



Institut für Straßen- und Verkehrswesen

# Innerstädtische Verkehrsflussanalyse mittels GPS-Technologie

MASTERARBEIT

vorgelegt von

Andreas Kramer, BSc.

bei

Univ. Prof. Dr. Ing. Martin FELLENDORF

Technische Universität Graz

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Graz, 12.12.2013



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, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Andreas Kramer, 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, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Andreas Kramer, BSc.



## Danksagung

Eine Diplomarbeit – und das wissen viele zu bestätigen – ist ein langer und oft aufreibender Prozess und markiert zudem den Abschluss eines langen Bildungsweges. Auf dieser gesamten Reise wurde mir von unzähligen Personen große und hingebende Unterstützung zuteil. Bei diesen, zuallererst meinen Eltern, Franz und Christiane, sowie meinen Großeltern, darf ich mich von Herzen bedanken. Auch will ich mich bei meinen Freunden, Angehörigen, Bekannten und Kollegen bedanken, welche mich weit über die Zeit an der Diplomarbeit hinaus unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt meinen Betreuern Karin und Robert, sowie Professor Martin Fellendorf.



Aufgabenstellung für die Masterarbeit

von Andreas Kramer

Graz, 25.11.2011

## Innerstädtische Verkehrsflussanalyse mittels GPS-Technologie

### Problemstellung

Eine Möglichkeit zur Qualitätsbewertung des Verkehrsablaufs inner- und außerorts stellen mikroskopische Verkehrsflussanalysen dar. Diese Bewertungen sind an Messdaten gebunden, welche bislang überwiegend durch räumlich fixierte Messstationen generiert wurden. Diese weisen zwar eine robuste Aufzeichnungsqualität auf, aber auch limitierte Möglichkeiten hinsichtlich fahrdynamischer Kenntniserwerbungen.

Die Entwicklungen der GNSS-Technologie (Global Navigation Satellite System) lassen erhoffen, die oben genannten Limitierungen zu überwinden und in der Verkehrsflussanalyse einen wesentlichen Beitrag zu einer höheren Untersuchungsqualität beizusteuern. Bei dieser Technologie wiederum sind Einschränkungen in der Empfangsqualität abhängig von verschiedensten Gegebenheiten der Fall, welche einer detaillierten Untersuchung auf Anwendbarkeit bedürfen.

Die Untersuchungen sollen auf Basis von zeitgleich erhobenen Messdaten und dynamischen Fahrverlaufsdaten mittels GPS-Empfängern durchgeführt werden und den Fokus auf die Anwendbarkeit dieser Technologie richten. Dabei spielen die unterschiedlichen Empfangsqualitäten der Signale vor allem im städtischen Gebiet eine wesentliche Rolle.

In dieser Arbeit sollen bereits erfolgte empirische Untersuchungen der Kenngrößen zusammengefasst und ein fundamentaler Überblick gegeben werden, welche Analysen mit Hilfe der zur Verfügung gestellten Messdaten und der selbst erhobenen Messdaten angestellt werden können.

### Aufgabenstellung

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die verschiedenen Kenngrößen der Verkehrsflussanalyse und deren Zusammenhänge mittels realen Messdaten (stationäre Messdaten und Messfahrten) im städtischen Gebiet anzuwenden. Der Fokus soll dabei auf die Qualität der generierten Kenngrößen aus den institutseigenen GPS-Empfängern gelegt werden.

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

- Literaturrecherche zum Begriff der Verkehrsflussanalyse
- Identifikation von relevanten Kenngrößen (makroskopische und mikroskopische sowie stationäre und fahrdynamische Größen) und Zusammenhang in der Verkehrsflusstheorie
- Analyse der aufgezeichneten GPS-Fahrverläufe innerhalb eines festgelegten Testgebietes (Grazer Stadtgebiet) und Bewertung der Aufzeichnungsqualität der Parameter
- Durchführung der Verkehrsflussanalyse im Testgebiet mit stationären Messdaten und GPS-Fahrverläufen
- Sofern die vorangegangene Datenanalyse eine genauere Betrachtung und Nachbildung benötigt, sollte ein fiktiver Streckenzug im mikroskopischen Simulationsmodell VISSIM nachgebildet werden, um so die zuvor analysierten Ergebnisse zu untermauern.
- Schlussfolgerungen und Hinweise zur Datenaufzeichnung und -analyse von fahrdynamischen Kenngrößen und Anwendung in der Verkehrsflussanalyse im städtischen Bereich

Ein PC mit der Produktsoftware der institutseigenen GPS-Geräte, die GPS-Geräte selbst, sowie allgemeine Bürosoftware stehen dem Diplomanden am Institut zur Verfügung. Der Diplomand verpflichtet sich, die Software sowie die bereitgestellten Daten ausschließlich zur Anfertigung der Diplomarbeit zu nutzen.

Die Arbeit ist zweifach mit allen Anlagen in DIN A4 gebunden einzureichen. Ein Datenträger mit dem Diplomarbeitstext, Präsentationen, Simulationsmodellen sowie aller Rohdaten und deren Analysen ist beizulegen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin FELLENDORF

Tel. 0316 873 6220

[martin.FELLENDORF@tugraz.at](mailto:martin.FELLENDORF@tugraz.at)

Betreuer

Dipl.-Ing. Robert Neuhold

Tel. 0316 873 6724

[robert.neuhold@tugraz.at](mailto:robert.neuhold@tugraz.at)

Mitbetreuender Assistent

# Kurzfassung

## **Innerstädtische Verkehrsflussanalyse mittels GPS-Technologie**

157 Seiten, 100 Abbildungen, 26 Tabellen

Floating Car Data (FCD) sind mobil erfasste Daten von sich im Verkehr befindlichen Fahrzeugen. Dazu zählen auch GPS-Daten, deren zeitdiskrete Orts-, Zeit- und Geschwindigkeitsinformationen aus einzelnen im Verkehr mitschwimmenden Fahrzeugen als geeignete Datengrundlage für die Verkehrsflussanalyse identifiziert werden können. Das Ziel dieser Arbeit ist es, auf der mit Messfahrzeugen im Stadtgebiet von Graz gewonnenen Datenbasis in Verbindung mit stationär erhobenen Daten die Grundlagen für innerstädtische Verkehrsflussanalysen zu untