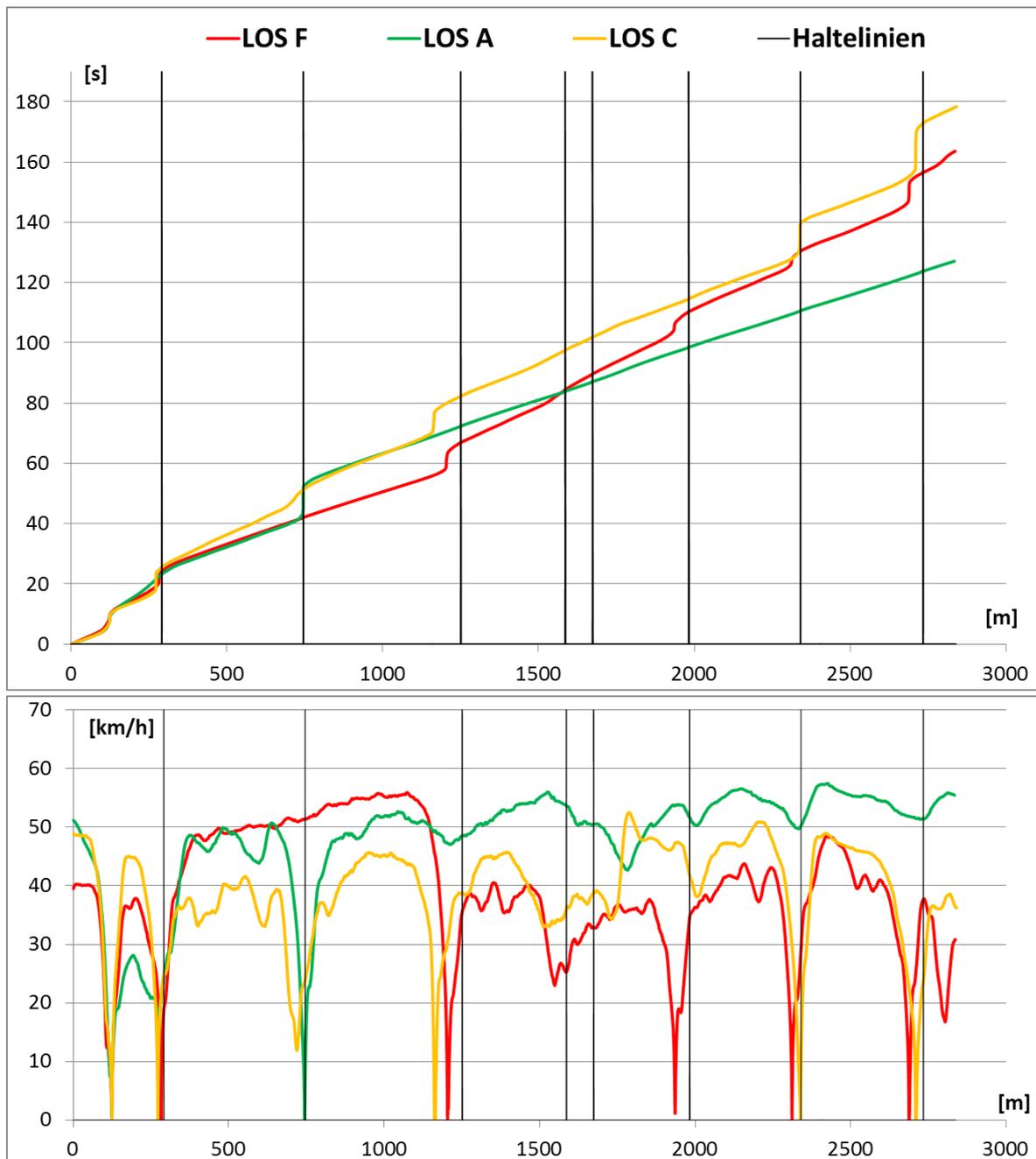


Abbildung 57: Nach dem Koordinierungsmaß (Schnabel, 2006) bewertete Messfahrten auf der Straßangerstraße (Süd, SG 81) am 19.01.2012

oben: Weg-Zeit Diagramm / unten: Geschwindigkeitsprofil

Die Qualitätsstufe anhand des Koordinierungsmaßes LOS_{SP} , wird durch Mittelwertbildung aller vorhandenen Messfahrten ($LOS_{MF,i}$), innerhalb eines Steuerprogramms gebildet. Tritt vor einer Haltelinie ein mehrfacher Haltevorgang auf, kann von einer Überlastung ausgegangen werden, wodurch eine funktionierende Koordinierung ausgeschlossen wird. In diesem Fall wird die jeweilige Messfahrt aus der Gesamtbewertung (Mittelwertbildung) ausgeschlossen. Die Information einer Überlastung kann jedoch für die Mängelanalyse hilfreich sein. Mehrfachhalte können infolge mangelhafter Koordinierung mit zu kurzen Freigabe- oder Umlaufzeiten auftreten. Im Analysetool werden deshalb Mehrfachhalte mitprotokolliert.

Für die Qualitätsuntersuchung mit emissionstechnischem Hintergrund werden die mittleren Reisezeiten $v_{m,i}$ der Einzelmessfahrten in einem arithmetischen Mittel zusammengefasst und mit der

in Abschnitt 3.4.1. entwickelten Qualitätsstufeneinteilung bewertet. Bei der Mittelwertbildung werden nur solche Messfahrten eingebunden, welche während des gleichen Steuerprogramms aufgezeichnet wurden.

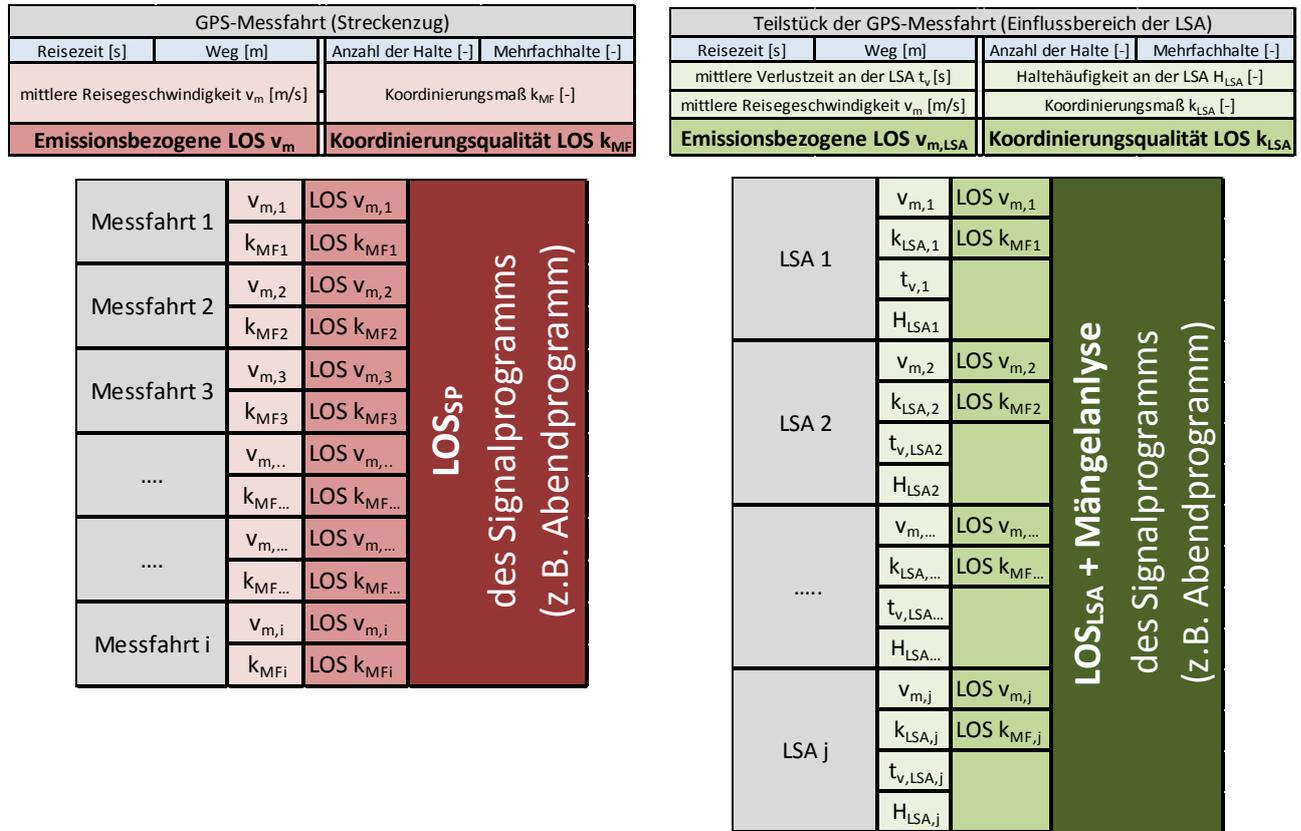


Abbildung 58: Schematischer Aufbau der Qualitätsbeurteilung von Streckenzügen

Wie zuvor bereits erklärt, beruht die Bewertungsmethodik auf einer Kombination von Qualitätsstufeneinteilungen anhand der mittleren Geschwindigkeit $v_{m,i}$ sowie des Koordinierungsmaßes k_i . Die Grundlage dafür liefern die GPS-Trajektorien, aus denen die Qualitätskenngrößen, anhand der Reisezeit und des zurückgelegten Weges sowie aus der Kenntnis der Haltevorgänge, zunächst für jede Messfahrt berechnet werden. In weiterer Folge wird über die zuvor erwähnte Mittelwertbildung eine Bewertung des Steuerprogramms möglich. Diese Methodik kann für weitere Steuerprogramme fortgesetzt werden, sodass schlussendlich alle im Tagesverlauf verwendeten Steuerprogramme analysiert werden können. In Abschnitt 4.4 wird diese Methode beispielhaft für zwei Streckenzüge mit jeweils vier Steuerprogrammen angewendet.

3.5.2 Analyse der Einzelknoten

Ein Kernstück der in dieser Arbeit entwickelten Bewertungsmethodik und Streckenanalyse ist die Betrachtungsweise auf Ebene der Einzellichtsignalanlagen. Eine Qualitätsbewertung ist dabei nur möglich weil die GPS-Messfahrt der gesamten Strecke in Einflussbereich von Einzelanlagen unterteilt werden kann. Das dabei zur Anwendung gekommene Verfahren wird in Abschnitt 3.1 sowie Kapitel 3.5.2 näher beschrieben und diskutiert.

So kann beispielsweise festgestellt werden, dass entlang eines Streckenzuges eine oder mehrere Einzelanlagen nicht gut gesteuert sind und dadurch die Gesamtstrecke eine schlechtere Qualitätsstufe bekommt.

„Werden schlechte Qualitätswerte erreicht, so ist es sinnvoll, eine Detailuntersuchung

durchzuführen, die Engpässe auf der Route identifiziert. Oft kann durch die Verbesserung von überlasteten Einzelanlagen eine deutliche Verbesserung der gesamten Route erreicht werden“ (Spangler, Reisezzeitbasierte Verfahren für die Verkehrszustandsanalyse von städtischen Hauptverkehrsstraßen, 2009, S. 120). Tritt in einem Einflussbereich ein Mangel durch eine z. B. verringerte Reisegeschwindigkeit auf, können beispielsweise über die Videoanalyse detaillierte Steuerungsmängel aufgezeigt werden.

Die Eingangsgrößen für die Qualitätsstufeneinteilung bleiben dieselben wie bei der Analyse des gesamten Streckenzuges also v_m und k_i , es ändert sich lediglich der Betrachtungsbereich. Zusätzlich zu den schon bekannten Qualitätsmerkmalen wird die Verlustzeit $t_{v,i}$ hinzugefügt. Sie stellt eine Referenzgröße zu einer ungehinderten konstanten Durchfahrt mit 50 km/h, des Teilabschnittes dar. Des weiteren wird die Häufigkeit von Haltevorgängen H_i an derselben VLSA bei der Betrachtung mehrerer Messfahrten zur Mängelanalyse verwendet.

Die Datengrundlage ist ebenfalls dieselbe, wobei die Strecke nun in Einflussbereiche der jeweiligen VLSA unterteilt wird. Die Abbildung 59 zeigt die Beurteilungsmatrix für ein Signalprogramm, anhand derer die Qualitätsbeurteilung am Streckenzug aber auch auf Ebene der Einzelanlagen erfolgt.

Signalprogramm x (z.B. Abendprogramm)						
	LSA 1	LSA 2	...	LSA j		
Messfahrt 1	$v_{m,1,1} \quad k_{1,1} \quad H_{1,1} \quad t_{v,1,1}$	$v_{m,1,2} \quad k_{1,2} \quad H_{1,2} \quad t_{v,1,2}$	...	$v_{m,1,j} \quad k_{1,j} \quad H_{1,j} \quad t_{v,1,j}$	$LOS_{MF,1}$	LOS _{SP}
Messfahrt 2	$v_{m,2,1} \quad k_{2,1} \quad H_{2,1} \quad t_{v,2,1}$	$v_{m,2,2} \quad k_{2,2} \quad H_{2,2} \quad t_{v,2,2}$	...	$v_{m,2,j} \quad k_{2,j} \quad H_{2,j} \quad t_{v,2,j}$	$LOS_{MF,2}$	
...	
Messfahrt i	$v_{m,i,1} \quad k_{i,1} \quad H_{i,1} \quad t_{v,i,1}$	$v_{m,i,2} \quad k_{i,2} \quad H_{i,2} \quad t_{v,i,2}$	...	$v_{m,i,j} \quad k_{i,j} \quad H_{i,j} \quad t_{v,i,j}$	$LOS_{MF,i}$	
	LOS _{LSA,1}	LOS _{LSA,2}	...	LOS _{LSA,j}		
Mängelanalyse der LSA						

Abbildung 59: Beurteilungsmatrix für die Qualitätsbewertung von Streckenzügen und LSA

Die $LOS_{LSA,i}$ werden für die Einzelanlagen ebenfalls durch Mittelwertbildung der Kenngrößen, über alle Messfahrten vorgenommen, dabei werden die Qualitätsstufeneinteilungen aus Kapitel 3.4. verwendet. Die erste VLSA wird ausgeschlossen, weil zu Beginn des Streckenzuges keine Koordinierung möglichst ist (siehe Abschnitt 2.3.2.). Treten mehrfache Haltevorgänge bei einer VLSA auf, wird diese Information ebenfalls verarbeitet und in der Mängelanalyse ausgegeben.

4 Anwendung der Bewertungsmethodik

In diesem Abschnitt wird das zuvor vorgestellte Bewertungsverfahren beispielhaft angewendet.

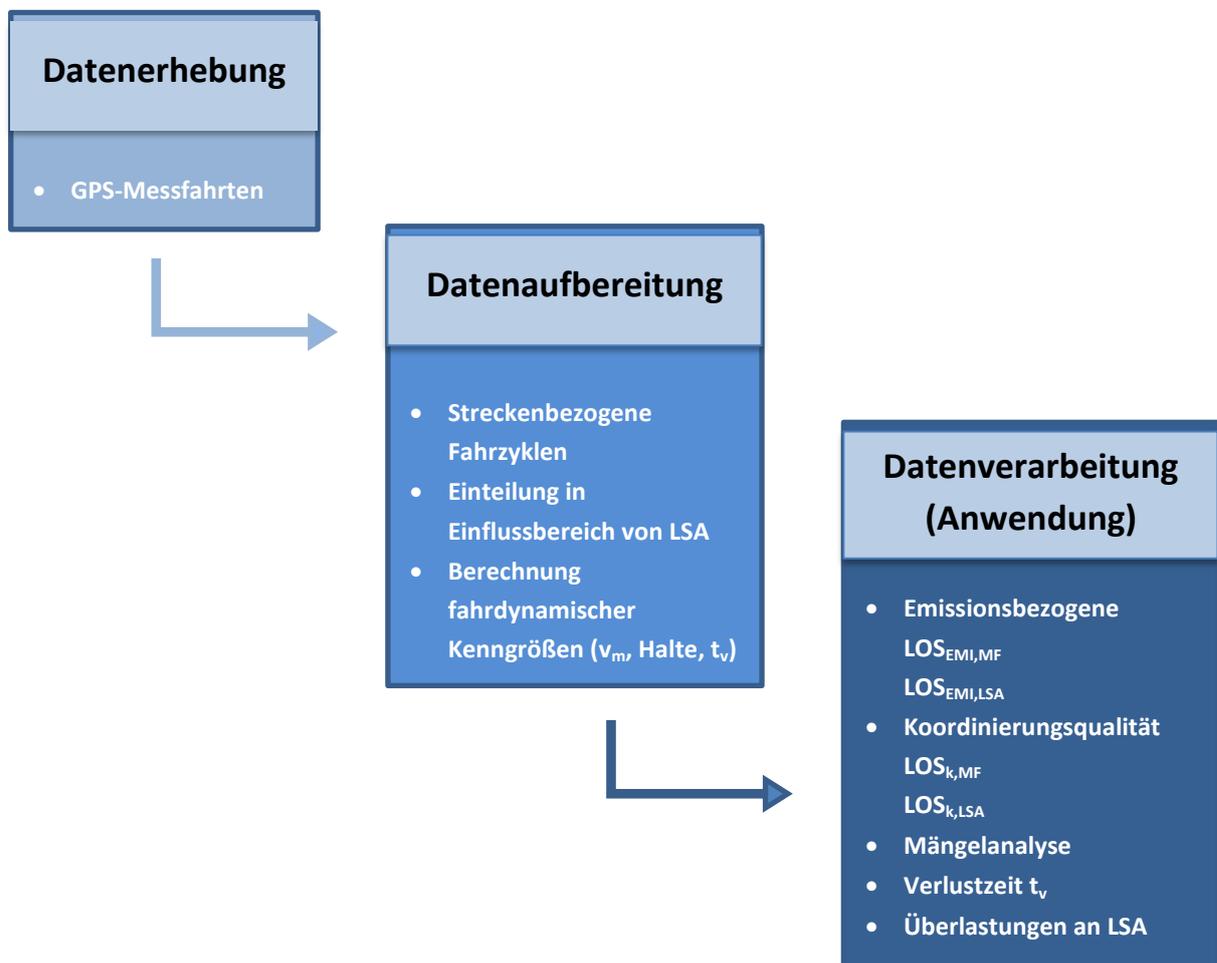
Zunächst wird aber auf die Datengrundlage, die GPS-Trajektorien, und deren Aufzeichnung und das dafür notwendige Messkonzept eingegangen (Kapitel 4.1).

Neben der Datenerhebung ist die Aufbereitung und das Pre-Processing (Kapitel 4.2) der aufgezeichneten Trajektorien ein wesentlicher Bearbeitungsschritt, was in weiterer Folge erklärt wird.

Wesentliche Bearbeitungsschritte sind dabei die Unterteilung der Messdaten in einzelne Fahrtzyklen und Einflussbereiche (siehe Kapitel 3.1.) sowie die Datenbereinigung und Festlegung der Datenstruktur. Darüber hinaus werden häufig auftretende Fehlerquellen bei der Datenaufbereitung diskutiert.

Sind die Messdaten soweit aufbereitet, dass Eingangsgrößen für das Bewertungssystem bereits berechnet wurden, folgt der letzte Schritt der Datenverarbeitung, in der das eigentliche Bewertungssystem erst angewendet wird (Kapitel 4.4).

Ein weiterer wichtiger Punkt im Zuge der Anwendung des Bewertungsverfahrens ist die Kenntnis über den notwendigen Stichprobenumfang der einzelnen Kenngrößen. Dies ist insofern wichtig, als dass eine statistisch aussagekräftige Bewertung nur möglich ist, wenn die Kenngrößen aus einer bestimmten Anzahl an Stichproben (Anzahl der Messfahrten) erhoben werden. In diesem Kapitel können deshalb auch Empfehlungen für mögliche Messkonzepte vorgestellt werden (4.3).



4.1 Datenerhebung

„Als Messfahrzeug dient ein gewöhnlicher PKW, der mit einem GPS-Empfänger und einem Gerät zum Aufzeichnen der GPS-Daten (GPS-Logger) ausgestattet ist. Gewöhnlich sind beide Funktionen in einem Gerät integriert. Dieses Fahrzeug fährt ausgewählte Routen im Untersuchungsgebiet ab und protokolliert so die Weg-Zeit-Verläufe (Trajektorien) entlang dieser Routen. Diese Daten werden auch als Floating Car Daten (FCD) bezeichnet“ (BMVBS, 2010, S. 120).

Als Messsystem wurde ein Gerät der Firma Racelogic verwendet das neben der GPS-Datenaufzeichnung auch synchron ein Video der Messfahrt aufzeichnet und oft im Motorsport zum Einsatz kommt. Das System wurde vorkonfiguriert und zeichnet mit einer Abtastrate von 10 Hz (10 Abtastungen pro Sekunde) auf. Dabei wird vom Hersteller eine Genauigkeit der Position von +/- 5m in 95% der Messwerte garantiert. Die Geschwindigkeit wird bei diesem Gerät ebenfalls mitprotokolliert und zwar mit einer Genauigkeit von 0,2 km/h (im Durchschnitt bei 4 Proben) (Vgl. Racelogic, 2012).

Bei der Auswertung der aufgezeichneten Trajektorien wurde eine sehr hohe Datenqualität erreicht, welche für das Bewertungsverfahren über die Maße ausreichend ist. Aus Erfahrungen mit GPS-Loggern am Institut für Straßen- und Verkehrswesen der TU Graz geht hervor, dass auch weit günstigere Geräte für die hier benötigte Aufzeichnung von Weg-Zeit Trajektorien geeignet sind. Eine Abtastrate von 1-5 Hz kann ebenfalls als ausreichend angesehen werden.



Abbildung 60: Racelogic Video VBOX Pro (Racelogic, 2012) und Messaufbau (rechts)

Die aufgezeichneten Video-Daten dienen dazu, Haltelinienpositionen auch über die Messfahrt selbst zu referenzieren was vor allem für die Unterteilung der Messdaten in Einzelzyklen und Abschnitten von großer Bedeutung ist (siehe Kapitel 4.3).

Der Datenlogger speichert die aufgezeichneten Fahrten in einem herstellerspezifischen Datenformat „vbo-Datei“ werden je nach Abtastrate zeilenweise folgende Informationen gespeichert :

- Anzahl der GPS-Sateliten, die zur Positionsbestimmung verwendet werden
- Die aktuelle GPS-Zeit
- Position auf der Erdoberfläche (Latitude / Longitude)
- Aktuelle Geschwindigkeit
- Und weiter nicht verwendete Information (z.B. Höhe oder Beschleunigungswert)

Bei der Aufzeichnung von realen GPS-Trajektorien vor allem in innerstädtischen dicht verbauten Gebieten gibt es einige Besonderheiten zu beachten.

„Bei der Ortung mit Satellitensystemen treten Reflexionen auf, wenn sich beispielsweise die Empfangsanlage zwischen hohen Gebäuden befindet und zum Satelliten keine Sicht besteht. Die an der Empfangsantenne eintreffende Welle hat in diesem Fall eine Wegstrecke zurückgelegt, die länger ist als die Wegstrecke einer direkten Welle. Die Folge ist, dass eine zu große Entfernung

gemessen wird und ein entsprechender Ortungsfehler entsteht. Treffen an der Empfangsanlage sowohl eine direkte als auch eine reflektierte Welle oder mehrere reflektierte Wellen ein, so ergeben sich ebenfalls entsprechende Entfernungs- und Ortungsfehler. Diese so genannte Mehrwegeausbreitung tritt bei Empfangsanlagen in bebautem Gelände, Stadtgebieten und im Bergland auf. Die Mehrwegeausbreitung kann unter Umständen eine Ortung wegen zu großer Fehler unmöglich machen“ (Mansfeld, 2010, S. 58).

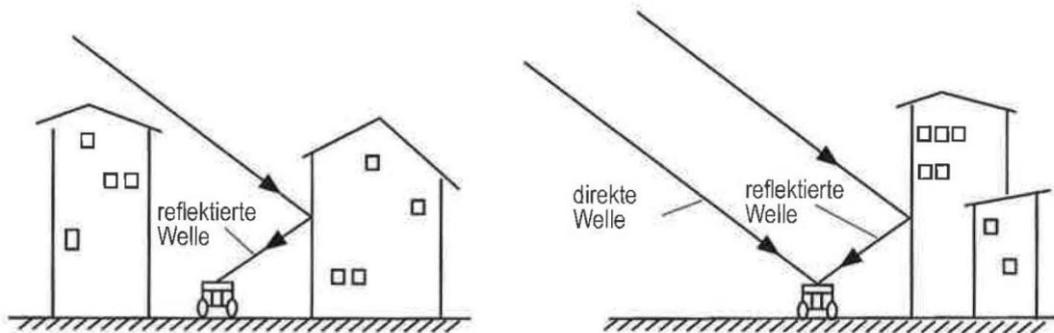


Abbildung 61: Reflexionen des GPS-Signals an Häuserschluchten (Mansfeld, 2010, S. 58)

Während der durchgeführten Messfahrten im Grazer Stadtgebiet konnten Störungen durch Reflexionen bereichsweise beobachtet werden. Da die Anzahl an gefundenen GPS-Satelliten in der Regel größer 4 war, konnten die Reflexionseinflüsse durch den verwendeten Datenlogger kompensiert werden. Zur Positionsbestimmung benötigt das GPS-Gerät zumindest 4 gültige Satellitensignale. Je größer die Anzahl der gefundenen Satelliten ist, umso weniger Störanfällig und genauer wird die Positionsbestimmung. In einigen wenigen Fällen mussten Messfahrten durch zu große Störeinflüsse verworfen werden. Diese sind insbesondere bei sehr engen Häuserschluchten erkennbar, bei denen das GPS-Gerät in einem Radius von etwa 30m, sprunghaft die Positionskordinaten errechnet (siehe Abbildung 62).

Eine weitere Fehlerquelle beim Aufzeichnen der GPS-Positionsdaten waren Streuungen während eines Halts bzw. auf Grund von sehr geringen Geschwindigkeiten, z. B.. vor einer Haltelinie einer VLSA. Es hat sich gezeigt, dass das verwendete Messsystem, „Racelogic Video VBOX“ sehr genaue Positionsdaten aufzeichnet wenn sich das Messfahrzeug in Bewegung befindet. Bei Stillstand des Messfahrzeuges streut die vom Gerät aufgezeichnete Position in einem Radius von etwa 4-5 m. In der Abbildung 62 ist dieser Effekt grafisch aufbereitet zu sehen. Es handelt sich dabei um einen Haltevorgang vor einer Haltelinie einer VLSA, die als Linie dargestellt ist. Das Messfahrzeug befand sich für etwa 20 sek. im Stillstand. Die Streuung der dabei aufgezeichneten Position ist deutlich zu erkennen. Bei der gleichzeitigen Aufzeichnung der Geschwindigkeiten, durch das GPS-Gerät, wird jedoch korrekterweise die momentane Geschwindigkeit mit 0 km/h, aufgezeichnet, sodass die untersuchten Kenngrößen (siehe Kapitel 3.2) durch diesen Fehler unbeeinflusst bleiben.

Neben diesen beiden Fehlerquellen bei der Positionsbestimmung und GPS-Datenaufzeichnung ,gibt es noch weitere Besonderheiten die zu beachten sind. In dieser Arbeit werden die vom Gerät aufgezeichneten Trajektorien ohne weitere Überarbeitung, Glättung oder Filterung übernommen und weiterverarbeitet. Typische Fehlerquellen sind kurzzeitige Satellitensignalverluste, sprunghafte Positionsaufzeichnungen oder Datenaufzeichnungsfehler. Mithilfe von Filter und Glättungsoperationen können solche Störeffekte vermieden bzw. ausgebessert werden, was aber in dieser Arbeit nicht behandelt wird. Fehlerhafte Aufzeichnungen wurden nicht mehr weiterverwendet und verworfen.

Es hat sich in der Datenverarbeitung gezeigt, dass 4% der aufgezeichneten Daten verworfen werden mussten.

Im Allgemeinen gilt als Voraussetzung für die Datenerhebung (Messfahrten), dass zum Messzeitpunkt keine außergewöhnlichen Verkehrsverhältnisse vorliegen. Dazu zählen in erster Linie die vorherrschende Witterung (z.B. Starkregen, Schneefall...), beziehungsweise sonstige verkehrliche Störungen wie, Baustellen oder Unfälle im Untersuchungsgebiet.

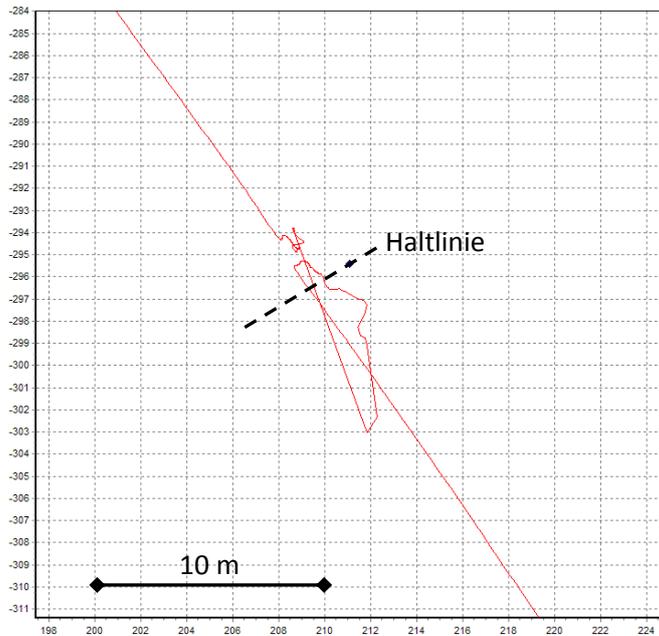


Abbildung 62: Streuung des GPS-Signals bei Stillstand

4.2 Datenaufbereitung

Die aufgezeichneten GPS-Trajektorien werden nach der Aufnahme in einer Software des Herstellers, Racelogic, weiterverarbeitet, um sie für weitere Untersuchungen aufzubereiten. Im Wesentlichen müssen für die weitere Verarbeitung die kontinuierlich aufgezeichnete Trajektorie in einzelne Zyklusfahrten unterteilt werden. Das ist nötig um die Analyse an den Einflussbereichen von VLSA zu ermöglichen und sowohl emissionspezifische als auch fahrdynamische Kenngrößen einer einzelnen VLSA zuordenbar zu machen (Siehe Kapitel 3.1 sowie 3.4)

Die untere Grafik soll die Verarbeitung und Einteilung der aufgezeichneten Daten aus den GPS-Messfahrten verdeutlichen.

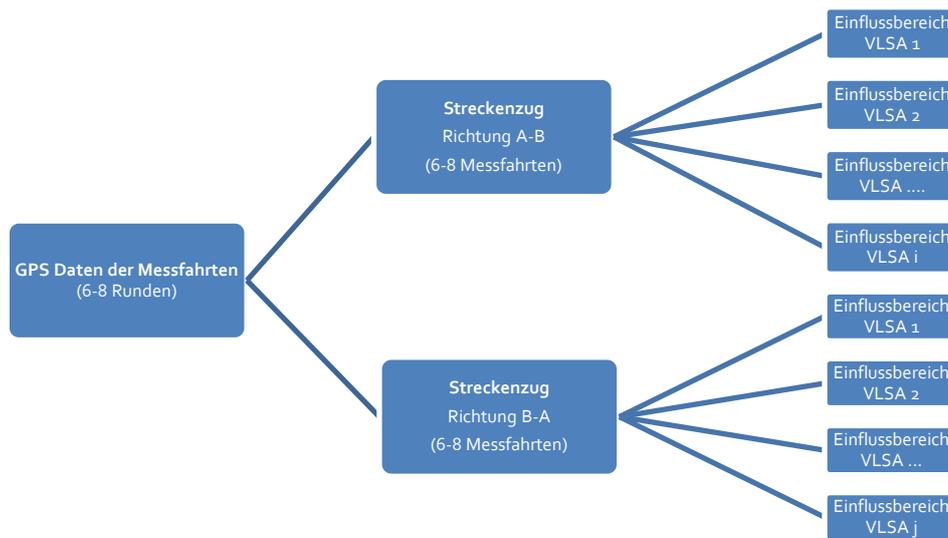


Abbildung 63: Aufbereitung der GPS-Trajektorien

Im Folgenden wird beschrieben, mit welcher Methodik bei der Datenaufbereitung gearbeitet wird und welche Hilfsmittel zur Anwendung gekommen sind.

Im ersten Schritt der Datenaufbereitung wird die gesamte Messfahrt (6-8 Runden je Steuergebiet) in Einzelfahrten richtungsbezogen unterteilt (richtungsbezogene Einzelzyklen). Hiefür wird jeweils vor der ersten VLSA eine Startmarkierung und nach Überfahrt der letzten VLSA eine Zielmarkierung gesetzt. Diese Markierungen können einfach mit der Herstellersoftware der GPS-Geräte „V-Tools“ gesetzt werden. Das Ergebnis davon ist eine richtungsspezifische Aufteilung der Messfahrten mit ortsspezifischen Markierungen der Haltelinien entlang der Messstrecke. Das Datenformat der Eingangsdatei ist herstellereinspezifisch eine sog. „vbo-Datei“. Nach dem ersten Verarbeitungsschritt wurde daraus ein zur Weiterverarbeitung gängiges Dateiformat „.csv-Datei“, gewählt.

Zusammenfassend wird also die ursprüngliche Datei, die etwa 6-8 „Runden“ der Messfahrt beinhaltet in 6-8 richtungsspezifische Einzelfahrten (insgesamt 12-16 Einzelfahrten) unterteilt und in ein für die weitere Verarbeitung gängiges Dateiformat umgewandelt. Darüber hinaus wurden in die Einzelzyklen ortsfeste Informationen von Haltelinien eingearbeitet, die für die weitere Anwendung unumgänglich sind.



Abbildung 64: Screenshot der Datenaufbereitungssoftware „VTools“ von Racelogic

Um nach Kapitel 3.1 die einzelnen Einflussbereiche der VLSA entlang des Streckenzuges weiter zu verarbeiten ist es ebenfalls für manche Auswertungen nötig, daraus einzelne Dateien im „.csv Format“ zu unterteilen. Hierfür wurde ein Algorithmus entwickelt um diesen zeitaufwendigen Bearbeitungsschritt zu automatisieren. Grundidee dabei ist, in der Einzelfahrt wiederum „Markierungen“ zu setzen, die den jeweiligen Einflussbereich kennzeichnen um im nächsten Schritt den gekennzeichneten Einflussbereich auszuschneiden und in einer neuen Datei abzuspeichern.

Der Einflussbereich einer VLSA wird ausgehend von der Haltelinie berechnet bzw. festgelegt. Für die Verarbeitung setzt dies voraus Kenntnis über die Positionierung der Haltelinien entlang der Einzeltrajektorien zu haben. Es gilt also die Überfahrt einer Haltelinie in der GPS-Trajektorie der Einzelfahrt zu kennzeichnen. Dafür stehen mehrere Verfahren zur Auswahl.

Die genaueste Lösung wäre die Position der einzelnen Haltelinien mittels GPS-Empfänger aufzunehmen und mit den Einzeltrajektorien zu verschmelzen. Dies würde eine Erfassungsgenauigkeit der Haltelinie von weniger als +/- 1m ermöglichen. Die Schwierigkeit stellt aber die Einarbeitung der Haltelinienkoordinaten in die Einzeltrajektorie dar.

Eine andere Möglichkeit bietet sich bei dem in dieser Arbeit verwendeten Messsystem „Racelogic Video-Box“ an. Wie im Kapitel 4.1. erläutert, zeichnet das Gerät zusätzlich zu den GPS-Trajektorien Video Aufzeichnungen auf. In der Nachbereitung ist dann die GPS-Trajektorie und das Video der Messfahrt miteinander verschmolzen. In der Software ist es dann einfach möglich, Überfahrten von Haltelinien visuell zu erfassen und zu markieren. Da die Haltelinienpositionen örtlich festgelegt ist,

wird eine einfache Automatisierung verwendet, welche die Haltelinienmarkierungen in die Einzeltrajektorie integriert. In Abbildung 65 ist ein Auszug aus der .csv-Datei einer Einzeltrajektorie mit eingetragener Haltelinienmarkierung (Isa 1) dargestellt.

```

1 Run num,Description ,UTC Time,Time,Dist (m),Speed(km/h),Save run,File name,Graph run,Latitude,Longitude,Satellites
2 8,Line Start,"171628,300",0,"0,00","49,049","",SG_70_Abend,"",2823,50519,"-925,58841",7
3 8,Time Line,"171628,500","00:00,20","2,72","48,821","",,,,,,2823,50661,"-925,58784",8
4 8,Time Line,"171907,300","02:39,00","351,08","17,140","",,,,,,2823,43400,"-925,61203",8
5 8,Time Line,"171907,500","02:39,20","352,09","18,965","",,,,,,2823,43341,"-925,61219",8
6 8,Time Line,"171907,700","02:39,40","353,19","20,515","",,,,,,2823,43279,"-925,61236",8
7 8,Time Line,"171907,900","02:39,60","354,35","21,070","",,,,,,2823,43218,"-925,61253",8
8 8,Time Line,"171908,100","02:39,80","355,53","21,160","",,,,,,2823,43153,"-925,61270",7
9 8,Time Line,"171908,300","02:40,00","356,72","21,291","",,,,,,2823,43089,"-925,61288",8
10 8,Isa 1,"171908,400","02:40,09","357,31","21,091","",,,,,,2823,43056,"-925,61297",8
11 8,Time Line,"171908,500","02:40,20","357,89","21,188","",,,,,,2823,43024,"-925,61306",7
12 8,Time Line,"171908,700","02:40,40","359,07","21,388","",,,,,,2823,42960,"-925,61327",7
13 8,Time Line,"171908,900","02:40,60","360,25","21,012","",,,,,,2823,42904,"-925,61347",8
14 8,Time Line,"171909,100","02:40,80","361,43","21,250","",,,,,,2823,42844,"-925,61367",8
15 8,Time Line,"171909,300","02:41,00","362,60","21,070","",,,,,,2823,42803,"-925,61390",8
16 8,Time Line,"171909,500","02:41,20","363,80","22,286","",,,,,,2823,42734,"-925,61414",7

```

Abbildung 65: Auszug aus der .csv-Datei einer Einzeltrajektorie mit Haltelinienmarkierung

Die Genauigkeit der Markierung liegt im Bereich von +/- 2m, was aber für dieses Arbeit und das Bewertungssystem ausreichend ist. Wenn man mit 5 Hz aufzeichnet also alle 0,2 sek und mit etwa 40 km/h fährt wird alle 2,2m eine Datenzeile aufgezeichnet. Dieser Vergleich soll verdeutlichen, dass die Genauigkeit der Haltelinie in jedem Fall ausreicht.

4.3 Abschätzung der erforderlichen Trajektorien

Um die Qualitätsstufeneinteilung von signalisierten Streckenzügen zu ermöglichen ist es nötig eine erforderliche Mindestanzahl an Messfahrten zur Kenngrößengenerierung durchzuführen um ein aussagekräftiges Ergebnis zu gewährleisten. In diesem Abschnitt der Arbeit werden daher übliche statistische Verfahren angewendet mit denen die Stichprobenanzahl berechnet werden kann. Ebenfalls werden Erfahrungen und Empfehlungen von ähnlichen Untersuchungen bzw. Forschungsprojekten gesammelt und zusammengefasst.

In Schnabel (2010), wird ein statistisches Verfahren erwähnt mit dem die erforderliche Stichprobengröße in Abhängigkeit von der Häufigkeitsverteilung der jeweiligen Kenngröße unter Berücksichtigung einer gewünschten Genauigkeit, errechnet werden kann. Dabei handelt es sich um einen zweiseitigen Hypothesentest. Dieses Verfahren wurde u.A. im Projekt AMONES (BMVBS, 2010) angewendet. Die Erhebungsmethode in diesem Projekt ist mit den hier durchgeführten Messfahrten durchaus vergleichbar. Bei AMONES wurden ebenfalls GPS-Trajektorien zur Messung von Reisezeiten an Hauptverkehrsstraßen herangezogen.

Mit der erforderlichen Stichprobenanzahl an Messfahrten soll eine qualitative Aussage über die verkehrliche Situation für einen durchschnittlichen Werktag, ermöglicht werden.

In Lohse (2010), wird ein Verfahren vorgestellt bei dem durch Messfahrten die Koordinierungsqualität von VLSA erhoben wird. Die dafür benötigte Messfahrtanzahl wird mit 6 Fahrten je Richtung und Streckenzug festgelegt. In HBS (2005) wird ebenfalls von einem erforderlichen Messaufwand von mehr als 5 Messfahrten je Richtung, zur Bestimmung der Haltevorgänge, gesprochen. Die für das Koordinierungsmaß benötigte Kenngröße, die Anzahl der Halte entlang des Streckenzuges, wird deshalb in diesem Kapitel nicht näher behandelt. In erster Linie wird der erforderliche Stichprobenumfang für die Reisezeit bzw. die Reisegeschwindigkeit untersucht.

Dabei muss festgelegt werden welchen Umfang die Grundgesamtheit bei der Untersuchung ist. Als Grundgesamtheit wird dabei die Menge aller Fahrten während des Untersuchungszeitraumes, verstanden, die mit den durchgeführten Messfahrten vergleichbar sind. Das bedeutet sie müssen denselben Streckenabschnitt während des Untersuchungszeitraumes durchfahren. Abhängig von der Verkehrsbelastung und dem Untersuchungszeitraum sind das in der Regel einige Hundert Fahrzeuge. Die nachfolgende Abschätzung dient zur Schätzung der Größenordnung der Grundgesamtheit.

Berechnungsschritt/Abschätzung	Ergebnis
Dauer der Messfahrt (Morgenprogramm)	2 h
Durchschnittliche stündliche Verkehrsbelastung der Hauptrichtung (17.01.2012)	~ 3800 Fzg/h
Abschätzung des Anteils an Fahrzeugen die den gesamten Streckenzug durchfahren	~ 80%
Überschlagsmäßige Schätzung der Grundgesamtheit	$2h \times 3800 \text{ Fzg/h} \times 80\% = 6080 \text{ Fzg}$

Tabelle 17: Abschätzung der Grundgesamtheit am Beispiel der Wienerstraße (SG 30)

In den Analysen von Schnabel (2010), ist beschrieben, dass der Umfang der Grundgesamtheit auf die erforderliche Stichprobenanzahl keinen entscheidenden Einfluss hat. In Lohse (2010) wird deshalb festgelegt, dass bei sehr großen Grundgesamtheiten (Stichproben/Grundgesamtheit=0,05) ein vereinfachtes Berechnungsverfahren gültig ist bei dem davon ausgegangen wird, dass die Grundgesamtheit gegen Unendlich strebt.

In diesem Beispiel ist das Verhältnis von Grundgesamtheit und Stichprobe in einer Größenordnung

von 0,001, deshalb kann die vereinfachte Berechnungsweise (Lohse, 2010, S. 8-55) angewendet werden. Diese Bedingung gilt aufgrund ähnlicher Verhältnisse auf den anderen Steuergebieten ebenfalls.

$$n = \frac{k^2 \cdot \sigma^2}{d} \quad [-] \quad \text{gültig für } N \rightarrow \infty \quad (24)$$

Mit :
 n Erforderliche Stichprobenanzahl
 k Statistische Kennzahl
 σ Standardabweichung der Kenngröße
 d Zulässiger Fehler (10 %)

Die statistische Kennzahl ist von der Art der Verteilungsfunktion der Grundgesamtheit abhängig (z. B.. Normalverteilung, schiefe eingipflige Verteilung, unbekannte Verteilung). Im Folgenden wird angenommen, dass es sich bei der Reisezeit bzw. Reisegeschwindigkeit um eine normalverteilte verkehrliche Kenngröße handelt, welche auch in Otterstätter (2011) und Brilon (2003), so behandelt wird. Bei einer statistischen Sicherheit von 90% ergibt sich daraus die statistische Kennzahl mit 1,65 (siehe Lohse 2010, S. 54).

Bei der Berechnung der erforderlichen Stichprobengröße n wurde exemplarisch das Steuergebiet 30 und 41, gewählt. Mit einem zulässigen Fehler von 10%, der auch in den Berechnungen von Brilon (2003) eingesetzt wird, wird abhängig vom Signalprogramm folgender erforderliche Stichprobenumfang mit Formel 24, berechnet:

Steuerprogramm:	SG 30					SG 41				
(je Fahrtrichtung)	n	V	μ [km/h]	σ [km/h]	N	n	V	μ [km/h]	σ [km/h]	N
Morgenprogramm	4	0,11	43,2	4,7	8	17	0,24	37,9	9,5	5
Tagesprogramm	14	0,22	42,0	9,2	8	3	0,01	25,3	2,5	7
Abendprogramm	3	0,07	41,1	3,0	8	12	0,21	38,3	7,9	7
Nachtprogramm	6	0,15	42,7	6,2	8	25	0,30	35,2	10,7	7
Tagesmittel	6	0,14	42,3	5,9	32	20	0,27	34,9	9,5	26

Tabelle 18: Berechnung der erforderlichen Stichprobengröße anhand der Reisegeschwindigkeit am Beispiel der Wienerstraße (SG 30)

Der erforderliche Stichprobenumfang n ist abhängig von der Streuung der Reisezeiten sowie dem Variationskoeffizienten V (siehe S.90). Dies bedeutet, dass bei stark schwankender Verkehrsqualität auf der Hauptverkehrsstraße auch abweichende Reisezeiten auftreten. Der erforderliche Stichprobenumfang für einen Streckenzug liegt in der Größenordnung zwischen 3 und 25 Messfahrten je Strecke, die tatsächlich erreichte Stichprobe N , ist in Tabelle 18, angeführt.

In Brilon (2003, S.24), werden umfangreiche Erfahrungen mit Stichproben von Reisezeitmessungen an Hauptverkehrsstraßen beschrieben. Das Untersuchungsgebiet liegt im Verkehrsnetz von Dresden und die Erfahrungswerte wurde über jährlich durchgeführte Messungen sowie Einzeluntersuchungen gewonnen:

- Mit 6 bis 8 Messfahrten lässt sich ein relativ genaues Bild der Verkehrsverhältnisse zeichnen
- Während charakteristischer Verkehrszustände in bestimmten Verkehrszeiten (z.B. Spitzenverkehrszeit nachmittags, Normalverkehrszeit) sind die Streuungen der mittleren Reisegeschwindigkeit stärker. Anhand der Tagesganglinie sind die Messzeiträume festzulegen
- Haupteinfluss auf die Reisezeit und damit auf die Qualität des Verkehrsablaufes haben die Halte- bzw. Wartezeiten an den Knotenpunkten.

- Nur bei zweistreifigen Fahrbahnen und Fahrbahnen mit straßenbündigem Bahnkörper kommt es häufiger zu Behinderungshalten auf der freien Strecke.
- Reisezeitmessungen liefern gleichzeitig Aussage über

In **Wiethold (2007)**, wurden Qualitätsuntersuchungen von innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen ebenfalls, anhand von Reisezeitmessungen aus GPS-Trajektorien erhoben. Parallel dazu wurden auch Messungen der Reisezeiten mittels Kennzeichenerfassung für 2 Untersuchungsstrecken, durchgeführt. Dies sollte einen Vergleich zwischen den stichprobenartigen Reisezeiten aus den GPS-Messfahrten und der Reisezeitmessungen der Grundgesamtheit durch die Kennzeichenerfassung, ermöglichen. Dieser Messaufbau wurde an zwei Streckenzügen angewendet. Beide Streckenzüge befinden sich in Düsseldorf (Brehmstraße/Lindemannstraße und Kettwiger Straße/Kruppstraße).

„Die Reisezeitmessungen ermöglichen eine nahezu vollständige Erfassung der Grundgesamtheit aller Fahrzeuge in der koordinierten Hauptrichtung des Straßenzuges. Durch den Vergleich mit der begrenzten Stichprobe der GPS-Messung kann beurteilt werden, ob die GPS-Messfahrten ausreichend genau die Gesamtheit der Fahrzeuge repräsentieren können.“ (Wiethold, 2007, S. 63)

An der Brehmstraße/Lindemannstraße (ca. 1,8 km) wurden insgesamt 711 Fahrzeuge, während des Untersuchungszeitraumes von 15:00 bis 17:00 Uhr, durch die Reisezeitmessung mittels Kennzeichenerfassung erhoben. Dies entspricht der Grundgesamtheit aller Fahrzeuge in koordinierter Hauptrichtung. Mittels GPS-Messfahrten wurden 72 Stichproben der Reisezeiten erfasst. Um überprüfen zu können ob die Stichprobe ausreichend war und die Reisezeiten der Grundgesamtheit abbilden kann, wurde ein Vergleich über die Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Reisezeiten angestellt (χ^2 -Test).

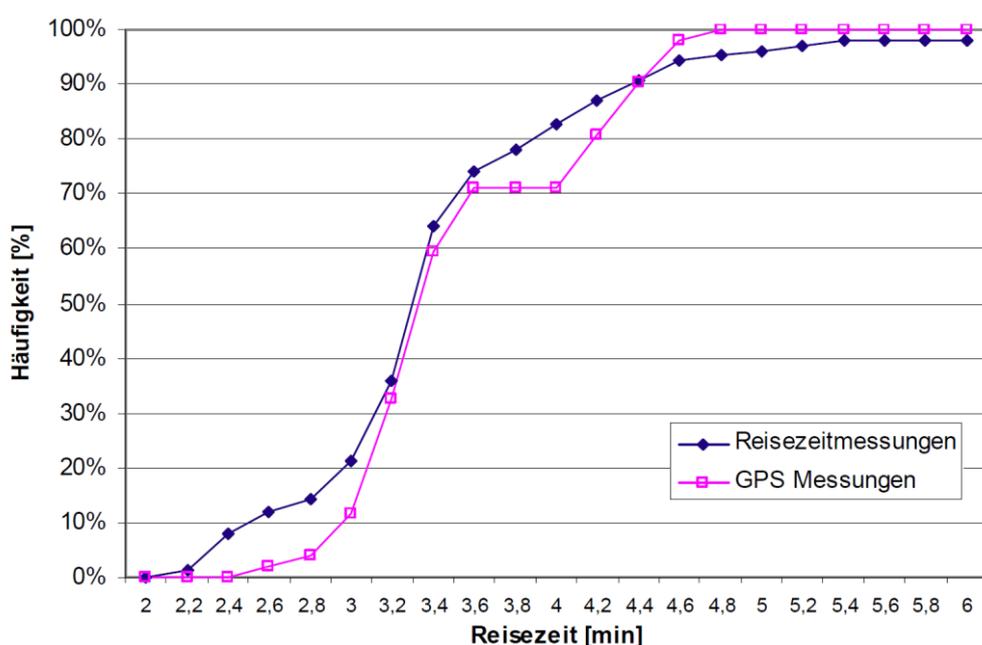


Abbildung 66: Vergleich der Reisezeitverteilung aus GPS-Messfahrten und Kennzeichenerfassung am Beispiel der Brehmstraße/Lindemannstraße (Wiethold, 2007, S. 74)

Die Abbildung 66 zeigt im Bereich der Mittelwerte (3,2 bis 3,6 min) eine sehr genaue Übereinstimmung der beiden Reisezeitverteilungen. Sehr ähnliche Ergebnisse wurden an der Kettwiger Straße/Kruppstraße (ca. 2km) erreicht, wo eine Grundgesamtheit von 371 Fahrzeugen und eine Stichprobe von 73 GPS-Messfahrten, gemessen wurde.

In den statistischen Auswertungen des χ^2 -Test zeigt sich, bei einem Signifikanzniveau von 0,05, dass die Messergebnisse der GPS-Messfahrten die Reisezeitmessungen der Grundgesamtheit ausreichend genau repräsentieren (siehe Wiethold (2007), Kap. 5).

Das Messkonzept in AMONES (2010), ist sehr ähnlich, dem in dieser Arbeit verwendeten. Eine Gliederung in einzelne Steuergebiete (Streckenzüge), Fahrtrichtungen und Steuerprogrammen (z.B. Morgenporgramm) erfolgen in beiden Erhebungen.

Die erforderliche Anzahl an GPS-Messfahrten (Stichproben) wird in AMONES (2010), bei einem statistischen Fehler von 5% und einer angenommenen Normalverteilung, mit 20 bis 90 Messfahrten, abgeschätzt. Entscheidend dabei ist das Verhältnis aus Standardabweichung und Mittelwert, dem Variationskoeffizienten V .

$$V = \frac{\sigma}{\mu} \quad [-] \quad (25)$$

Mit : σ Standardabweichung der Kenngröße
 μ Mittelwert aller Stichproben

„Gründe für einen steigenden Variationskoeffizienten sind zum Beispiel steigende Abstände zwischen den Knotenpunkten wodurch sich Fahrzeugpulks auflösen und die Streuung erhöht wird“ (BMVBS, 2010, S. 122). Weitergehend wird in AMONES (2010), auf die Problematik eingegangen, dass die durch GPS-Messfahrten erhobene Stichprobe nicht komplett zufällig ist, weil ein Fahrzeug die Messstrecke in zeitlich bestimmten Abständen wiederholt. Dies wird in der klassischen Berechnung des Stichprobenumfangs nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund wird in AMONES, 2010 die erforderliche Stichprobenanzahl mithilfe von Simulationsmodellen (Mikrosimulation) ermittelt.

„Da festgestellt werden soll, welche Stichprobengröße erforderlich ist, um mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% einen Fehler von maximal +/- 5% bezüglich des echten Mittelwertes zu erreichen, wird die Simulation jeweils 10.000 Mal durchgeführt und anschließend geprüft wie viele der 10.000 Simulationen einen Mittelwert innerhalb der gewünschten Grenzen aufweisen. Ist die Genauigkeit größer (kleiner) als gefordert, dann wird die Stichprobengröße reduziert (erhöht) und ausschließlich ein neues Simulationsset durchgeführt.“

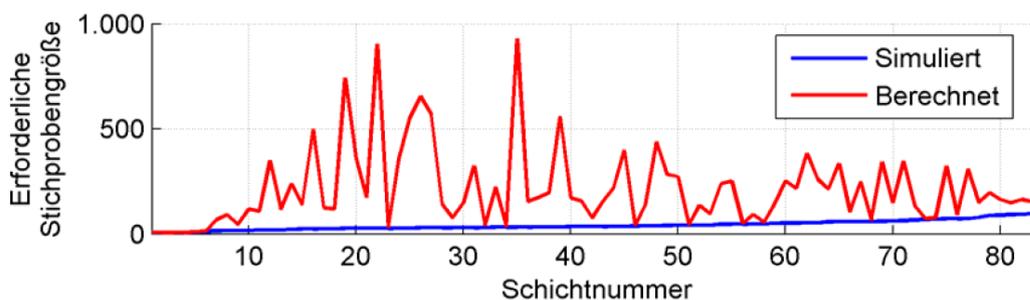


Abbildung 67: Gegenüberstellung der berechneten erforderlichen Stichprobengröße und der simulierten (BMVBS, 2010, S. 127)

In der Abbildung 67 sind die Ergebnisse aus der Gegenüberstellung vom berechneten Stichprobenumfang zur Simulierten Stichprobengröße dargestellt. Eine Schichtnummer entspricht einem untersuchten Streckenzug (Route). Es ist zu erkennen, dass die simulierte Stichprobe deutlich kleiner ist, als der berechnete Stichprobenumfang.

Aus dieser Untersuchung heraus wird in AMONES (2010) folgende Tabelle 19 als Empfehlung für den erforderlichen Stichprobenumfang in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten und dem Verteilungstyp gegeben. Der Verteilungstyp ist abhängig von zunehmenden Verschiebungen im Verkehrsverhalten wie z.B. durch Auflösung von Fahrzeugpulks (Vgl. BMVBS, 2010, ab S. 114).

Verteilungstyp		Variationskoeffizient V	<0,18	<0,24	$\geq 0,24$
		Zunehmende Streuung (z. B. Überlastsituation, lange Strecken)			
Normalverteilt	Zunehmende Verschiebung (z. B. Gruppenbildung durch Umlaufzeiten) ↓		20	60	70
Eingipflig			30	30	80
Unbekannt			30	50	40

Tabelle 19: Empfehlung für die erforderliche Stichprobengröße (BMVBS, 2010, S. 128)

In Otterstätter (2011), werden ähnliche Ergebnisse präsentiert, wobei die erforderliche Stichprobe der GPS-Messfahrten ebenfalls stark von Variationskoeffizienten und dem Verteilungstyp ist.

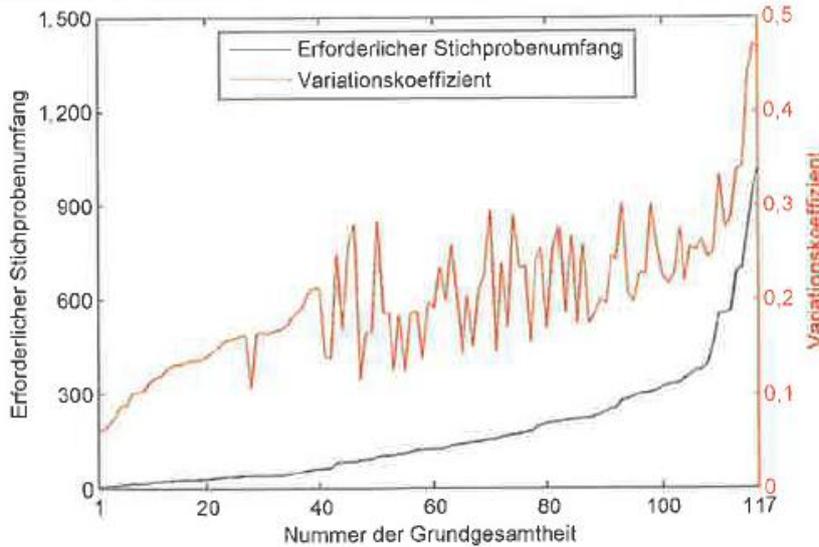


Abbildung 68: Erforderlicher Stichprobenumfang und Variationskoeffizient in Abhängigkeit zur Grundgesamtheit (Otterstätter, 2011, S. 704)

Da im Vorfeld einer Reisezeitmessung weder der Verteilungstyp noch der Variationskoeffizient bekannt ist, werden in Otterstätter (2011) Empfehlungen aufgrund der Untersuchungen der Reisezeitmessungen gegeben (siehe Tabelle 20). Die Einstufung sollte dabei qualitativ bzw. durch lokales Expertenwissen erfolgen.

Grundgesamtheit mit...	Mittelwert (des simulativ ermittelten Stichprobenumfang)	Maximalwert (des simulativ ermittelten Stichprobenumfang)
...nicht bis schwach gestörtem Verkehrsfluss ($V < 0,18$)	25	50
...mittel bis stark gestörtem Verkehrsfluss ($V \geq 0,18$)	45	110

Tabelle 20: Empfehlung für die erforderliche Stichprobengröße (Otterstätter, 2011, S. 709)

Fazit und Empfehlung

Die Erkenntnisse der Untersuchungen in AMONES (2010) sowie Otterstätter (2011) zeigen, dass der erforderliche Stichprobenumfang für Reisezeitmessungen aufgrund von GPS-Messfahrten, aus der klassischen Berechnung (siehe Formel 20, S. 88) deutlich überschätzt wird. Es sind in den meisten Fällen deutlich weniger Trajektorien als Stichprobe nötig.

In Wiethold (2007), sind etwa 70 Messfahrten je Richtung und Signalprogramm (Messzeitraum: 2h) durchgeführt worden, was in jedem Fall als ausreichend herausgestellt hat. Brilon (2003) reduziert die nötige Messfahrtanzahl, durch langjährige Vergleichsmessungen im Hauptverkehrsstraßennetz von Dresden, auf 6 bis 10 Messfahrten. Diese geringe Stichprobe ist allerdings nur gültig, wenn die

Streuungen der mittleren Reisegeschwindigkeit nicht erheblich sind. Eine genauere Beschreibung fehlt, es wird lediglich darauf hingewiesen, dass es in Übergangsphasen (z.B. Morgenspitze geht über in Tageszustand) zu stärkeren Streuungen kommt. Diese Erkenntnisse decken sich auch mit den Untersuchungen von Otterstätter (2011) sowie AMONES (2010), wonach sich starke Schwankungen der Reisezeiten im Variationskoeffizient V , widerspiegeln. Dieser ist in weiterer Folge ein Indikator für den tatsächlich nötigen Stichprobenumfang, der wie oben erwähnt deutlich geringer ausfällt wie der statistisch berechnete. Da im Vorfeld einer Erhebung weder der Variationskoeffizient noch der Verteilungstyp bekannt sind, empfiehlt sich die Tabelle 20 als Abschätzung des tatsächlich nötigen Stichprobenumfangs zu nutzen.

Kann der Verteilungstyp im Vorfeld abgeschätzt werden (z.B. durch vorhandene Messdaten), ist die Tabelle 19 anzuwenden.

Zur Erhebung der Haltevorgänge (Koordinierungsmaß) sind in aufgrund der bisherigen Erfahrungen von Schnabel (2006) und Lohse (2010) sowie HBS (2005) etwa 5 bis 8 Messfahrten, je Streckenzug nötig. Ebenfalls großen Einfluss ist dem Verteilungstyp (Eingipflig, Normalverteilung, Unbekannt) der gemessenen Reisezeit zuzuschreiben.

In dieser Arbeit wird der tatsächlich erforderliche Stichprobenumfang n , nach vorigen Tabellen, nicht erreicht. Weil sich Problemstellen und mangelhafte VLSA -Steuerungen während den Messfahrten örtlich wiederholen, können die erforderlichen Messfahrten jedoch reduziert werden. Im nachfolgenden Abschnitt 4.4 wird dies überprüft und im darauf folgenden Abschnitt 5 (S. 99) diskutiert. Abhängig vom Steuerprogramm, können Mängel auf Teilabschnitten bzw. Streckenzügen mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Bewertungsverfahren, bereits bei einer tatsächlichen Stichprobe N , von 5-8 Messfahrten, erkannt werden. Eine qualitative Bewertung ist mit diesem geringen Stichprobenumfang also möglich. Zur detaillierten Auswertung von Reisezeiten wird jedoch ein Stichprobenumfang von mindestens 25 Messfahrten, nach Tabelle 20, empfohlen.

4.4 Anwendungsbeispiele

In den folgenden Anwendungsbeispielen wird die in Abschnitt 3 beschriebene Bewertungsmethodik auf 2 Streckenzüge im Grazer Stadtgebiet angewendet. Die beiden Testgebiete haben ähnliche Streckencharakteristik (Siehe Anhang A1), weisen jedoch insbesondere bei der Durchschnittsgeschwindigkeit und der Streckenzuglänge maßgebliche Unterschiede auf. Beide Strecken verfügen über eine koordinierte Lichtsignalsteuerung.

4.4.1 Graz – Wienerstraße

- Analyse des Streckenzuges (stadteinwärts):

Programm	Messfahrt	T [s]	Dist [m]	$V_{m,MF}$ [km/h]	Halte [-]	k_{MF} [-]	Mehrfach halt	LOS k_{MF}	LOS $k_{MF,EMI}$	k_{SP} [-]	$V_{m,SP}$ [km/h]	Überlastun ϵ	LOS k_{SP}	LOS $k_{SP,EMI}$
ABEND	1	247,4	3096,5	45,1	1	88	0	B	A	87,50	45,41	0	B	A
ABEND	2	259	3102,4	43,1	1	88	0	B	A					
ABEND	3	245,8	3111,6	45,6	1	88	0	B	A					
ABEND	4	320,4	3108,3	34,9	3	63	0	D	C					
ABEND	5	254,4	3101,9	43,9	0	100	0	A	A					
ABEND	6	240,8	3101,6	46,4	1	88	0	B	A					
ABEND	7	297	3092,4	37,5	1	88	0	B	B					
ABEND	8	226,2	3091,8	49,2	0	100	0	A	A					
MORGEN	1	229	3116,0	49,0	1	88	0	B	A	89,29	44,99	1	B	A
MORGEN	2	225,6	3113,1	49,7	0	100	0	A	A					
MORGEN	3	227	3120,6	49,5	0	100	0	A	A					
MORGEN	4	237,4	3127,8	47,4	0	100	0	A	A					
MORGEN	5	240,8	3115,5	46,6	1	88	0	B	A					
MORGEN	6	307,2	3095,8	36,3	1	88	0	B	C					
MORGEN	7	405	3457,8	30,7	3	63	0	D	C					
MORGEN	8	409,2	3076,5	27,1	4	50	1	Ü	D					
NACHT	1	247,4	3096,5	45,1	1	88	0	B	A	78,13	46,50	0	C	A
NACHT	2	279,2	3113,2	40,1	2	75	0	C	B					
NACHT	3	286,2	3107,8	39,1	2	75	0	C	B					
NACHT	4	242	3123,3	46,5	1	88	0	B	A					
NACHT	5	275,4	3115,2	40,7	2	75	0	C	B					
NACHT	6	285,6	3098,1	39,1	2	75	0	C	B					
NACHT	7	289,4	3082,9	38,3	2	75	0	C	B					
NACHT	8	279,4	3088,8	39,8	2	75	0	C	B					
TAG	1	292,2	3089,2	38,1	1	88	0	B	B	89,06	45,52	0	B	A
TAG	2	225,8	3094,7	49,3	0	100	0	A	A					
TAG	3	315,2	3102,4	35,4	2	75	0	C	C					
TAG	4	229,8	3107,6	48,7	0	100	0	A	A					
TAG	5	239,8	3125,4	46,9	1	88	0	B	A					
TAG	6	304	3120,5	37,0	2	75	0	C	C					
TAG	7	297,8	3123,4	37,8	1	88	0	B	B					
TAG	8	229,6	3110,5	48,8	0	100	0	A	A					

Tabelle 21: Ergebnis des Bewertungsverfahrens für Streckenzüge (SG 30)

Interpretation:

Wie erwartet sind bei den beiden Qualitätsstufenbetrachtungen anhand des Koordinierungsmaßes und der mittleren Reisegeschwindigkeit als Emissionsindikator unterschiedliche Ergebnisse erreicht worden.

Die Verkehrssteuerung an der Wienerstraße (stadteinwärts) weist im Allgemeinen eine gute Qualität auf. Betrachtet man beispielsweise das Abendprogramm, wurden nur bei der Messfahrt 4 mäßige Ergebnisse der Qualitätsstufen $LOS_{k_{MF}}$ und $LOS_{k_{MF,EMI}}$ berechnet. Betrachtet man die Haltevorgängen ist zu erkennen, dass während der insgesamt 8 Messfahrten während des Abendprogramms das Messfahrzeug nur bei einer Messfahrt mehr als 2 Haltevorgänge ($k_{MF} < 88\%$) durchlaufen musste. Die berechneten mittleren Reisegeschwindigkeiten der Einzelmessfahrten fallen auch nur in 2 von 8 Fällen unter 43 km/h, was der emissionsbezogenen Qualitätsstufe A entspricht. Über die Mittelwertbildung aller Reisegeschwindigkeiten während des Abendprogramms wird mit 45,4 km/h ein Wert bestimmt, der den Streckenzug emissionstechnisch mit der Qualitätsstufe A bewertet. Die Mittelung über alle k_{MF} des Abendprogramms entspricht mit 87,5% der Qualitätsstufe $LOS_{k_{SP,Abend}} = A$. Insgesamt sind also keine Mängel bei der Betrachtung des Streckenzuges festgestellt worden. Ähnliche Ergebnisse zeigen sich bei der Bewertung des Tagesprogramms. Beim Morgenprogramm

zeigt sich eine Tendenz zur Verschlechterung der Qualität mit ansteigenden Messfahrten bzw. Tageszeit. Ab der 6. Messfahrt ist ein deutlicher Qualitätsabfall zu erkennen. Bei der 8. Messfahrt ist sogar ein mehrfacher Haltevorgang an einer VLSA detektiert worden, was ein Indikator für eine Überlastung ist. Der fortschreitende Qualitätsrückgang während des Morgenprogramms deutet auf eine Zunahme der Verkehrsbelastung (Morgenspitze), die zu Störungen im Verkehrsfluss führt. In Summe über alle Messfahrten des Morgenprogramms ist jedoch eine gute Verkehrsqualität erreicht worden.

Im Nachtprogramm treten im Vergleich zu den anderen Steuerprogrammen über alle Messfahrten vermehrt Haltevorgänge (im Schnitt 2 Halte je Messfahrt) auf, was sich auch in der Qualitätsbewertung mit einem $LOS_{k,SP,Nacht} = C$, widerspiegelt. Aus emissions technischer Sicht wirkt sich diese Tatsache jedoch nicht in großem Maße auf die Qualitätsbeurteilung aus, da die im Mittel über alle Messfahrten gefahren Reisegeschwindigkeit größer als 43 km/h und deshalb mit dem LOS A zu bewerten ist. Eine nähere Betrachtung ist jedoch zu empfehlen, da evt. Steuer mängel an Einzelanlagen vorliegen.

- **Analyse der Einzelanlagen**

Programm	LSA	t [s]	dist [m]	$v_{m,LSA}$ [km/h]	Halte [-]	Mehrfach halt	Halte als Mangel	k_{LSA} [-]	$t_{verlust}$ [s]	LOS k_{LOS}	LOS _{LSA,EMI}	Verlustzeiten als Mangel
ABEND	LSA 02	19.4	282	52.6	0	0		100	-1.0	A	A	
ABEND	LSA 03	68.4	822	43.6	3	0		62.5	9.2	D	A	
ABEND	LSA 04	35.7	326	34.0	2	0		75	12.2	C	C	
ABEND	LSA 05	22.2	225	42.5	1	0		87.5	6.0	B	B	
ABEND	LSA 06	34.7	421	44.8	1	0		87.5	4.3	B	A	
ABEND	LSA 07	14.5	200	49.7	0	0		100	0.1	A	A	
ABEND	LSA 08	40.4	458	45.5	1	0		87.5	7.4	B	A	
ABEND	LSA 09	26.3	367	50.4	0	0		100	-0.2	A	A	
MORGEN	LSA 02	19.3	282	51.3	0	0		100	-0.5	A	A	
MORGEN	LSA 03	68.1	823	39.4	4	1	HALTE !	50	28.5	D	B	kleiner Zeitverlust
MORGEN	LSA 04	34.4	326	41.6	1	0		87.5	7.5	B	B	
MORGEN	LSA 05	21.7	225	44.0	1	0		87.5	4.0	B	A	
MORGEN	LSA 06	34.6	422	46.2	2	0		75	14.1	C	A	
MORGEN	LSA 07	14.5	200	50.9	0	0		100	-0.1	A	A	
MORGEN	LSA 08	40.3	459	47.0	1	0		87.5	5.0	B	A	
MORGEN	LSA 09	26.3	367	48.0	0	0		100	0.0	A	A	
NACHT	LSA 02	19.1	282	47.4	0	0		100	-2.1	A	A	
NACHT	LSA 03	68.1	823	44.1	2	0		75	2.5	C	A	
NACHT	LSA 04	31.7	326	52.0	2	0		75	6.8	C	A	
NACHT	LSA 05	21.4	226	27.2	1	0		87.5	2.7	B	D	
NACHT	LSA 06	33.9	422	50.8	2	0		75	8.0	C	A	
NACHT	LSA 07	14.3	201	55.5	0	0		100	-0.6	A	A	
NACHT	LSA 08	40.3	460	48.8	7	0	HALTE !	12.5	32.6	D	A	mäßiger Zeitverlust
NACHT	LSA 09	26.2	366	46.7	0	0		100	-0.4	A	A	
TAG	LSA 02	19.0	282	46.4	0	0		100.0	-0.1	A	A	
TAG	LSA 03	66.7	823	42.6	2	0		75.0	7.1	C	B	
TAG	LSA 04	30.5	326	42.0	0	0		100.0	6.9	A	B	
TAG	LSA 05	21.1	226	42.3	0	0		100.0	1.5	A	B	
TAG	LSA 06	33.5	422	51.3	1	0		87.5	9.9	B	A	
TAG	LSA 07	14.2	201	51.2	2	0		75.0	7.1	C	A	
TAG	LSA 08	41.7	461	46.6	2	0		75.0	11.0	C	A	
TAG	LSA 09	25.9	365	41.8	0	0		100.0	-0.7	A	B	

Tabelle 22: Ergebnis des Bewertungsverfahrens im Einflussbereich von LSA (SG30)

Interpretation:

In der Tabelle 22 ist die Qualitätsbeurteilung auf Ebene der Einflussbereiche von Einzelanlagen entlang des Streckenzuges dargestellt. Die Auswertungen betreffen die spaltenweise Betrachtung der Bewertungsmatrix (Siehe Abbildung 59).

Auch hier ist die unterschiedliche Qualitätsstufeneinteilung der beiden Bewertungsverfahren deutlich erkennbar. Im Allgemeinen wird die emissionsbezogene Qualitätsstufe besser bewertet als die Bewertung anhand der koordinierten Signalsteuerung. Auffällig ist die herausstechend schlechtere Qualitätsstufe $LOS_{k,LSA,03}$ im Abend und im Morgenprogramm im Vergleich mit den

restlichen VLSA des Streckenzuges. Diese Besonderheit deutet darauf, dass das Grünband der Koordinierung von der LSA 03 vor allem im Morgen und Abendprogramm unterbrochen wird und somit vermehrt Haltevorgänge auftreten.

Bei der Qualitätsanalyse des Streckenzuges des Nachtprogramms wurde bereits ein möglicher Koordinierungsmangel festgestellt. In der Detailbetrachtung auf Ebene der Einzelanlagen wird diese Auffälligkeit bestätigt. Über das Koordinierungsmaß wurde an den LSA 03,04 und 06 die Qualitätsstufe C erreicht und an der LSA 08 sogar LOS D. Darüber hinaus ist die Anzahl der auftretenden Halte an LSA 08 im Vergleich sehr hoch (insgesamt 7 Halte, bei 8 Messfahrten). Dies ergibt auch einen mäßigen Zeitverlust von mehr als 30sek.

Durch diese Detailbetrachtung liegt es nahe vor allem die LSA 08 im Nachtprogramm sowie die LSA 03 im Morgen und Abendprogramm zu überprüfen. Durch die auffällig schlechte emissionstechnische Bewertung der LSA 05 im Nachtprogramm ist es auch ratsam den Verkehrsfluss in diesem Einflussbereich zu überprüfen, um den Grund für die relativ niedrigen Reisegeschwindigkeiten auszuforschen.

4.4.2 Graz – Triesterstraße Nord

- Analyse des Streckenzuges (stadteinwärts):

Programm	Messfahrt	T [s]	Dist [m]	V _{in, MF} [km/h]	Halte [-]	k _{MF} [-]	Mehrfachh alt	LOS k _{MF}	LOS k _{MF,EMI}	k _{SP} [-]	V _{in, SP} [km/h]	Überlastung	LOS k _{SP}	LOS k _{SP,EMI}
ABEND	1	117.6	1317.2	40.32	1	83	0	C	B	76.19	37.95	1	C	B
ABEND	2	154.2	1313.2	30.7	1	83	0	C	C					
ABEND	3	142.6	1317.6	33.3	2	67	0	D	C					
ABEND	4	101.6	1315.2	46.6	0	100	0	A	A					
ABEND	5	213	1318.2	22.3	3	50	1	Ü	E					
ABEND	6	102.8	1321.0	46.3	0	100	0	A	A					
ABEND	7	102.8	1321.0	46.3	0	100	0	A	A					
MORGEN	1	173.4	1299.6	27.0	2	67	0	D	D	60.00	25.28	0	E	E
MORGEN	2	172.2	1304.1	27.3	2	67	0	D	D					
MORGEN	3	220.6	1298.3	21.2	3	50	0	C	E					
MORGEN	4	181.2	1316.6	26.2	2	67	0	D	D					
MORGEN	5	192.8	1329.0	24.8	3	50	0	E	E					
NACHT	1	163.2	1308.3	28.9	2	67	0	D	D	85.71	38.29	0	B	B
NACHT	2	132.6	1311.1	35.6	1	83	0	C	C					
NACHT	3	122	1312.1	38.7	1	83	0	C	B					
NACHT	4	98.4	1317.0	48.2	0	100	0	A	A					
NACHT	5	150	1312.8	31.5	1	83	0	C	C					
NACHT	6	133.4	1307.9	35.3	1	83	0	C	C					
NACHT	7	94.4	1307.6	49.9	0	100	0	A	A					
TAG	1	189.6	1306.0	24.8	2	67	0	D	E	86.11	35.38	1	B	C
TAG	2	146	1310.1	32.3	1	83	0	C	C					
TAG	3	168.4	1308.5	28.0	2	67	0	D	D					
TAG	4	108.6	1310.1	43.4	0	100	0	A	A					
TAG	5	100	1319.1	47.5	0	100	0	A	A					
TAG	6	200.2	1308.6	23.5	4	33	1	Ü	E					
TAG	7	97.6	1305.7	48.2	0	100	0	A	A					

Tabelle 23: Ergebnis des Bewertungsverfahrens von Streckenzügen (SG 41)

Interpretation:

Im Vergleich mit dem in Kapitel 4.4.1. betrachteten Streckenzug ist eine deutlich unregelmäßigere Qualitätsstufeneinteilung der Messfahrten auf den ersten Blick zu erkennen. Bis auf das Morgenprogramm sind dennoch gute bis mittelmäßige Qualitätsstufen für die drei Steuerprogramme erreicht worden.

Das Morgenprogramm wurde während der Messfahrten im Gegensatz zu den anderen tageszeitlichen Signalprogrammen insgesamt nur 5 mal mittels GPS-Messfahrzeug durchfahren. Aufgrund der resultierenden Ergebnisse kann trotzdem eine Qualitätsstufe abgeschätzt werden. Im Mittel wurden dort nach beiden Bewertungskriterien LOS E erreicht. Die mittlere Reisegeschwindigkeit liegt aber nur sehr knapp unterhalb der LOS D-Grenze (26 km/h). Unabhängig von der morgendlichen Verkehrssituation ist das Steuerprogramm in der Betrachtung auf VLSA - Ebene (Mängelanalyse) im speziellen zu überprüfen, um Steuerungsmängel festzustellen.

Während des Nacht- und Tagesprogramms wurde jeweils ein mehrfacher Haltevorgang vor einer VLSA ermittelt. Weil aber die unmittelbar vor und nachfolgenden Messfahrten sehr gute Qualitätsergebnisse zeigen, kann von einem unvorhergesehenen, nicht typischen Ereignis ausgegangen werden, das nicht durch die koordinierte Steuerung hervorgerufen wurde.

Eine weitere Auffälligkeit zeigt die zeitliche Veränderung der Qualitätsstufen ebenfalls im Tages- und Nachtprogramm. Jeweils bei den ersten drei Messfahrten wurden deutlich schlechtere Qualitätsergebnisse festgestellt. Es ist möglich, dass die Schaltzeiten der Steuerprogramme nicht optimal an die Ganglinie der Verkehrsbelastung angepasst wurde.

• Analyse der Einzelanlagen

Programm	LSA	t [s]	dist [m]	$v_{m,LSA}$ [km/h]	Halte [-]	Mehrfach halt	Halte als Mangel	k_{LSA} [-]	$t_{verlust}$ [s]	LOS k_{LSA}	LOS $k_{LSA,EMI}$	Verlustzeiten als Mangel
ABEND	LSA 01	52	244	22	5	0	HALTE !	29	34.32	F	E	mäßiger Zeitverlust
ABEND	LSA 02	25	302	45	0	0		100.00	2.82	A	A	
ABEND	LSA 03	29	261	42	2	0		71.43	10.50	D	B	
ABEND	LSA 04	33	270	40	3	1		57.14	13.32	E	B	
ABEND	LSA 05	13	169	46	0	0		100.00	1.11	A	A	
ABEND	LSA 06	28	247	40	2	0		71.43	10.45	D	B	
ABEND	LSA 07	5	70	46	0	0		100.00	-0.24	A	A	
MORGEN	LSA 01	53	245	22	3	0		57.14	27.14	E	E	kleiner Zeitverlust
MORGEN	LSA 02	25	300	45	1	0		85.71	3.76	B	A	
MORGEN	LSA 03	31	261	26	4	0	HALTE !	42.86	23.85	F	D	kleiner Zeitverlust
MORGEN	LSA 04	41	269	26	3	0		57.14	28.93	E	D	kleiner Zeitverlust
MORGEN	LSA 05	13	168	38	1	0		85.71	7.01	B	B	
MORGEN	LSA 06	26	247	32	2	0		71.43	42.38	D	C	großer Zeitverlust
MORGEN	LSA 07	5	70	44	0	0		100.00	2.05	A	A	
NACHT	LSA 01	54	245	34	3	0		57.14	15.43	E	C	
NACHT	LSA 02	24	300	50	0	0		100.00	0.12	A	A	
NACHT	LSA 03	36	261	35	3	0		57.14	15.42	E	C	
NACHT	LSA 04	40	268	43	1	0		85.71	5.00	B	A	
NACHT	LSA 05	13	168	48	0	0		100.00	0.45	A	A	
NACHT	LSA 06	24	247	38	2	0		71.43	18.89	D	B	
NACHT	LSA 07	5	70	43	1	0		85.71	3.49	B	B	
TAG	LSA 01	51	245	37	3	0		57.14	8.43	E	B	
TAG	LSA 02	25	299	51	0	0		100.00	-0.47	A	A	
TAG	LSA 03	39	261	31	4	0	HALTE !	42.86	26.70	F	C	kleiner Zeitverlust
TAG	LSA 04	42	268	42	1	0		85.71	5.05	B	B	
TAG	LSA 05	17	168	45	0	0		100.00	1.51	A	A	
TAG	LSA 06	23	222	33	4	1	HALTE !	42.86	16.81	F	C	
TAG	LSA 07	8	95	46	0	0		100.00	-0.38	A	A	

Tabelle 24: Ergebnis des Bewertungsverfahrens im Einflussbereich von LSA (SG41)

Die Beurteilungen der jeweils ersten LSA (LSA 01) sind in dieser Tabelle nur aus Gründen der Vollständigkeit angeführt. Wie in Abschnitt 2.3, erklärt, wird die jeweils erste LSA eines Streckenzuges von der Bewertung ausgeschlossen.

Interpretation:

Die Ergebnisse der Qualitätsbeurteilung auf Ebene der Streckenzüge hat einen möglichen Steuerungsmangel des Morgenprogramms gezeigt. In der Tabelle 24 ist ebenfalls festzustellen das es im Morgenprogramm vermehrt zu Zeitverlusten kommt. Insbesondere die LSA 03, 04 zeigen eine mangelhafte Koordinierungsqualität auf, was sich auf die Gesamtbewertung am Streckenzug negativ auswirkt. Ein großer Zeitverlust (> 40 sek.) macht sich im Morgenprogramm an der LSA 06 bemerkbar, auch im Tagesprogramm wird die LSA 06 schlecht bewertet.

Ebenfalls auffällig ist die mangelhafte Beurteilung der LSA 03 in allen Steuerprogrammen anhand des Koordinierungsmaßes, dort kommt es zu häufigen Haltevorgängen.

Eine Videoanalyse der Messfahrten bzw. Vorortuntersuchung würde vor allem an den LSA 03 und LSA 06 zur Mängelaufklärung nützlich sein.

4.5 Vergleiche von Bewertungsverfahren

In diesem abschließenden Abschnitt der Anwendung, soll ein Vergleich zu derzeit in Verwendung und dem Stand der Technik befindlichen Bewertungsverfahren, gezeigt werden. Damit sollen unterschiedliche Bewertungsergebnisse gezeigt und diskutiert werden. Als Abgrenzung werden nur Verfahren verglichen die anhand der mittleren Reisegeschwindigkeit, die Verkehrsqualität abschätzen. Die Gegenüberstellung soll anhand der zuvor bewerteten gesamten Streckenzüge (SG 30, stadteinwärts und SG 41, stadteinwärts) erfolgen.

SG 30 - stadteinwärts				
Programm	LOS $k_{SP,EMI}$	LOS $k_{SP,Spangler}$	LOS $k_{SP,Brilon}$ (60 km/h)	LOS $k_{SP,HCM}$ (USC III)
ABEND	A	B	B	B
ABEND				
MORGEN	A	B	B	B
MORGEN				
NACHT	A	B	B	B
NACHT				
TAG	A	B	B	B
TAG				

HCM: Urban Street Class III

Brilon: zul. Höchstgeschwindigkeit 60 km/h

SG 41 - stadteinwärts				
Programm	LOS $k_{SP,EMI}$	LOS $k_{SP,Spangler}$	LOS $k_{SP,Brilon}$ (50 km/h)	LOS $k_{SP,HCM}$ (USC III)
ABEND	B	C	B	C
ABEND				
MORGEN	E	D	C	D
MORGEN				
MORGEN				
MORGEN				
NACHT	B	C	B	C
NACHT				
TAG	C	C	B	C
TAG				

HCM: Urban Street Class III

Brilon: zul. Höchstgeschwindigkeit 50 km/h

Tabelle 25: Vergleich von mehreren Bewertungsverfahren am Beispiel des SG 30 sowie SG41

Die hier zum Einsatz gekommenen Bewertungsverfahren sind zur qualitativen Beurteilung, mittels LOS, eines gesamten Streckenzuges entwickelt worden.

Wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben, verfügt das englischsprachige Standardwerk HCM (2000) über mehrere Bewertungsmöglichkeiten für signalisierte Streckenzüge. Hier zur Anwendung gekommen ist, die in Kapitel 15 (Urban Streets) vorgestellte Bewertungsmethodik für Hauptverkehrsstraßen des HCM (2000). Für das SG 30, Wienerstraße wurde, unter Berücksichtigung der tatsächlich gemessenen Reisegeschwindigkeiten, die Urban Street Class III gewählt mit einem Free-Flow-Speed von 50-55 km/h. Die Bewertungsmethodik von Brilon (2003) versteht sich als Vorschlag für ein gleichwertiges Bewertungsverfahren zum HCM, im deutschsprachigem Raum (siehe Abschnitt 2.3.5). Dieses Verfahren beurteilt ebenfalls den gesamten Streckenzug. Ähnlich dem HCM verschieben sich die LOS-Grenzen je nach zulässiger Höchstgeschwindigkeit. Das Bewertungsschema von Spangler (2009) beruht ebenfalls auf der mittleren Reisegeschwindigkeit entlang der Hauptverkehrsstraße.

Der Vergleich der Wienerstraße zeigt, ein einheitliches Bild der LOS-Bewertung aller Verfahren (LOS B). Lediglich die in dieser Arbeit entwickelte emissionstechnische Bewertung zeigt LOS A. Dies lässt sich u.A. durch die, für die Qualitätsstufeneinteilung verwendete Clusteranalyse, erklären. Unter den sieben Untersuchungsgebieten in Graz (siehe Anhang A1) die als Datengrundlage für das neu entwickelte Bewertungssystem dienen, hat sich die Wienerstraße durch hohe mittlere Reisegeschwindigkeiten ausgezeichnet. Dies wird als oberen Grenze der Bewertungseinteilung verwendet, wonach in der Beurteilung LOS A erreicht wird.

Bei der Beurteilung des SG 41, zeigen sich einige unterschiedlich bewertete Qualitätsstufen der einzelnen Signalprogramme. Insbesondere im Morgenprogramm vergibt das Bewertungsverfahren nach Brilon (2003) ein LOS C, wobei HCM (2000) und Spangler (2009) ein LOS D vergeben. Die emissionstechnische Beurteilung würde sogar ein LOS E ergeben. Damit bestätigen sich die Ergebnisse von Abschnitt 4.4.2, bei denen ein möglicher Steuerungsmangel im Morgenprogramm (insbesondere LSA 03 und LSA 04). Es ist ebenfalls zu erkennen, dass die Bewertungen durch HCM (2000) und Spangler (2009) wie im SG 30, auch hier ident sind.

5 Fazit, Erkenntnisse und Diskussion

Im abschließenden Abschnitt der Arbeit wird ein Fazit der entwickelten Bewertungsmethodik beschrieben, wobei die gewonnenen Erkenntnisse kurz zusammengefasst werden. Darüber hinaus wird die praktische Anwendung des Bewertungsschemas diskutiert und Hinweise sowie Empfehlungen ausgesprochen. Eng verbunden mit der Anwendbarkeit des Verfahrens sind auch die Grenzen der Bewertungsmethodik, die ebenfalls diskutiert werden.

Ein weiterer Teil beschäftigt sich mit der Beantwortung der drei forschungsrelevanten Fragestellungen aus dem 1. Abschnitt. Zu guter Letzt beendet ein Ausblick den Abschnitt, bei dem auch Empfehlungen für weitere Untersuchungen, auf dem Gebiet der Bewertung von Hauptverkehrsstraßen und Lichtsignalsteuerungen, gegeben werden.

Zusammenfassung der Bewertungsmethodik

Die Bewertungsmethodik beruht im Wesentlichen auf zwei eigenständigen Beurteilungsverfahren, die jeweils auf unabhängigen Qualitätskenngrößen aufgebaut sind und miteinander kombiniert werden. Durch diese Kombination ist es möglich, Streckenzüge unter mehreren Perspektiven zu betrachten und qualitativ zu beurteilen.

Ein Beurteilungsmerkmal wird zur Bewertung, der meist koordinierten Verkehrssteuerungen auf innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen, benutzt und anhand der Haltevorgänge bestimmt.

Die zweite Qualitätsbeurteilung wird über eine Hilfsgröße ermittelt, die indirekt vom Kraftstoffverbrauch entlang der Strecke abhängig ist und eine qualitative Beurteilung, anhand umweltrelevanter Aspekte darstellt. Im heutigen Stand der Technik, gibt es kein Bewertungsverfahren für Verkehrslichtsignalanlagen und Verkehrssteuerungen, das anhand von Schadstoffemissionen bzw. des Kraftstoffverbrauches eine Qualitätsbeurteilung ermöglicht. In einigen Qualitätsbeurteilungsverfahren, die dem heutigen Stand der Technik entsprechen, wird von einer Abhängigkeit zwischen Haltevorgängen und Schadstoffemissionen gesprochen (z. B. HBS 2005, Schnabel 2010). Dieser Zusammenhang wurde in der Arbeit mittels Korrelationsanalyse untersucht. Dabei hat sich ergeben, dass der Kraftstoffverbrauch entlang einer Strecke oder Teilstrecke nicht alleinig durch die Anzahl an Haltevorgängen, erklärt werden kann. Auch in einer Studie im Grazer Stadtgebiet, bei der das emissionstechnische Verbesserungspotenzial von koordinierte Streckenzügen betrachtet wurde, ist die statistische Abhängigkeit des Koordinierungsmaßes (nach HBS 2005) und den Schadstoffemissionen, als nicht signifikant erklärt worden (Vgl. IKK ZT-GmbH, 2012)

Für die emissionstechnische Qualitätsbeurteilung anhand des Kraftstoffverbrauches wurde in dieser Arbeit eine fahrdynamische Kenngröße mit hoher statistischer Abhängigkeit identifiziert, die mittlere Reisegeschwindigkeit. Es hat sich gezeigt, dass nicht wie ursprünglich vermutet, eine Beschleunigungskenngröße, sondern die im mittel gefahrene Geschwindigkeit über die Gesamtstrecke, die größte Abhängigkeit zum Kraftstoffverbrauch, aufweist. Mithilfe der linearen Regressionsrechnung kann gedeutet werden, dass der Kraftstoffverbrauch entlang einer innerstädtischen Hauptverkehrsstrecke zu etwa 80% durch die mittlere Reisegeschwindigkeit erklärt wird. Mithilfe dieser Erkenntnis wurde ein Beurteilungskonzept anhand der mittleren Reisegeschwindigkeit entwickelt.

Beide Beurteilungsverfahren benutzen eine Qualitätsstufeneinteilung, nach dem Vorbild der Level-of-Service Unterteilung nach HCM und sind deshalb sehr gut kombinierbar.

Eine weitere Neuentwicklung in dieser Arbeit stellt die Tiefe der Qualitätsbetrachtung des Streckenzuges, bis zur Ebene der einzelnen LSA dar. Dafür wurde eine Einteilungsmöglichkeit für

Streckenzüge entwickelt, mit der Einflussbereiche von einzelnen VLSA bestimmt werden. Insgesamt sind drei mögliche Unterteilungsansätze untersucht und mithilfe statistischer Werkzeuge, das geeignetste Verfahren ermittelt worden. Eine derartige Unterteilung von gesamten Streckenzügen hat sich jedoch als komplexe Problemstellung herausgestellt, an der noch weitere Forschungsschwerpunkte angehängt werden können. Erst durch diese Unterteilung ist es in weiterer Folge der Qualitätsbeurteilung möglich auch Problemstellen an einzelnen VLSA zu erkennen (z.B. Steuerungsmängel).

Ein Kernpunkt der Arbeit ist die Anwendbarkeit des Bewertungsverfahrens auf Grundlage von GPS-Messfahrten bei denen die Fahrtrajektorien aufgezeichnet, und als Datenbasis verwendet werden. Dabei ist nicht die Aufzeichnung, sondern die Verarbeitung der Daten, ein wesentlicher Punkt. Anhand der aufgezeichneten Fahrverläufe werden die für das Bewertungssystem relevanten Qualitätsmerkmale, Reisegeschwindigkeit und Anzahl der Haltevorgänge, analysiert.

Praxisrelevante Anwendbarkeit

Grundsätzlich ist die Anwendbarkeit der hier vorgestellten Bewertungsmethodik auf sämtliche Hauptverkehrsstraßen möglich. Die emissionstechnische Qualitätsstufeneinteilung (siehe Kapitel 3.4.1) beruht auf Messfahrten im Grazer Stadtgebiet (siehe Anhang A1) und ist grundsätzlich auch auf andere Städte zu übertragen. Voraussetzung dafür ist eine vergleichbare Charakteristik der Untersuchungsstrecken. Liegen ähnliche Verhältnisse wie in den hier als Datengrundlage verwendeten Streckenzügen vor (siehe Anlage A1), kann die Qualitätsbeurteilung erfolgen. Es ist darauf zu achten, dass das Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer ebenfalls ähnliche Merkmale aufweist. Insbesondere für die emissionstechnische Beurteilung ist dies eine Grundvoraussetzung, da durch unterschiedliche Fahrverhaltenstypen, Abweichungen des Emissionsausstoß sowie des Kraftstoffverbrauchs in der Größenordnung von etwa +/- 20%, zurückzuführen sind (Vgl. Pedititis, 2010).

Wie schon angesprochen muss für eine Anwendung eine ähnliche Streckencharakteristik (Abstand der VLSA, mittlere Geschwindigkeiten, etc....) vorliegen, dies schließt auch die Halteursachen ein. Die Beurteilung anhand der Haltevorgänge setzt voraus, dass die detektierten Haltevorgänge (siehe Kapitel 3.4.2.) in erster Linie auf die Lichtsignalsteuerung, oder Problemstellen entlang der Strecke zurückzuführen sind. Kommt es infolge von häufigen Ein- und Ausparkvorgängen zu Halten im Hauptverkehrsstrom, kann nicht von einer mangelhaften VLSA gesprochen werden. Während der Messfahrten ist deshalb Augenmerk auf die Häufigkeit von nicht direkt der Strecke oder der VLSA zuordenbaren Haltevorgängen zu legen. Andere Halteursachen wie ab- oder einbiegende Kfz in oder aus dem Hauptverkehrsstrom sind auch nicht einer LSA zuordenbar, sie stellen jedoch bei häufigen Auftreten einen Mangel in der Querschnittsgestaltung der Strecke dar (z.B. fehlende Abbiegestreifen). Deshalb empfiehlt es sich, bei örtlicher Anhäufung von Haltevorgängen auf einer Strecke bzw. eines Streckenabschnittes diesen durch Videomessfahrten zu untersuchen, um die Mangelursache eindeutig identifizieren zu können.

Bei der Bewertungsmethodik gilt eine richtungsspezifische Auswertung und Qualitätsbeurteilung. Da Signalprogramme jedoch immer auf beide Fahrtrichtungen gelten, ist bei der Optimierung der Programme auch die jeweilige Gegenrichtung zu betrachten. Es ist durchaus üblich, dass koordinierte Streckenzüge nur auf eine Fahrtrichtung ausgelegt sind (z.B. kann die Verkehrsbelastung stadteinwärts in den Morgenstunden erheblich größer sein als stadtauswärts). Die Optimierung der Signalsteuerung in einer Richtung hat natürlich Auswirkung auf die Gegenfahrbahn, wobei dort eine Verschlechterung zu vermeiden ist.

Wie im Abschnitt 4.3 beschrieben stellt die erforderliche Stichprobenanzahl der Messfahrten für die Bestimmung der mittleren Reisezeiten ein Defizit des Bewertungsverfahrens dar. Demnach sind für die Schätzung der mittleren Reisezeiten einer Strecke bzw. eines Streckenzuges, abhängig von der Schwankungsbreite der gemessenen Reisezeiten, zwischen 25 und 45 Einzelfahrten nötig (siehe Tabelle 20). Es hat sich jedoch in den beiden Anwendungsbeispielen (Abschnitt 4.4) gezeigt, dass Mängel und Problemstellen schon mit deutlich weniger Messfahrten identifizierbar sind, da sich Problemstellen während den Messfahrten periodisch und ortsfest wiederholen. Aus diesem Grund liefert die Bewertungsmethodik auch mit einem Messfahrtenumfang von etwa 5-12 Fahrten je Steuerprogramm, eine gute Qualitätsabschätzung. Dies lässt sich in der Regel mit 1 bis 3 Messfahrzeugen bei einer Streckenlänge von etwa 5 km, erheben.

Für eine Anwendung in der Praxis stellen in erster Linie die Datenverarbeitung und Aufbereitung eine Hürde dar. Dafür ist eine automatisierte Softwarelösung nötig, die die erhebliche Menge an Messdaten aufbereitet und verarbeitet. Die grundlegende Methodik der Datenverarbeitung wird in Abschnitt 4.1 sowie 4.2 erläutert.

Abgrenzungen der Bewertungsmethodik

Der Fokus der Arbeit liegt in der Methodik zur Qualitätsbeurteilung von signalisierten innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen, was eine Beurteilung der Lichtsignalanlagensteuerung beinhaltet. Dabei spielt die Art der Steuerung (z.B. Festzeitsteuerung oder koordinierte Steuerung) keine Rolle. Problemstellen und Mängel können am gesamten Streckenzug festgestellt werden. Eine Verbesserungen und Optimierungen der Signalsteuerung ist aber nicht Gegenstand dieser Arbeit und wird deshalb auch nicht behandelt. Die aus der Bewertungsmethodik erhobenen Informationen, sollen dem Verkehrsplaner u.A. als Grundlage für Verbesserungsmaßnahmen dienen.

Teil der Bewertungsmethodik ist auch eine Beurteilung aufgrund umweltrelevanter Merkmale. Dabei wird anhand der mittlern Reisegeschwindigkeit, eine umweltrelevante Qualitätsbeurteilung ermöglicht, die jedoch keine Abschätzung von Emissionsausstoß oder Kraftstoffverbrauch darstellt. Ebenfalls kommen in dieser Arbeit keine absoluten Emissions- und Verbrauchswerte vor, da die Qualitätsbeurteilung aufgrund von relativen Vergleichen stattfindet.

Eine weitere Abgrenzung in der vorliegenden Arbeit bildet die Betrachtung des Querverkehrs. Die Qualität der Hauptverkehrsstraße sowie der Signalsteuerung wird nur anhand des Hauptstromes (Durchgangsverkehr) abgeschätzt. Deshalb ist bei der nachstehenden Optimierung der Signalsteuerung auch jeweils auf den Querverkehr der VLSA einzugehen. Bei der Qualitätsbeurteilung selbst wird der Querverkehr nicht bewertet.

Innerhalb des Bewertungsprozesses gibt es keine Differenzierung der Verkehrsmodi. Durch die Kenngrößengenerierung wird die aktuelle Verkehrssituation für alle Verkehrsteilnehmer erhoben. Eigene Fahrstreifen für den öffentlichen Nahverkehr oder ÖV-Priorisierungen an den VLSA, werden außer acht gelassen. Dies ist dadurch begründbar, dass die Hauptemittenten von Schadstoffen auf den Hauptverkehrsstrom des Individualverkehrs zurückzuführen sind.

Das Einsatzgebiet der Bewertungsmethodik liegt in der Bestandsuntersuchung und Mängelerhebung. Die örtlichen Verkehrsbelastungen während des Beobachtungszeitraumes werden vom Bewertungssystem nicht berücksichtigt, weil davon ausgegangen wird, dass das bestehende Signalsteuerprogramm auf die anfallende Verkehrsnachfrage ausgelegt wurde. Werden durch die Detailanalyse Mängel festgestellt, so ist an den jeweiligen VLSA unter Umständen zu überprüfen, ob das Programm auf aktuelle Verkehrsbelastungen ausgelegt ist. Dies setzt punktuelle

Verkehrszählungen im mangelbehafteten Streckenabschnitten voraus, bei denen es empfehlenswert ist, den Querverkehr ebenfalls mitzuerheben (z.B. durch Knotenstromzählung)

Beantwortung der forschungsrelevanten Fragestellungen

(1) *Ist eine Bewertung der Verkehrssteuerung sowie der Qualität des Streckenzuges auf Grundlage von GPS-Trajektorien möglich ?*

GPS-Trajektorien beschreiben den gesamten Bewegungsverlauf entlang einer Strecke oder eines Abschnittes. Dadurch lassen sich viele Informationen über das Verkehrsgeschehen bzw. den Verkehrsablaufe ableiten. Werden diese Informationen richtig aufbereitet bzw. verarbeitet, ist eine Qualitätsbeurteilung von Streckenzügen möglich. Mit der hier vorgestellten Bewertungsmethodik ist darüber hinaus, eine Qualitätsbeurteilung auf Teilabschnitten abschätzbar, sowie eine örtliche Identifikation von Problemstellen bzw. Steuerungsmängel. Voraussetzung dafür ist ein geeignetes Erhebungskonzept für GPS-Messfahrten. Dabei ist auf die erforderliche Stichprobenanzahl zu achten. In diesem Anwendungsfall kann der Stichprobenumfang etwas reduziert werden, weil sich Problemstellen entlang der zu untersuchenden Strecke örtlich wiederholen. Zur Bewertung der Koordinierungsqualität sind 5-8 Messfahrten ausreichend. Es hat sich gezeigt, dass sich auch Problemstellen und Mängel anhand der Reisezeit, durch diese Messfahrtenanzahl abschätzen lassen. Zur detaillierten Auswertung von Reisezeiten wird jedoch ein Stichprobenumfang von etwa 25 Messfahrten empfohlen.

Unter der Voraussetzung, dass die dabei gesammelten Daten automatisiert mittels EDV-Werkzeuges aufbereitet bzw. verarbeitet werden, ist der Aufwand für eine Qualitätsanalyse eines Streckenzuges weitaus geringer als bei klassischen Beurteilungsverfahren. Aus monetärer Sicht könnten durch den geringeren Personal- und Auswertungsaufwand, die Kosten für eine Verkehrsanalyse gesenkt werden.

(2) *Lassen sich Schadstoffemissionen sowie der Kraftstoffverbrauch, anhand von fahrdynamischen Kenngrößen, beschreiben?*

Weil Schadstoff- und Verbrauchsrechnungen meist sehr komplex und nicht einfach zu bestimmen bzw. zu messen sind, ist eine direkte Verwendung dieser Größen in einem Bewertungssystem nicht sinnvoll. Deshalb wurde diese Hürde umgangen und in dieser Arbeit versucht, über fahrdynamische Kenngrößen, Rückschlüsse auf die entstandenen Verbrauchs- und Emissionswerte zu erhalten. Dabei wurden eine Vielzahl an Kenngrößen, hinsichtlich ihrer Abhängigkeit zu simulierten Emissionen, untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass sich einige Kenngrößen sehr gut zur qualitativen Abschätzung der Emissionen eignen. So erklärt etwa die mittlere Reisegeschwindigkeit v_m , den Kraftstoffverbrauch entlang der Strecke mit mehr als 80 % und den NO_x-Ausstoß mit etwa 75 %. Teilweise erzielen auch unkonventionelle Kenngrößen aus der Fahrzeugtechnik hohe Korrelationen zum Kraftstoffverbrauch. Beispielsweise erklärt die Kenngröße, Relative Positiv Acceleration, mit etwa 60% den Kraftstoffverbrauch und mit fast 75% den NO_x Ausstoß Aufgrund der Schwankungen der Emissionssimulationen wurden in dieser Arbeit nur der Kraftstoffverbrauch für die emissionstechnische Qualitätsbeurteilung verwendet.

Da es sich bei der prozentuellen Erklärung um eine statistische Berechnungsmethode handelt, ist eine direkte, absolute Schätzung des Kraftstoffverbrauchs theoretisch möglich. Dies wird jedoch in dieser Arbeit nicht verwendet. Vielmehr wird die starke Abhängigkeit zwischen der mittleren Geschwindigkeit und dem Kraftstoffverbrauch herangezogen, um

über eine Qualitätsstufenskala, untersuchte Streckenzüge in emissionstechnische Qualitätsklassen zu unterteilen.

(3) Kann ein Einflussbereich von VLSA abgeschätzt werden?

In den derzeit verwendeten Bewertungsverfahren wird ein Streckenzug entweder in die beiden Komponenten, VLSA und dazwischenliegende Strecke, getrennt oder gemeinsam bewertet. Da jedoch zur Qualitätsbeurteilung beide Komponenten berücksichtigt werden müssen, wurde in dieser Arbeit ein probates Verfahren entwickelt um den Streckenzug, nach definierten Einflussbereichen der VLSA zu unterteilen.

Diese Einteilung stellt eine Grundvoraussetzung für die in der Arbeit entwickelte Mängelanalyse und Qualitätsbeurteilung der Einzelabschnitte des Streckenzuges dar. Die Methodik geht dabei von einer Beeinflussung des Fahrzeuglenkers durch das Signalbild vor und nach einer Haltelinie aus. Der Einflussbereich nach der Haltelinie wird definiert als durchschnittliche Länge, die Fahrzeuge zur Beschleunigung nutzen. Anhand eines Berechnungsalgorithmus auf Grundlage von Einzeltrajektorien, kann diese Länge bestimmt werden. Diese Art der Bereichseinteilung ist gültig, wenn Lichtsignalanlagen einen Mindestabstand von circa 60 m nicht unter, und einen Maximalabstand in der Größenordnung von 400-600m nicht überschreiten, da sonst die Einflussbereiche verschmelzen.

Zum Thema der Einflussbereiche sei noch erwähnt, dass es im heutigen Stand der Forschung keine Untersuchungen dahin gehend gibt und die in dieser Arbeit entwickelten Verfahren als Ansätze für weitere Forschungen anzusehen sind.

Ausblick

Teile dieser Master-Arbeit bilden pionierhafte Ansätze und Neuentwicklungen, welche die nötige Grundlage für das angewendete Bewertungsverfahren darstellt. Die vorgestellten und untersuchten Möglichkeiten der Bereichsunterteilung von Streckenzügen, stellen in jedem Fall noch Forschungsbedarf dar. Das hier verwendete Verfahren ist ein möglicher Ansatz, der noch Weiterentwicklungsbedarf mit sich bringt.

Das Bewertungsschema und die neu entwickelte emissionstechnische Qualitätsstufeneinteilung, sollte in weiteren Studien auf andere städtische Hauptverkehrsstraßen angewendet und weiterentwickelt werden. Je mehr verschiedenen Untersuchungsgebiete (z.B. in anderen Städten) für die Weiterentwicklung der neuen emissionsbezogenen Qualitätsstufeneinteilung verwendet werden, desto besser können Vergleiche angestellt werden. Es wäre auch denkbar mit einem validierten Mikrosimulationsmodell, GPS-Trajektorien zu bilden und ebenfalls als Datengrundlage zu verwenden. Damit könnte auch der Einfluss von verschiedenen VLSA -Steuerprogrammen auf den Kraftstoffverbrauch qualitativ beurteilt werden.

Für die praxisrelevante Anwendung der Bewertungsmethodik wäre die Entwicklung eines Software-Tools, für die gesamte Aufbereitung und Verarbeitung der aufgezeichneten GPS-Trajektorien von großem Nutzen. Grundsätzlich wäre dies mit abschätzbarem Aufwand, für einen Softwareentwickler möglich. Als Eingabedaten für die Software würde es ausreichen Trajektorien, sowie Positionsdaten von Haltelinien einzuspeisen. Sämtliche Weitere Berechnungsschritte sind in mehreren Algorithmen ohne weitere Informationen abzuarbeiten, bishin zur letztendlichen Ausgabe der Qualitätsbeurteilungen samt Mängelanalyse für den gesamten Streckenzug, als auch auf Ebene der Einzelknoten.

Als zukünftiges Anwendungsfeld wäre in Anlehnung an bauphysikalische Berechnungen eines Bauwerkes, ein Energieausweis für Hauptverkehrsstraßen denkbar. Dadurch wäre ein direkter Vergleich von unterschiedlichen Hauptverkehrsstraßen mit ähnlicher Streckencharakteristik möglich. Ein städteübergreifendes Benchmarking anhand emissionsbezogener Bewertungsgrößen ist dabei der Leitgedanke.

6 Literaturverzeichnis

- Auer, B.; Rottman, H. (2011): *Statistik und Ökonometrie für Wirtschaftswissenschaftler*, Gabler/Springer Verlag, 2011
- BMVBS (2010): *AMONES-Anwendung und Analyse modellbasierter Netzsteuerungsverfahren in städtischen Straßennetzen*, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung-Deutschland, Forschungsbericht
- Bosserhoff, W.; Follmann, J. (2007): *Handbuch für Verkehrssicherheit und Verkehrstechnik.*: Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen, Hochschule Darmstadt, Wiesbaden/Darmstadt
- Brilon, W.; Schnabel, W. (2003): *Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufes auf Hauptverkehrsstraßen*, Straßenverkehrstechnik 1/2003.
- Brilon, W.; Grossmann, M.; Blanke, H. (1995): *Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes auf Straße*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 669. Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn
- Brilon, W. (2008): *Differenzierte Bewertung der Qualitätsstufen im HBS im Bereich der Überlastung*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 999, Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn
- Ehmke, J.F.; Meisl, S.; Mattfeld; D.C. (2010): *Floating Car Data Based Analysis of urban travel times for the Provision of Traffic Quality* erschienen in Barcelo and Kuwahra (eds.), Traffic Data Collection and its Standardization, Springer, 2010.
- Fellendorf, M. (2009): *Foliensatz-Straßenverkehrstechnik und Telematik*, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, TU Graz
- Fellendorf, M. (2010): *Skriptum-Statistik Infrastruktur*, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, TU Graz
- Fellendorf, M. (2011): *Skriptum – Straßenverkehrstechnik*, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, TU Graz
- FGSV (2005): *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS Fassung 2005)*, Forschungsgesellschaft für Straßen - und Verkehrswesen, Köln
- FGSV (2010): *Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA)*, Forschungsgesellschaft für Straßen - und Verkehrswesen, Köln
- FSV (2005): *Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) 03.05.12*, Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr, Wien
- Hausberger, S. (2008): *The Modell PHEM - Structure and Applicatons*, <http://www.tfeip-secretariat.org/assets/Transport/Expert-Meetings/JRC-Expert-meeting-on-the-Development-of-Emission-Factors-for-Road-Transport-Sector-16-17-October-2008-Ispra-Italy/200810Hausberger.pdf> [Datum des Zugriffs: 15.08.2012]
- Hausberger, S.; Luz. (2010): *User Guide to the PHEM Emission Model*, Graz
- Hellinga, B.; Izadpanah, P.; Takada, H.; Fu, L. (2008): *Decomposing travel times measurde by probe based traffic monitoring systems to individual road segments*. Transport Research Part C 16:768-782,
- Hirschmann, K.; Zallinger, M.; Fellendorf, M.; Hausberger, S.; Mück, J. (2009): *Grazer Adaptive Verkehrssteuerung – GAVe Endbericht*,Graz, Forschungsbericht

- Hung, WT; Tam, KM; Lee, CP; Chan, LY; Cheung, CS (2004): *Comparison of driving characteristics in cities of Pearl River Delta-Hong Kong*, Atmospheric Environment 39 (2005) 615–625
- IKK ZT-GmbH; TU Graz (2012): *Verbesserung der Grünen Welle an Haupteinfahrstraßen von Graz-Arbeitspaket 1- Verkehrs- und Emissionstechnische Untersuchung*, Graz
- IVH; TRANSVER GmbH (2008): *Leitfaden Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen*, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Hanover
- Konstantas, G.; Stamatelos, A. (2004): *Quality assurance of exhaust emissions test data*, Journal of Automobile Engineering August 1, 2004 vol. 218 no. 8, Thessaly
- Krimmling, J. (2007): *Foliensatz-Aspekte zur adaptiven Netzsteuerung*, Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme und –prozessautomatisierung, TU Dresden, http://vplno1.vkw.tu-dresden.de/svt/html/vorlesungsmat//vpl8_3/adaptive_Netzsteuerung-1.pdf [Datum des Zugriffs: 05.08.2012]
- Leutzbach, W. (1987): *Introduction to the Theory of Traffic Flow*, Springer 1987
- Li, M.; Zou, ZJ; Bu, FP; Zhang, WB; (2008): *Application of vehicle infrastructure integration data on real-time arterial performance measurements*, Transportation Research Board Annual Meeting 2008 Paper #08-2835, Washington DC
- Lohse, D. (2010): *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und Verkehrsplanung - Band 2*, Kerschbaum Verlag GmbH, Bonn.
- Mailer, M.; Munk, T.; Spangler, M.; Haberer, T. (2008): *Verkehrsqualität auf Hauptverkehrsstraßen*, Internationales Verkehrswesen (60) 7+8/2008
- Mansfeld, W. (2010): *Satellitenortung und Navigation*, Vieweg+ Teubner, Wiesbaden
- Matzoros, A.; Van Vliet, D. (1992): *A model of air pollution from road traffic, based on the characteristics of interrupted flow and junction control: part II—model results*, Transportation Research A 26 (4), S. 331–335
- Mertz, J.(2000): *Ein mikroskopisches Verfahren zur verkehrsadaptiven Knotenpunktsteuerung mit Vorrang des öffentlichen Verkehrs*, TU München, Disseratation
- Otterstätter, T.; Friedrich, M. (2011): *Ermittlung des erforderlichen Stichprobenumfangs für Fahrzeitmessungen im Straßenverkehr*, Straßenverkehrstechnik 11/2011
- Pediaditis, E. (2010): *Beeinflussungsmöglichkeiten verkehrsbedingter Schadstoffemissionen im städtischen Straßenverkehr*, TU Graz, Diplomarbeit
- Pelkmans, L.; De Keukeleere, D.; Bruneel, H.; Lenaers, G. (2001): *Influence of Vehicle Test Cycle Characteristics on Fuel Consumption and Emissions of City Buses*. Vito, Flemisch Institute for Technological Research: Society of Automotice Engineers
- Plank, A. (2010): *Grafiken und Statistik in R*, http://www.geo.fu-berlin.de/geol/fachrichtungen/pal/mitarbeiter/plank/Formeln_in_R.pdf [Datum des Zugriffs: 05.01.2012]
- Racelogic (2012): *Produktbeschreibung Video VBOX Pro*, <http://www.videovbox.co.uk> [Datum des Zugriffs: 16.07.2012]
- Schmietendorf, G. (2010): *Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs in städtischen Netzen*, TU Dresden, Studienarbeit
- Schnabl, W. (2006): *Probleme, Effizienz und Erfahrungen beim Betrieb von Grünen Wellen*, Straßenverkehrstechnik 06/2004

- Schnabel, W. (2010): *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und Verkehrsplanung - Band 1*, Kerschbaum Verlag GmbH, Bonn
- Spangler, M. (2007): *Bestimmung der Verkehrsqualität auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen durch Fahrzeugwiedererkennung*, Foliensatz zur Hochschultagung 2007, http://www.rali.boku.ac.at/fileadmin/_/H85/H856/hst2007/Spangler_HST2007_VQualitaet_TUM_Spangler.pdf [Datum des Zugriffs: 27.09.2012]
- Spangler, M. (2009): *Reiszeitbasierte Verfahren für die Verkehrszustandsanalyse von städtischen Hauptverkehrsstraßen*, Schriftreihe des Lehrstuhls für Verkehrstechnik der Technischen Universität München - Heft 11, München
- Statistik-Austria (2012) *PKW Neuzulassungen 1990 – 2011*, <http://www.statistik.at> [Datum des Zugriffs: 11.01.2012]
- TRB (2000): *Highway Capacity Manual (HCM 2000)*, National Research Council, Washington
- Treiber, M.; Kesting, A. (2010): *Verkehrsdynamik und Simulation*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- VCÖ (2011): *Verkehr in Ballungsräumen besser steuern - Factsheet*, Verkehrsclub Österreich, <http://www.vcoe.at/> [Datum des Zugriffs: 10.12.2012]
- Vogt, W.(Hrsg.); Steierwald, G.; Künne, H.D.(2005): *Stadtverkehrsplanung*, Springer, Berlin-Heidelberg.
- Watson, H.; Milkins, E. (1995): *Effects of wide range of drive cycles on the emissions from vehicles of three levels technology*, SAE Paper 950221
- Wiethold, T. (2007): *Einsatzbereiche Grüner Wellen und verkehrsabhängigen Steuerungen*, Schriftreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr Universität Bochum Heft 33, Bochum 2007
- Wu, N. (1990): *Wartezeit und Leistungsfähigkeit von Lichtsignalanlagen unter Berücksichtigung von Instationarität und Teilgebundenheit des Verkehrs*, Schriftreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen Heft 8, Ruhr Universität Bochum.
- Eisele, W.; Turner, S.; Benz, R. (1996): *Using acceleration characteristics in air quality and energy consumption analyses*, Report No.: SWUTC/96/465100-1, Texas Transport Institute
- Zallinger, M. (2010): *Mikroskopische Simulation der Emissionen von Personenkraftfahrzeugen*, TU Graz, Dissertation.
- Zhang, W.; Skabardonis, A.; Li, M.; Li, J.; Zhang L. (2009): *Data Collection for Measuring Performance of Integrated Transportation Systems*, erschienen in Barcelo and Kuwahra (eds.), *Traffic Data Collection and its Standardization*, Springer, 2010.
- Zuylen, H.; Zheng, F.; Chen, Y. (2007): *Using Probe Vehicle Data for Traffic State Estimation in Signalized Urban Networks*, erschienen in Barcelo and Kuwahra (eds.), *Traffic Data Collection and its Standardization*, Springer, 2010.

7 Glossar

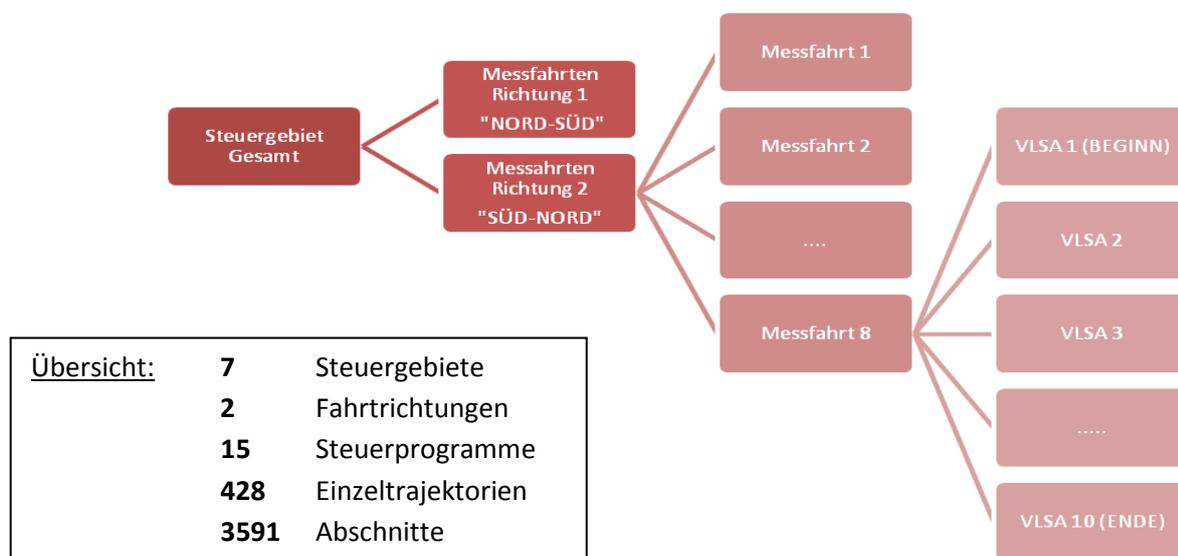
Free Flow Speed	Theoretische Geschwindigkeit mit der ein Fahrzeug im völlig unbeeinflussten Zustand entlang einer innerstädtischen Strecke fahren würden (HCM 2000)
Ideling-Mode	Beschreibt den Leerlauf im Fahrverhalten, der auch bei einem Haltevorgang an einer VLSA entspricht. Maßgeblich dabei ist das Unterschreiten einer Grenzggeschwindigkeit.
Cruising, Creeping	Beschreibung eines typischen Fahrverhaltens anhand von Beschleunigungsgrenzwerten (z.B. $< 0,11 \text{ m/s}^2$)
platoon-ratio	Pulkaufteilungsverhältnis, beschreibt die Dispersion eines Fahrzeugpulk entlang eines koordinierten Streckenzuges
Grünband	Definierter Bereich im Weg-Zeit Diagramm einer koordinierten Verkehrssteuerung innerhalb der man sich in einer „Grünen Welle“ befindet
Trajektorie	Beschreibt eine Bewegung im Weg-Zeit Diagramm
Fahrzyklus	Definierter Teil einer Trajektorie, der in weiterer Folge ausgewertet wird

8 Anhang

A1 - Datengrundlage

In der Arbeit wurden folgende Routen bzw. Messstrecken im Stadtgebiet von Graz zur Aufnahmen von Weg-Zeit Verläufen (Trajektorien) mittels GPS-Logger verwendet. Dabei wurden jeweils in beiden Fahrtrichtungen Messfahrten durchgeführt. Darüber hinaus wurden die Messfahrten gemäß den tageszeitlichen Signalsteuerprogrammen unterteilt.

	Länge	zulässige Höchstgeschwindigkeit	mittlerer Abstand der VLSA	Anzahl an VLSA	Anzahl an VLSA je km	Fahrsreifenanzahl	Durchschnittliche Fahrzeit	Durchschnittsgeschwindigkeit	koordinierte Verkehrssteuerung
<i>Strecke</i>	[km]	[km/h]	[m]	[-]	[/km]	[-]	[s]	[km/h]	[-]
Wienerstraße (SG 30)	3.5	50 (60)	360	9	2,6	2	300	42	x
Glacisstraße (SG 51/SG 61)	1.0	50	230	5	5	2 (1)	180	22	x
Schönaugürtel/C.v.Hötzendorfstr. (SG 41/SG 70)	2.2	50	232	10	4,5	2 (1)	340	25	x
Triesterstraße Nord (SG 41)	1.7	50	256	7	4,1	2	203	32	x
Triesterstraße Süd (SG 42)	3.7	50	274	13	3,5	2	336	40	x
Straßgangerstraße Nord (SG 82)	1.8	50	281	7	3,8	1	193	36	-
Straßgangerstraße Süd (SG 81)	2.6	50	348	8		1	288	34	x



GPS-Messfahrten (Steuerprogrammtafel)	<i>Morgen Programm</i>	<i>Tages Programm</i>	<i>Abend Programm</i>	<i>Nacht Programm</i>
Wienerstraße (SG 30)	S2 : 06:00- 09:00	S5: 09:00 – 14:30	S8: 14:30 – 19:00	S1 : 19:00 – 22:00
Glaciesstraße (SG 51/SG 61)	S3: 06:15 – 09:00	S9: 09:00 – 18:30	S8: 18:30 – 20:00	S6:20:00 – 23:40
Triesterstraße Nord (SG 41)	S2/S5: 06:30 - 08:30/09:00	S5: 09:00 – 14:30	S5/S8: 14:30/15:30 – 19:00	S1/S12: 19:00 – 22:00/24:00
Triesterstraße Süd (SG 42)				
Schönaugürtel/C.v.Hötzendorfstr. (SG 41/SG 70)	S2: 06:30 – 08:30	S5: 08:30 – 15:30	S8: 15:30 – 19:00	S1/S6: 19:00 – 22:00
Straßgangerstraße Nord (SG 82)	S1: 00:00 – 24:00	S1: 00:00 – 24:00	S1: 00:00 – 24:00	S1: 00:00 – 24:00
Straßgangerstraße Süd (SG 81)	S2: 06:30 – 08:30	S5: 08:30 – 15:00	S8: 15:00 – 20:00	S6: 20:00 – 22:00

<p>SG 30 Wienerstraße</p>	<p>SG 41 und SG 42 Triester Straße</p>	<p>SG 52/61 Glacisstraße</p>
		
<p>SG 41/70 Schönaugürtel/C.v.H. Straße</p>	<p>SG 82 Straßgangerstraße Nord</p>	<p>SG 81 Straßgangerstraße Süd</p>
		

A2 – Korrelationsanalyse der fahrdynamischen Kenngrößen

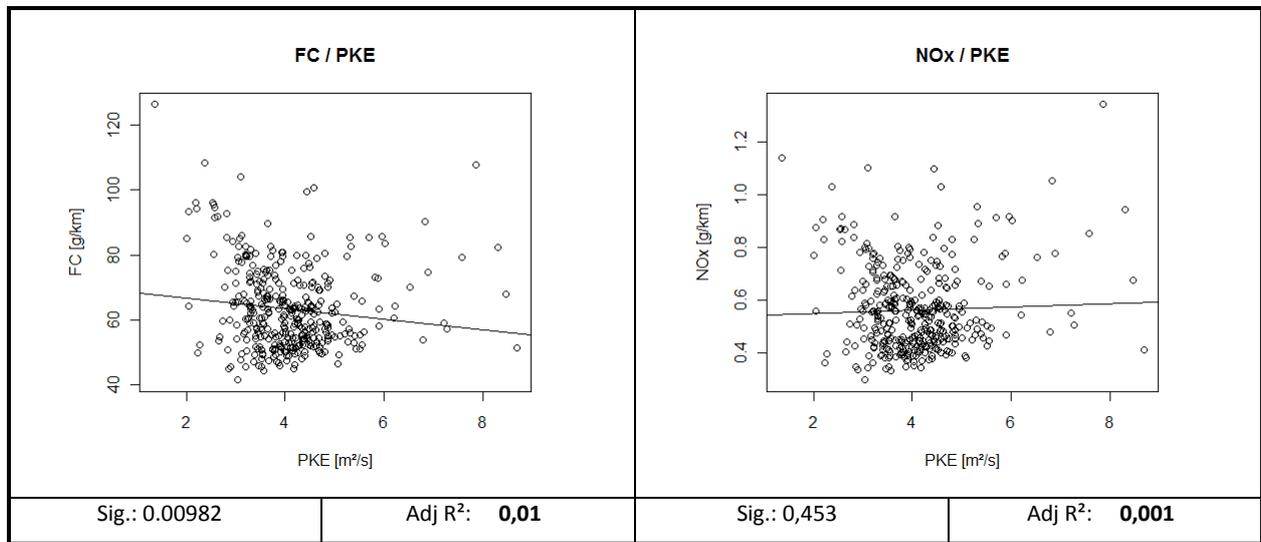


Abbildung 69: Korrelationsanalyse der Kenngröße PKE

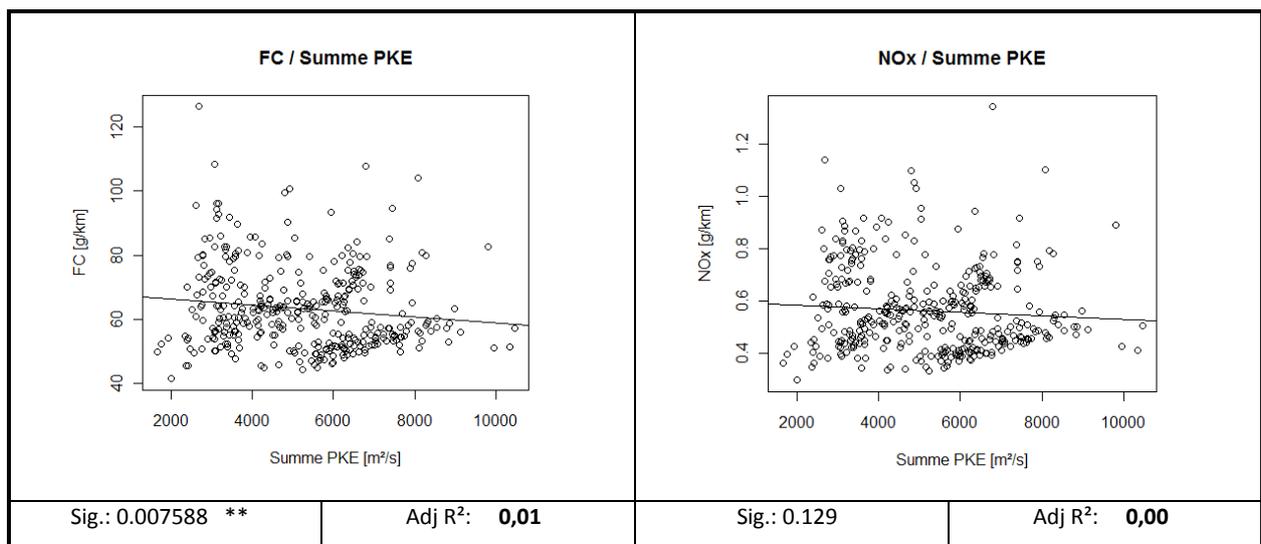


Abbildung 70: Korrelationsanalyse der Kenngröße Summe PKE

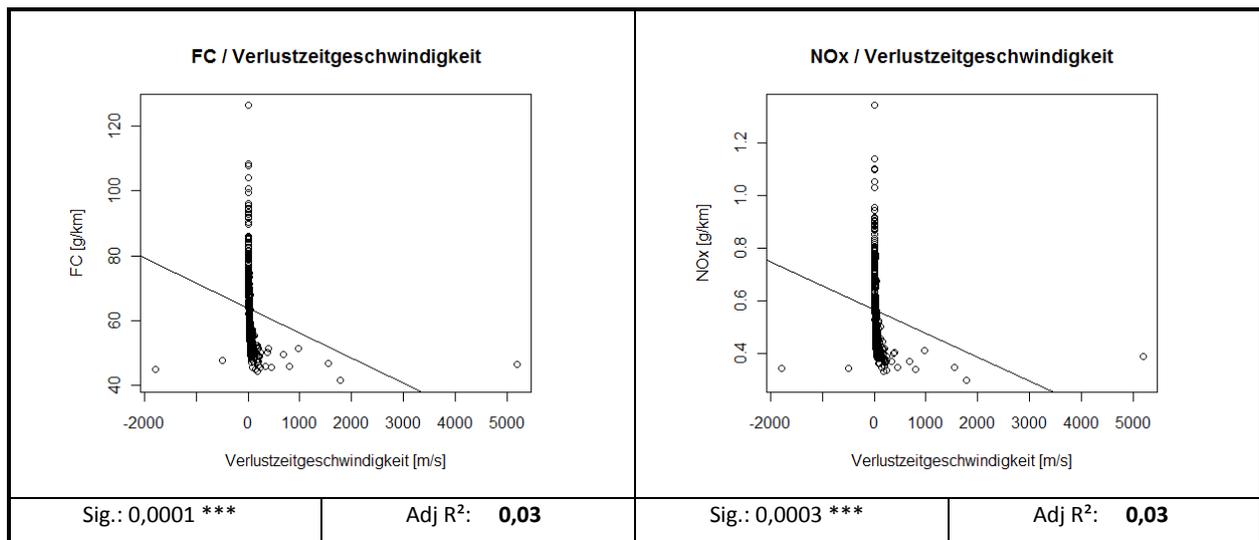


Abbildung 71: Korrelationsanalyse der Kenngröße Verlustzeitgeschwindigkeit

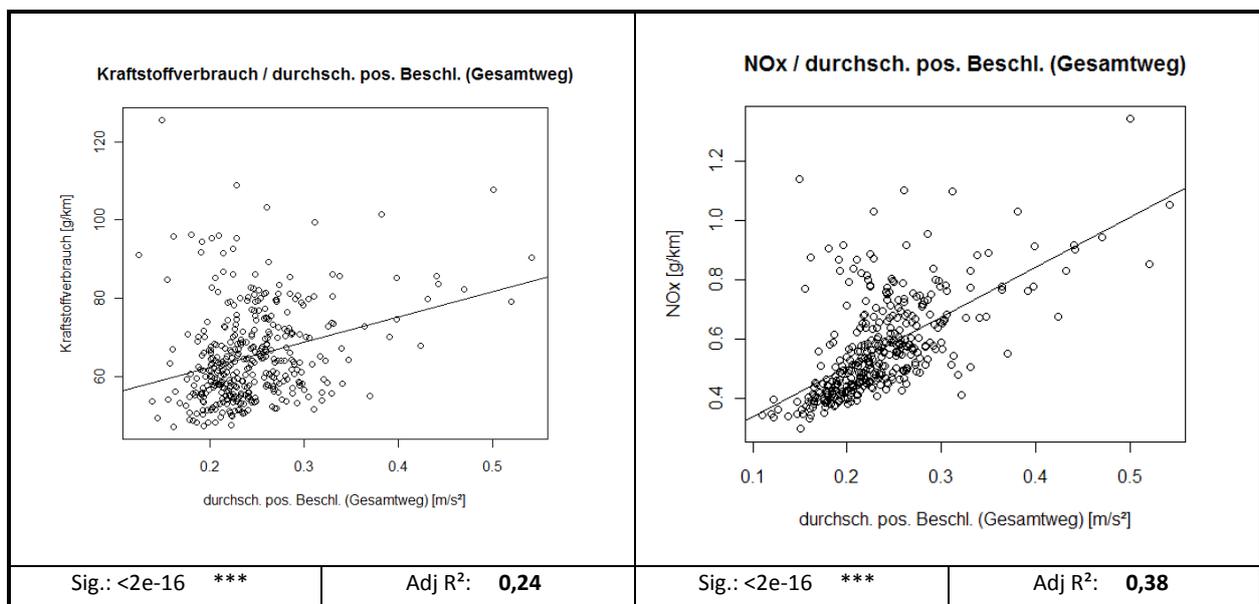


Abbildung 72: Korrelationsanalyse der Kenngröße durchschnittliche positive Beschleunigung (Gesamtweg)

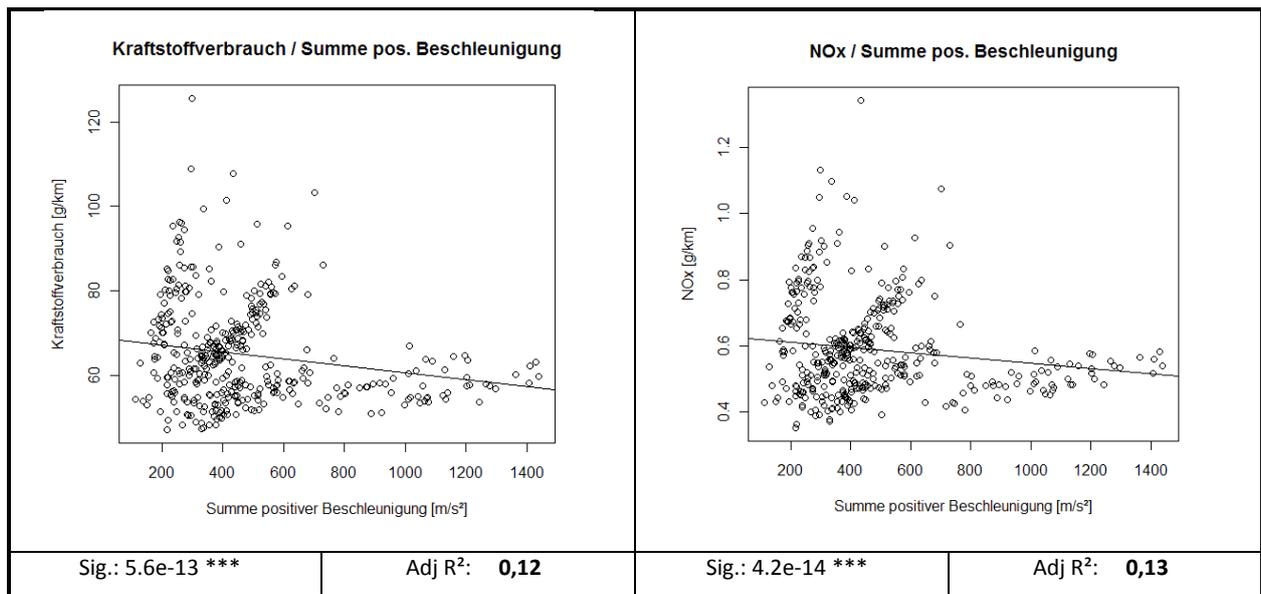


Abbildung 73: Korrelationsanalyse der Kenngröße Summer der positiven Beschleunigungen

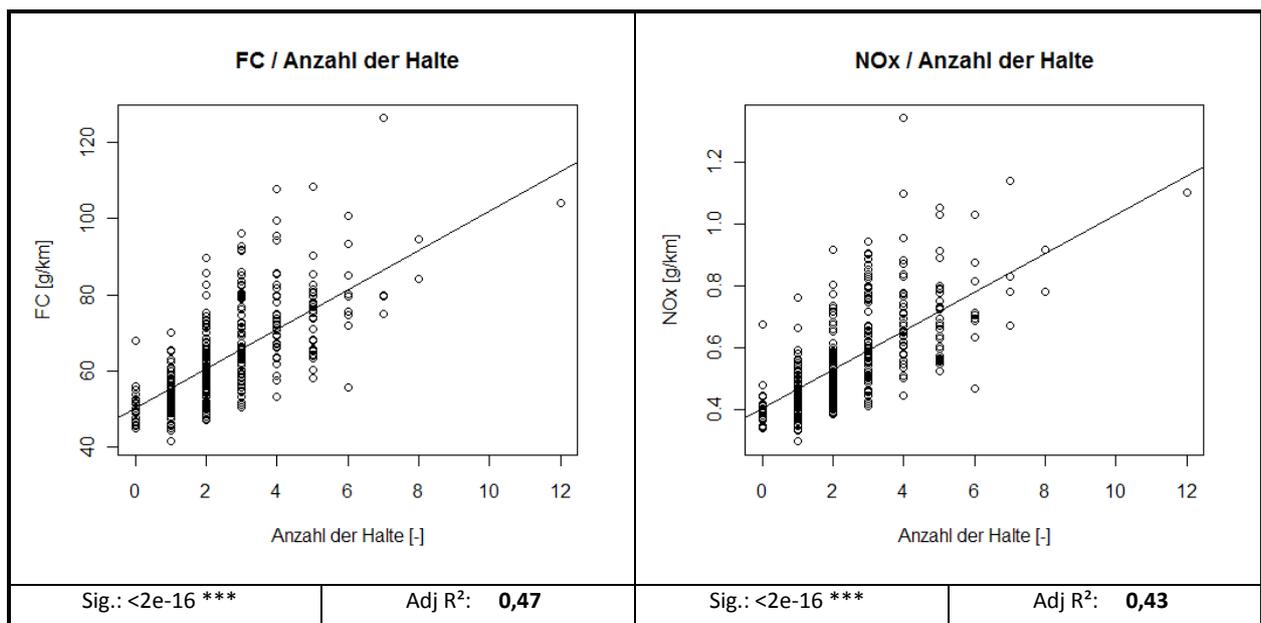


Abbildung 74: Korrelationsanalyse der Kenngröße Anzahl der Halte

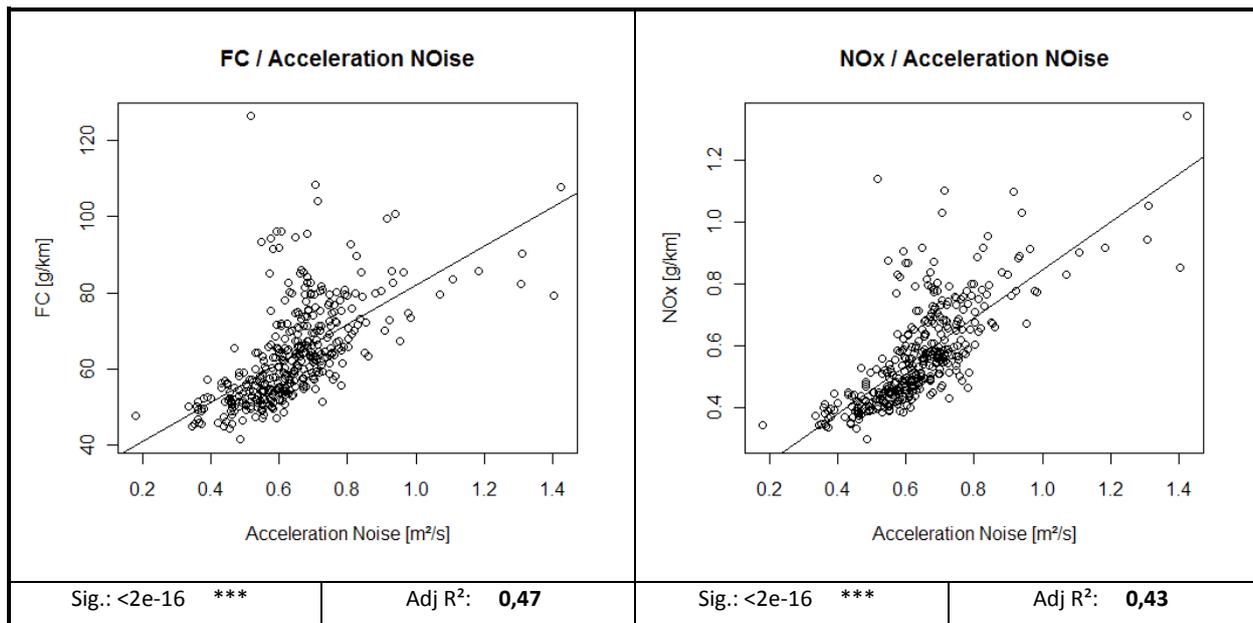


Abbildung 75: Korrelationsanalyse der Kenngröße Acceleration Noise

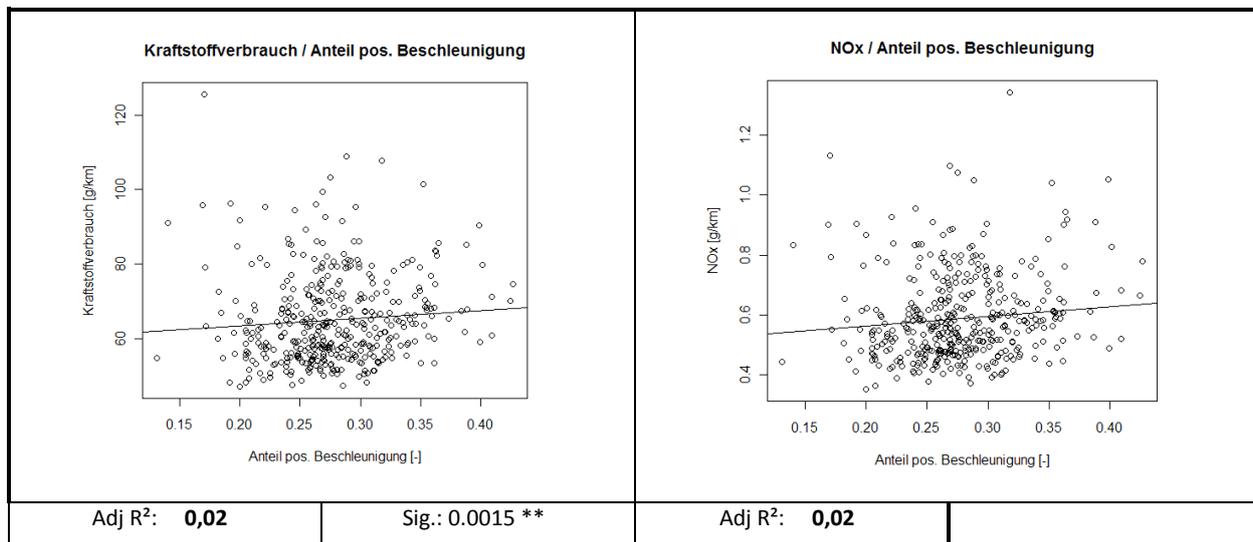


Abbildung 76: Korrelationsanalyse der Kenngröße Anteil positiver Beschleunigungen an der Gesamtfahrt

Anhang-A3: Qualitätsstufeneinteilung nach HBS (FGSV F. f.-u., 2005)

QSV	Beschreibung (Allgemein)	Beschreibung (VLSA)
A	Die Verkehrsteilnehmer werden äußerst selten von anderen beeinflusst. Sie besitzen die gewünschte Bewegungsfreiheit in dem Umfang, wie sie auf der Verkehrsanlage zugelassen ist. Der Verkehrsfluss ist frei.	Die Mehrzahl der Verkehrsteilnehmer kann ungehindert den Knotenpunkt passieren. Die Wartezeiten sind sehr kurz.
B	Die Verkehrsteilnehmer werden äußerst selten von anderen beeinflusst. Sie besitzen die gewünschte Bewegungsfreiheit in dem Umfang, wie sie auf der Verkehrsanlage zugelassen ist. Der Verkehrsfluss ist frei.	Alle während der Sperrzeit ankommenden Verkehrsteilnehmer können in der nachfolgenden Freigabezeit weiterfahren oder -gehen. Die Wartezeiten sind kurz.
C	Die individuelle Bewegungsmöglichkeit hängt vielfach vom Verhalten der übrigen Verkehrsteilnehmer ab. Die Bewegungsfreiheit ist spürbar eingeschränkt. Der Verkehrszustand ist stabil.	Nahezu alle während der Sperrzeit ankommenden Verkehrsteilnehmer können in der nachfolgenden Freigabezeit weiterfahren oder -gehen. Die Wartezeiten sind spürbar. Beim Kraftfahrzeugverkehr tritt im Mittel nur geringer Stau am Ende der Freigabezeit auf.
D	Der Verkehrsablauf ist gekennzeichnet durch hohe Belastungen, die zu deutlichen Beeinträchtigungen in der Bewegungsfreiheit der Verkehrsteilnehmer führen. Interaktionen zwischen ihnen finden nahezu ständig statt. Der Verkehrszustand ist noch stabil.	Im Kraftfahrzeugverkehr ist ständiger Reststau vorhanden. Die Wartezeiten für alle Verkehrsteilnehmer sind beträchtlich. Der Verkehrszustand ist noch stabil.
E	Es treten ständige gegenseitige Behinderungen zwischen den Verkehrsteilnehmern auf. Bewegungsfreiheit ist nur in sehr geringem Umfang gegeben. Geringfügige Verschlechterungen der Einflussgrößen können zum Zusammenbruch des Verkehrsflusses führen. Der Verkehr bewegt sich im Bereich zwischen Stabilität und Instabilität. Die Kapazität wird erreicht.	Die Verkehrsteilnehmer stehen in erheblicher Konkurrenz zueinander. Im Kraftfahrzeugverkehr stellt sich ein allmählich wachsender Stau ein. Die Wartezeiten sind sehr lang. Die Kapazität wird erreicht.
F	Die Nachfrage ist größer als die Kapazität. Die Verkehrsanlage ist überlastet.	Die Nachfrage ist größer als die Kapazität. Die Fahrzeuge müssen bis zu ihrer Abfertigung mehrfach vorrücken. Der Stau wächst stetig. Die Wartezeiten sind extrem lang. Die Anlage ist überlastet.

Anhang-A4: Das Level-of-Service Konzept nach HCM (TRB, 2000)

Urban street LOS is based on average through-vehicle travel speed for the segment, section, or entire urban street under consideration. The following general statements characterize LOS along urban streets. Refer to Exhibit 15-2 for speed ranges for each LOS.

Levels of service at signalized intersections are defined to represent reasonable ranges in control delay.

LOS	Beschreibung (avg vehicle travel speed)	Beschreibung (VLSA -control delay)
A	describes primarily free-flow operations at average travel speeds, usually about 90 percent of the FFS for the given street class. Vehicles are completely unimpeded in their ability to maneuver within the traffic stream. Control delay at signalized intersections is minimal.	describes operations with low control delay, up to 10 s/veh. This LOS occurs when progression is extremely favorable and most vehicles arrive during the green phase. Many vehicles do not stop at all. Short cycle lengths may tend to contribute to low delay values.
B	describes reasonably unimpeded operations at average travel speeds, usually about 70 percent of the FFS for the street class. The ability to maneuver within the traffic stream is only slightly restricted, and control delays at signalized intersections are not significant.	describes operations with control delay greater than 10 and up to 20 s/veh. This level generally occurs with good progression, short cycle lengths, or both. More vehicles stop than with LOS A, causing higher levels of delay.
C	describes stable operations; however, ability to maneuver and change lanes in midblock locations may be more restricted than at LOS B, and longer queues, adverse signal coordination, or both may contribute to lower average travel speeds of about 50 percent of the FFS for the street class.	describes operations with control delay greater than 20 and up to 35 s/veh. These higher delays may result from only fair progression, longer cycle lengths, or both. Individual cycle failures may begin to appear at this level. Cycle failure occurs when a given green phase does not serve queued vehicles, and overflows occur. The number of vehicles stopping is significant at this level, though many still pass through the intersection without stopping.
D	borders on a range in which small increases in flow may cause substantial increases in delay and decreases in travel speed. LOS D may be due to adverse signal progression, inappropriate signal timing, high volumes, or a combination of these factors. Average travel speeds are about 40 percent of FFS.	describes operations with control delay greater than 35 and up to 55 s/veh. The influence of congestion becomes more noticeable. Longer delays may result from some combination of unfavorable progression, long cycle lengths, and high v/c ratios. Many vehicles stop, and the proportion of vehicles not stopping declines. Individual cycle failures are noticeable.
E	is characterized by significant delays and average travel speeds of 33 percent or less of the FFS. Such operations are caused by a combination of adverse progression, high signal density, high volumes, extensive delays at critical intersections, and inappropriate signal timing.	describes operations with control delay greater than 55 and up to 80 s/veh. These high delay values generally indicate poor progression, long cycle lengths, and high v/c ratios. Individual cycle failures are frequent.
F	is characterized by urban street flow at extremely low speeds, typically onethird to one-fourth of the FFS. Intersection congestion is likely at critical signalized locations, with high delays, high volumes, and extensive queuing.	describes operations with control delay in excess of 80 s/veh. This level, considered unacceptable to most drivers, often occurs with oversaturation, that is, when arrival flow rates exceed the capacity of lane groups. It may also occur at high v/c ratios with many individual cycle failures. Poor progression and long cycle lengths may also contribute significantly to high delay levels.

Arrival Types (TRB, 2000):

A critical characteristic that must be quantified for the analysis of an urban street or signalized intersection is the quality of the progression. The parameter that describes this characteristic is the arrival type, AT, for each lane group. This parameter approximates the quality of progression by defining six types of dominant arrival flow. Arrival Type 1 is characterized by a dense platoon of more than 80 percent of the six arrival types lane group volume arriving at the start of the red phase. This arrival type represents network links that experience a poor rate of progression due to various conditions, including lack of coordination. Arrival Type 2 is characterized by a moderately dense platoon that arrives in the middle of the red phase or by a dispersed platoon of 40 to 80 percent of the lane group volume arriving throughout the red phase. This arrival type represents an unfavorable progression along an urban street. Arrival Type 3 consists of random arrivals in which the main platoon contains less than 40 percent of the lane group volume. This arrival type represents operations at non interconnected, signalized intersections with highly dispersed platoons. It also may be used to represent a coordinated operation with minimal benefits of progression. Arrival Type 4 consists of a moderately dense platoon that arrives in the middle of the green phase or of a dispersed platoon of 40 to 80 percent of the lane group volume arriving throughout the green phase. This arrival type represents a favorable progression along an urban street. Arrival Type 5 is characterized by a dense to moderately dense platoon of more than 80 percent of the lane group volume arriving at the start of the green phase. This arrival type represents a highly favorable progression, which may occur on routes with a low-to moderate number of side street entries and which receive high priority in signal timing. Arrival Type 6 is reserved for exceptional progression quality on routes with near ideal characteristics. It represents dense platoons progressing over several closely spaced intersections with minimal or negligible side street entries. Arrival type is best observed in the field but can be approximated

Progression Quality	Arrival Type	Conditions Under Which Arrival Type Is Likely To Occur
Very poor	1	Occurs for coordinated operation on two-way street where one direction of travel does not receive good progression. Signals are spaced less than 1,600 ft apart.
Unfavorable	2	A less extreme version of Arrival Type 1. Signals spaced at or more than 1,600 ft but less than 3,200 ft apart.
Random arrivals	3	Isolated signals spaced at or more than 3,200 ft apart (whether or not coordinated).
Favorable	4	Occurs for coordinated operation, often only in one direction on a two-way street. Signals are typically between 1,600 ft and 3,200 ft apart.
Highly favorable	5	Occurs for coordinated operation. More likely to occur with signals less than 1,600 ft apart.
Exceptional	6	Typical of one-way streets in dense networks and central business districts. Signal spacing is typically under 800 ft.

Urban Street Class	I	II	III	IV
Range of free-flow speeds (FFS)	90 to 70 km/h	70 to 55 km/h	55 to 50 km/h	55 to 40 km/h
Typical FFS	80 km/h	65 km/h	55 km/h	45 km/h
LOS	Average Travel Speed (km/h)			
A	> 72	> 59	> 50	> 41
B	> 56–72	> 46–59	> 39–50	> 32–41
C	> 40–56	> 33–46	> 28–39	> 23–32
D	> 32–40	> 26–33	> 22–28	> 18–23
E	> 26–32	> 21–26	> 17–22	> 14–18
F	≤ 26	≤ 21	≤ 17	≤ 14

Anhang-A5: Ergebnisse aus der Berechnung der untersuchten fahrdynamischen Kenngrößen

Die hier berechneten fahrdynamischen Kenngrößen beziehen sich auf die in Abschnitt 3.2. vorgestellten Größen, beispielhaft für die beiden Steuergebiete die im Abschnitt 4, zur Anwendung gekommen sind.

- SG 30 Wienerstraße (stadteinwärts)
- SG 41 Triester Straße Nord (stadteinwärts)

Input Trajektorie			Output PHEM			
Nr	Input File	Cycle	T	Dist	$v_{m,Reise}$	Prated
[-]	[-]	[-]	[s]	[km]	[km/h]	[kW]
					Kenngröße	
94	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Abend_-17-Start Line.dri	310	3.66	42.49	93
95	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Abend_-18-Start Line.dri	290	3.66	45.44	93
96	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Abend_-19-Start Line.dri	374	3.67	35.30	93
97	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Abend_-20-Start Line.dri	303	3.65	43.38	93
98	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Abend_-21-Start Line.dri	282	3.65	46.66	93
99	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Abend_-22-Start Line.dri	336	3.64	39.01	93
100	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Abend_-23-Start Line.dri	272	3.65	48.27	93
101	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Morgen_-1-Start Line.dri	267	3.67	49.50	93
102	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Morgen_-2-Start Line.dri	327	3.68	40.53	93
103	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Morgen_-3-Start Line.dri	283	3.70	47.01	93
104	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Morgen_-4-Start Line.dri	284	3.68	46.62	93
105	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Morgen_-5-Start Line.dri	354	3.64	37.02	93
106	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Morgen_-6-Start Line.dri	422	3.62	30.87	93
107	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Morgen_-7-Start Line.dri	494	3.62	26.40	93
108	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Nacht_-25-Start Line.dri	319	3.67	41.44	93
109	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Nacht_-26-Start Line.dri	335	3.68	39.49	93
110	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Nacht_-27-Start Line.dri	303	3.68	43.72	93
111	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Nacht_-28-Start Line.dri	315	3.67	41.91	93
112	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Nacht_-29-Start Line.dri	325	3.66	40.51	93
113	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Nacht_-30-Start Line.dri	328	3.63	39.89	93
114	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Nacht_-31-Start Line.dri	317	3.65	41.40	93
115	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Tag_-10-Start Line.dri	364	3.65	36.12	93
116	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Tag_-11-Start Line.dri	286	3.67	46.14	93
117	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Tag_-12-Start Line.dri	285	3.69	46.63	93
118	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Tag_-13-Start Line.dri	367	3.69	36.15	93
119	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Tag_-14-Start Line.dri	354	3.68	37.38	93
120	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Tag_-15-Start Line.dri	287	3.67	46.01	93
121	EURO4_DIESEL.gen	SG30_NS_Tag_-9-Start Line.dri	268	3.66	49.12	93
179	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Abend_-12-Start Line.dri	176	1.79	36.52	93
180	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Abend_-13-Start Line.dri	240	1.77	26.58	93
181	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Abend_-14-Start Line.dri	218	1.78	29.34	93
182	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Abend_-15-Start Line.dri	138	1.79	46.61	93
183	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Abend_-16-Start Line.dri	253	1.78	25.28	93
184	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Abend_-17-Start Line.dri	196	1.80	33.01	93
185	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Abend_-18-Start Line.dri	382	1.80	16.92	93
186	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Morgen_26.01.2012_-0-Start Line.dri	237	1.76	26.68	93
187	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Morgen_26.01.2012_-1-Start Line.dri	277	1.76	22.86	93
188	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Morgen_26.01.2012_-2-Start Line.dri	330	1.75	19.14	93
189	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Morgen_26.01.2012_-3-Start Line.dri	228	1.78	28.12	93
190	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Morgen_26.01.2012_-4-Start Line.dri	273	1.80	23.73	93
191	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Nacht_-19-Start Line.dri	247	1.77	25.74	93
192	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Nacht_-20-Start Line.dri	169	1.77	37.73	93
193	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Nacht_-21-Start Line.dri	192	1.78	33.36	93
194	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Nacht_-22-Start Line.dri	157	1.78	40.80	93
195	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Nacht_-23-Start Line.dri	164	1.78	39.11	93
196	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Nacht_-24-Start Line.dri	185	1.78	34.69	93
197	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Nacht_-25-Start Line.dri	172	1.77	37.00	93
198	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Nacht_-26-Start Line.dri	178	1.78	36.00	93
199	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Tag_-10-Start Line.dri	250	1.78	25.59	93
200	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Tag_-11-Start Line.dri	151	1.79	42.68	93
201	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Tag_-5-Start Line.dri	224	1.78	28.56	93
202	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Tag_-7-Start Line.dri	219	1.78	29.20	93
203	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Tag_-8-Start Line.dri	142	1.78	45.13	93
204	EURO4_DIESEL.gen	SG41_SN_Tag_-9-Start Line.dri	134	1.80	48.44	93

Output PHEM									
FC	NO _x	CO	HC	PM	PN	NO	Extrapolatio n	n_norm	Pe_norm
[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[/km]	[g/km]	-	-	-
52.09149	0.41120	0.03424	0.01200	0.03	4.89673E+13	0.24672	0.007551	0.314234	0.032964
50.52620	0.39494	0.02968	0.01173	0.03	4.7922E+13	0.23696	0.009969	0.328712	0.034046
58.97863	0.48800	0.04974	0.01355	0.04	5.3674E+13	0.29280	0.012095	0.280531	0.029143
52.54378	0.39505	0.02848	0.01245	0.04	5.05331E+13	0.23703	0.004815	0.336244	0.033336
47.37755	0.35044	0.03109	0.01105	0.03	4.36158E+13	0.21027	0.004518	0.315993	0.034729
54.58052	0.45388	0.04022	0.01222	0.04	4.96397E+13	0.27233	0.009382	0.285012	0.030782
51.35567	0.40329	0.02438	0.01198	0.03	5.03533E+13	0.24197	0.010554	0.367703	0.037789
46.84305	0.34877	0.02532	0.01117	0.03	4.4943E+13	0.20926	0.004611	0.346443	0.034911
52.05849	0.42729	0.03636	0.01196	0.03	4.77249E+13	0.25638	0.014254	0.288895	0.029684
49.09546	0.36599	0.02516	0.01180	0.03	4.78345E+13	0.21959	0.021747	0.347988	0.031687
48.97682	0.37643	0.02890	0.01140	0.03	4.6102E+13	0.22586	0.008922	0.327302	0.034105
55.74373	0.43704	0.04297	0.01297	0.04	5.09372E+13	0.26223	0.007993	0.286082	0.029444
59.21757	0.47768	0.04645	0.01380	0.04	5.30786E+13	0.28661	0.007348	0.245828	0.024173
65.07973	0.55973	0.05960	0.01489	0.04	5.59456E+13	0.33584	0.017560	0.214605	0.020280
52.21145	0.44601	0.03677	0.01175	0.03	4.75789E+13	0.26761	0.013740	0.288791	0.033428
54.41630	0.44767	0.03966	0.01246	0.04	4.9355E+13	0.26860	0.009694	0.290458	0.033533
51.39930	0.40536	0.03654	0.01183	0.03	4.72853E+13	0.24322	0.008165	0.313163	0.038330
49.23866	0.40391	0.03543	0.01125	0.03	4.49173E+13	0.24235	0.008436	0.279453	0.030543
47.19963	0.38896	0.03439	0.01052	0.03	4.14707E+13	0.23338	0.009959	0.245360	0.031339
49.30559	0.39522	0.03506	0.01139	0.03	4.39566E+13	0.23713	0.007649	0.262556	0.029589
48.82227	0.39972	0.03540	0.01088	0.03	4.27281E+13	0.23983	0.008586	0.254141	0.035486
58.12642	0.48239	0.04735	0.01314	0.04	5.20901E+13	0.28943	0.017697	0.280198	0.030208
52.38335	0.41720	0.02919	0.01215	0.03	5.00414E+13	0.25032	0.012989	0.348807	0.038472
46.29235	0.37224	0.03335	0.01039	0.03	4.18804E+13	0.22334	0.009350	0.296298	0.035945
57.29895	0.50407	0.05615	0.01231	0.04	4.93044E+13	0.30244	0.014998	0.257470	0.032903
59.33628	0.54641	0.04920	0.01321	0.04	5.47431E+13	0.32784	0.027529	0.302969	0.028476
49.74169	0.40529	0.03485	0.01097	0.03	4.5659E+13	0.24318	0.008474	0.308235	0.039480
45.80456	0.33954	0.02465	0.01084	0.03	4.36547E+13	0.20373	0.004642	0.333282	0.033340
56.00929	0.44795	0.04455	0.01317	0.04	5.15946E+13	0.26877	0.009344	0.286446	0.026639
65.02377	0.57397	0.05029	0.01460	0.04	5.55326E+13	0.34438	0.017262	0.207147	0.023894
62.15850	0.54557	0.06214	0.01368	0.04	5.22045E+13	0.32734	0.012758	0.217192	0.025425
49.46110	0.38150	0.03278	0.01154	0.03	4.6695E+13	0.22890	0.008251	0.329581	0.036461
65.96162	0.56037	0.06082	0.01510	0.04	5.53429E+13	0.33622	0.009896	0.200861	0.021587
56.98899	0.44006	0.03330	0.01350	0.04	5.19301E+13	0.26403	0.004449	0.256614	0.024981
80.16036	0.71438	0.08859	0.01852	0.05	6.25985E+13	0.42863	0.009367	0.142934	0.013610
64.08242	0.57937	0.06775	0.01463	0.04	5.50361E+13	0.34762	0.019901	0.212205	0.018569
69.28876	0.63674	0.08880	0.01545	0.04	5.55128E+13	0.38204	0.010758	0.175557	0.022576
79.68591	0.73124	0.08974	0.01739	0.05	6.29977E+13	0.43874	0.009295	0.161048	0.020369
63.36752	0.54079	0.05395	0.01460	0.04	5.6479E+13	0.32448	0.012253	0.228507	0.023585
67.49937	0.58024	0.06441	0.01543	0.04	5.66287E+13	0.34814	0.009432	0.192253	0.017187
65.99493	0.57328	0.06452	0.01472	0.04	5.44675E+13	0.34397	0.011377	0.196258	0.022471
55.31369	0.45043	0.05056	0.01261	0.04	4.95657E+13	0.27026	0.012067	0.286123	0.026803
57.45791	0.46802	0.05119	0.01354	0.04	5.0915E+13	0.28081	0.012285	0.253242	0.026980
50.71467	0.38208	0.03390	0.01199	0.03	4.73214E+13	0.22925	0.004760	0.294727	0.030035
56.41983	0.46830	0.04683	0.01308	0.04	5.13512E+13	0.28098	0.024735	0.302606	0.032043
54.65166	0.42117	0.03706	0.01285	0.04	4.88605E+13	0.25270	0.005489	0.252499	0.024997
58.98456	0.55247	0.07439	0.01283	0.04	5.15716E+13	0.33148	0.025996	0.277619	0.029952
56.24546	0.46116	0.03624	0.01294	0.04	4.98648E+13	0.27670	0.015964	0.268197	0.030904
65.84814	0.60273	0.08337	0.01431	0.04	5.19868E+13	0.36164	0.017708	0.184582	0.024200
53.55166	0.43613	0.04180	0.01184	0.03	4.85168E+13	0.26168	0.008736	0.302797	0.040072
63.82285	0.57110	0.06550	0.01415	0.04	5.35421E+13	0.34266	0.016545	0.212517	0.027003
64.51228	0.58958	0.05904	0.01417	0.04	5.45799E+13	0.35375	0.016286	0.224008	0.026181
50.15293	0.38774	0.03984	0.01174	0.03	4.59395E+13	0.23264	0.006838	0.323406	0.037373
45.50264	0.34822	0.02932	0.01055	0.03	4.30433E+13	0.20893	0.004182	0.320853	0.035559

Output PHEM									
Nr	Ppos	Pneg	Pbrake	EposICE	EnegICE	Eair	Eroll	Eacc	Ebrake
[-]	[-]	[-]	[-]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
94	0.050888	-0.017923	-0.000110	0.407525	-0.143537	-0.067933	-0.154594	0.005420	-0.000882
95	0.053648	-0.019602	-0.000208	0.401912	-0.146849	-0.075183	-0.155741	0.022889	-0.001555
96	0.050490	-0.021348	-0.001021	0.487821	-0.206254	-0.064897	-0.154275	-0.003244	-0.009860
97	0.048551	-0.015215	0.000000	0.380033	-0.119099	-0.065566	-0.154039	0.004411	0.000000
98	0.049780	-0.015051	-0.000453	0.362644	-0.109645	-0.077971	-0.155928	0.027702	-0.003301
99	0.053069	-0.022287	-0.000728	0.460637	-0.193452	-0.074506	-0.154817	0.015509	-0.006320
100	0.055006	-0.017217	-0.000713	0.386508	-0.120979	-0.079243	-0.155814	0.019821	-0.005008
101	0.050828	-0.015917	0.000000	0.350583	-0.109786	-0.083274	-0.157342	0.043492	0.000000
102	0.049619	-0.019935	-0.000195	0.419160	-0.168401	-0.081011	-0.157370	0.035258	-0.001643
103	0.048819	-0.017132	0.000000	0.356909	-0.125249	-0.075946	-0.157311	0.046726	0.000000
104	0.053018	-0.018913	-0.000267	0.388978	-0.138760	-0.083269	-0.157531	0.037375	-0.001962
105	0.048195	-0.018752	-0.001126	0.440746	-0.171485	-0.059523	-0.152502	0.000828	-0.010297
106	0.039559	-0.015386	-0.000250	0.431259	-0.167733	-0.053554	-0.150621	-0.009152	-0.002722
107	0.039689	-0.019409	-0.000266	0.506503	-0.247692	-0.056452	-0.150893	0.002052	-0.003391
108	0.050841	-0.017413	-0.001186	0.418970	-0.143496	-0.085242	-0.157597	0.022330	-0.009776
109	0.050968	-0.017435	-0.001234	0.441085	-0.150882	-0.079547	-0.156880	0.003652	-0.010682
110	0.051664	-0.013334	-0.001084	0.404402	-0.104371	-0.079970	-0.157128	-0.009550	-0.008484
111	0.048141	-0.017598	-0.001145	0.391745	-0.143203	-0.085966	-0.157491	0.048464	-0.009316
112	0.044980	-0.013640	-0.001381	0.377643	-0.114522	-0.089746	-0.157594	0.038201	-0.011595
113	0.042766	-0.013178	-0.000318	0.362374	-0.111658	-0.084834	-0.156031	0.035603	-0.002695
114	0.049235	-0.013749	-0.002929	0.403196	-0.112596	-0.089919	-0.157114	0.023401	-0.023989
115	0.049914	-0.019706	-0.000864	0.469358	-0.185302	-0.065618	-0.153879	-0.008248	-0.008123
116	0.052542	-0.014070	-0.000300	0.388200	-0.103955	-0.074002	-0.155811	-0.006968	-0.002217
117	0.051307	-0.015363	-0.000330	0.377750	-0.113108	-0.080109	-0.157666	0.018896	-0.002430
118	0.056695	-0.023792	-0.004057	0.537519	-0.225571	-0.070041	-0.155807	0.001743	-0.038465
119	0.057344	-0.028869	-0.001836	0.524413	-0.264003	-0.065409	-0.154693	0.027464	-0.016789
120	0.057964	-0.018484	-0.001391	0.429755	-0.137046	-0.081986	-0.156905	0.001539	-0.010315
121	0.047053	-0.013712	-0.000380	0.325761	-0.094935	-0.081181	-0.156493	0.052145	-0.002632
179	0.044230	-0.017591	-0.000399	0.201099	-0.079981	-0.031488	-0.075104	0.010322	-0.001812
180	0.041447	-0.017554	-0.001001	0.256973	-0.108833	-0.030188	-0.074396	-0.013212	-0.006205
181	0.046053	-0.020628	-0.001632	0.259354	-0.116168	-0.031079	-0.074697	-0.004207	-0.009190
182	0.052768	-0.016307	0.000000	0.188118	-0.058133	-0.034901	-0.075828	0.002544	0.000000
183	0.039170	-0.017583	-0.001644	0.256008	-0.114921	-0.029788	-0.074511	-0.001551	-0.010743
184	0.038681	-0.013700	-0.000047	0.195852	-0.069366	-0.033735	-0.075984	0.006299	-0.000240
185	0.030222	-0.016613	-0.000807	0.298242	-0.163938	-0.022296	-0.073902	-0.003540	-0.007961
186	0.041657	-0.023087	-0.000436	0.255042	-0.141352	-0.026005	-0.073109	0.012999	-0.002670
187	0.039910	-0.017334	-0.000453	0.285593	-0.124041	-0.026525	-0.073226	-0.033828	-0.003244
188	0.039048	-0.018679	-0.000632	0.332882	-0.159240	-0.021557	-0.072202	-0.047929	-0.005390
189	0.039445	-0.015860	-0.000828	0.232332	-0.093418	-0.024126	-0.073853	-0.012044	-0.004877
190	0.037023	-0.019837	-0.000616	0.261107	-0.139898	-0.027198	-0.074917	0.010558	-0.004346
191	0.042457	-0.019986	-0.001430	0.270909	-0.127525	-0.031792	-0.074391	-0.003703	-0.009126
192	0.050231	-0.023429	-0.000156	0.219301	-0.102285	-0.031010	-0.074476	0.012444	-0.000681
193	0.042401	-0.015421	-0.000293	0.210309	-0.076488	-0.033278	-0.075170	-0.001200	-0.001453
194	0.045741	-0.015705	-0.000047	0.185517	-0.063698	-0.031722	-0.075002	0.007008	-0.000192
195	0.052383	-0.020341	-0.000113	0.221931	-0.086177	-0.034892	-0.075559	-0.001633	-0.000480
196	0.042299	-0.017301	-0.000021	0.202152	-0.082686	-0.033901	-0.075504	0.012533	-0.000100
197	0.062163	-0.032211	-0.000582	0.276209	-0.143123	-0.030313	-0.074234	-0.001166	-0.002587
198	0.045032	-0.014128	-0.001314	0.207071	-0.064964	-0.035823	-0.075674	-0.002066	-0.006044
199	0.045136	-0.020936	-0.004248	0.291505	-0.135213	-0.027984	-0.074210	-0.001501	-0.027434
200	0.059618	-0.019546	-0.001615	0.232559	-0.076246	-0.036906	-0.076191	-0.014106	-0.006299
201	0.047985	-0.020982	-0.001858	0.277675	-0.121419	-0.032444	-0.074960	-0.013625	-0.010749
202	0.048850	-0.022669	-0.000917	0.276370	-0.128252	-0.034466	-0.075170	-0.008649	-0.005189
203	0.050996	-0.013624	-0.002359	0.187072	-0.049976	-0.033823	-0.075367	0.002579	-0.008655
204	0.046175	-0.010616	0.000000	0.159841	-0.036749	-0.039781	-0.077111	0.014538	0.000000

			Output PHEM						
Etransm	Mass	Loading	P _{a,pos}	a_neg	Acc Noise	pAcc	pDec	pCruise	pStop
[kWh]	[kg]	[kg]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]	[%]	[%]	[%]	[%]
			Kenngroße						
-0.045999	1500	20	0.426	-0.372	0.464	0.306	0.365	0.329	0.000
-0.045474	1500	20	0.433	-0.462	0.504	0.283	0.307	0.400	0.010
-0.049291	1500	20	0.561	-0.537	0.613	0.324	0.340	0.243	0.094
-0.045741	1500	20	0.355	-0.350	0.390	0.304	0.327	0.370	0.000
-0.043501	1500	20	0.401	-0.360	0.437	0.252	0.319	0.422	0.007
-0.047052	1500	20	0.573	-0.519	0.567	0.250	0.301	0.318	0.131
-0.045285	1500	20	0.386	-0.399	0.439	0.283	0.320	0.397	0.000
-0.043672	1500	20	0.299	-0.389	0.361	0.243	0.277	0.479	0.000
-0.045995	1500	20	0.495	-0.535	0.532	0.242	0.266	0.355	0.138
-0.045129	1500	20	0.345	-0.413	0.373	0.226	0.276	0.498	0.000
-0.044831	1500	20	0.434	-0.487	0.470	0.246	0.271	0.451	0.032
-0.047766	1500	20	0.428	-0.471	0.530	0.350	0.325	0.266	0.059
-0.047480	1500	20	0.475	-0.446	0.483	0.289	0.294	0.268	0.149
-0.050127	1500	20	0.626	-0.526	0.598	0.281	0.334	0.219	0.166
-0.045192	1500	20	0.702	-0.654	0.598	0.182	0.216	0.458	0.144
-0.046771	1500	20	0.632	-0.530	0.556	0.212	0.266	0.421	0.101
-0.044898	1500	20	0.545	-0.407	0.483	0.215	0.261	0.482	0.043
-0.044233	1500	20	0.550	-0.564	0.547	0.203	0.251	0.410	0.137
-0.042388	1500	20	0.682	-0.525	0.551	0.148	0.237	0.431	0.185
-0.042760	1500	20	0.623	-0.490	0.504	0.165	0.229	0.436	0.171
-0.042984	1500	20	0.614	-0.595	0.612	0.186	0.218	0.426	0.170
-0.048191	1500	20	0.593	-0.544	0.620	0.280	0.299	0.310	0.110
-0.045247	1500	20	0.390	-0.299	0.400	0.297	0.350	0.353	0.000
-0.043333	1500	20	0.482	-0.383	0.445	0.214	0.295	0.488	0.004
-0.049382	1500	20	0.721	-0.667	0.756	0.292	0.327	0.270	0.112
-0.050983	1500	20	0.647	-0.623	0.708	0.316	0.350	0.291	0.042
-0.045043	1500	20	0.483	-0.443	0.516	0.286	0.328	0.373	0.014
-0.042665	1500	20	0.337	-0.369	0.367	0.194	0.280	0.526	0.000
-0.023036	1500	20	0.599	-0.440	0.559	0.261	0.386	0.301	0.051
-0.024146	1500	20	0.633	-0.661	0.622	0.246	0.233	0.208	0.313
-0.024014	1500	20	0.794	-0.590	0.723	0.248	0.330	0.229	0.193
-0.021800	1500	20	0.374	-0.370	0.363	0.290	0.297	0.413	0.000
-0.024497	1500	20	0.659	-0.841	0.653	0.245	0.190	0.241	0.324
-0.022837	1500	20	0.414	-0.465	0.440	0.260	0.240	0.291	0.209
-0.026606	1500	20	0.735	-0.702	0.629	0.233	0.246	0.105	0.416
-0.024913	1500	20	0.666	-0.581	0.656	0.266	0.333	0.232	0.169
-0.024740	1500	20	0.739	-0.619	0.653	0.260	0.271	0.173	0.296
-0.026566	1500	20	0.720	-0.685	0.702	0.285	0.267	0.109	0.339
-0.024015	1500	20	0.489	-0.549	0.551	0.316	0.272	0.197	0.215
-0.025307	1500	20	0.692	-0.636	0.648	0.253	0.293	0.176	0.278
-0.024379	1500	20	0.755	-0.705	0.659	0.239	0.247	0.198	0.316
-0.023293	1500	20	0.731	-0.550	0.679	0.278	0.385	0.314	0.024
-0.022724	1500	20	0.688	-0.520	0.545	0.214	0.286	0.339	0.161
-0.021912	1500	20	0.423	-0.431	0.460	0.280	0.306	0.401	0.013
-0.023192	1500	20	0.556	-0.530	0.559	0.293	0.293	0.305	0.110
-0.022494	1500	20	0.492	-0.393	0.483	0.232	0.324	0.238	0.205
-0.024785	1500	20	0.745	-0.522	0.715	0.314	0.442	0.209	0.035
-0.022504	1500	20	0.522	-0.558	0.542	0.213	0.197	0.404	0.185
-0.025163	1500	20	0.760	-0.753	0.802	0.288	0.296	0.204	0.212
-0.022811	1500	20	0.492	-0.560	0.611	0.344	0.278	0.311	0.066
-0.024480	1500	20	0.727	-0.785	0.693	0.254	0.232	0.232	0.281
-0.024645	1500	20	0.836	-0.771	0.715	0.242	0.256	0.256	0.247
-0.021829	1500	20	0.424	-0.405	0.482	0.246	0.246	0.507	0.000
-0.020738	1500	20	0.385	-0.298	0.350	0.239	0.321	0.440	0.000

Output R-Skript									
Nr	a _{avg}	a _{pos,avg}	a _{pos,avg,ges}	a _{pos,Sum}	AnzHalte	PKE	PKE _{Sum}	RPA	t _{verlust}
[-]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]	[#]	[m ² /s]	[m ² /s]	[m ² /s]	[s]
	Kenngroße	Kenngroße	Kenngroße	Kenngroße	Kenngroße	Kenngroße	Kenngroße	Kenngroße	Kenngroße
94	-0.006	0.453	0.211	327	1	4.528	7005	0.948	46.0
95	-0.018	0.445	0.210	304	1	4.676	6771	0.917	26.0
96	0.002	0.542	0.237	442	3	4.248	7927	1.069	109.3
97	-0.004	0.367	0.175	265	0	3.900	5892	0.803	39.5
98	-0.019	0.378	0.175	247	1	4.037	5688	0.772	18.5
99	-0.013	0.521	0.212	356	1	4.575	7681	1.044	73.5
100	-0.019	0.345	0.168	228	0	4.148	5637	0.769	9.1
101	-0.030	0.317	0.153	204	0	3.864	5155	0.698	2.4
102	-0.026	0.457	0.188	307	1	4.249	6934	0.933	61.4
103	-0.037	0.344	0.161	227	0	4.027	5695	0.767	16.6
104	-0.025	0.408	0.187	265	1	4.399	6238	0.842	18.8
105	-0.003	0.448	0.205	363	1	4.005	7086	0.963	91.5
106	0.002	0.461	0.188	397	2	3.290	6938	0.948	161.1
107	-0.003	0.607	0.214	528	5	3.219	7941	1.080	232.7
108	-0.017	0.479	0.187	299	2	3.891	6202	0.833	54.3
109	-0.002	0.474	0.204	341	2	4.208	7032	0.947	69.8
110	0.008	0.418	0.187	283	1	4.111	6223	0.838	37.7
111	-0.030	0.410	0.166	262	2	3.541	5577	0.752	50.7
112	-0.017	0.429	0.159	257	2	3.371	5465	0.740	61.2
113	-0.017	0.442	0.162	266	2	3.393	5554	0.757	65.9
114	-0.016	0.449	0.175	278	2	3.778	5985	0.811	54.2
115	0.001	0.564	0.228	416	2	4.307	7839	1.059	100.8
116	0.005	0.410	0.184	264	0	4.483	6411	0.868	21.8
117	-0.013	0.392	0.177	252	1	4.206	5977	0.804	18.6
118	-0.008	0.650	0.264	484	3	4.800	8793	1.176	101.1
119	-0.018	0.620	0.258	456	2	4.713	8328	1.117	88.8
120	-0.001	0.457	0.205	293	1	4.737	6778	0.918	22.3
121	-0.037	0.317	0.137	184	0	3.468	4647	0.632	4.5
179	-0.011	0.540	0.220	193	2	3.782	3313	0.920	47.1
180	0.004	0.604	0.205	246	2	3.519	4219	1.172	112.1
181	0.000	0.712	0.252	275	3	4.134	4502	1.244	89.8
182	-0.001	0.420	0.200	138	0	5.080	3485	0.973	9.0
183	-0.001	0.640	0.212	268	3	3.311	4188	1.158	124.8
184	-0.006	0.422	0.165	161	1	3.241	3166	0.876	66.3
185	-0.001	0.787	0.200	382	6	2.545	4853	1.327	252.4
186	-0.013	0.636	0.232	275	3	3.553	4206	1.177	110.3
187	0.025	0.751	0.232	322	3	3.441	4766	1.329	150.0
188	0.025	0.777	0.243	401	4	3.285	5421	1.509	203.3
189	0.005	0.514	0.199	228	2	3.303	3765	1.043	99.5
190	-0.009	0.645	0.218	298	4	3.069	4182	1.143	143.2
191	0.001	0.684	0.219	270	3	3.593	4433	1.235	119.6
192	-0.014	0.644	0.263	222	2	4.336	3655	1.019	41.2
193	-0.001	0.552	0.204	196	2	3.514	3363	0.934	63.6
194	-0.008	0.397	0.183	144	1	3.519	2759	0.768	28.6
195	0.002	0.534	0.217	177	1	4.402	3596	1.001	35.4
196	-0.011	0.579	0.204	188	1	4.457	4109	1.143	56.3
197	0.000	0.873	0.370	318	1	7.211	6180	1.720	44.4
198	0.002	0.454	0.189	168	1	4.012	3567	0.990	49.6
199	-0.003	0.755	0.276	344	5	3.900	4872	1.343	121.8
200	0.013	0.488	0.227	171	1	4.871	3658	1.017	21.9
201	0.007	0.692	0.237	264	2	4.181	4666	1.299	95.8
202	0.003	0.694	0.241	264	3	4.004	4381	1.213	90.8
203	-0.001	0.415	0.191	135	0	4.403	3109	0.871	13.6
204	-0.017	0.324	0.147	98	0	3.538	2360	0.654	3.9

Output R-Skript		
$V_{m,netto}$	$V_{m,Reise}$	$V_{Verlust}$
[m/s]	[m/s]	[m/s]
Kenngröße	Kenngröße	Kenngröße
11.91	11.82	79.42
12.84	12.63	140.48
11.03	9.81	33.50
12.06	12.07	92.37
13.15	12.97	197.43
12.57	10.84	49.53
13.41	13.42	401.38
13.75	13.76	1554.22
13.18	11.27	59.96
13.05	13.06	222.03
13.49	12.96	195.39
11.01	10.29	39.79
10.22	8.58	22.46
9.11	7.33	15.55
13.65	11.52	67.64
12.97	10.98	52.57
12.79	12.15	97.69
13.62	11.64	72.31
14.04	11.26	59.61
13.60	11.09	55.05
14.10	11.51	67.32
11.39	10.04	36.27
12.81	12.82	168.40
13.12	12.97	198.02
11.51	10.05	36.41
11.04	10.39	41.36
13.08	12.80	164.27
13.63	13.64	804.68
11.02	10.14	37.70
11.09	7.39	15.80
10.61	8.16	19.79
12.95	12.97	196.84
10.77	7.03	14.26
12.04	9.17	27.01
8.57	4.70	7.10
10.08	7.42	15.93
9.85	6.36	11.74
8.47	5.33	8.65
10.21	7.82	17.92
9.61	6.59	12.55
11.15	7.16	14.77
11.06	10.49	42.93
11.38	9.27	27.89
11.80	11.35	62.14
12.37	10.87	50.18
12.39	9.64	31.56
11.01	10.28	39.66
12.86	10.01	35.91
9.93	7.11	14.59
12.82	11.86	81.27
11.33	7.92	18.46
11.37	8.12	19.56
12.53	12.55	130.45
13.45	13.47	460.91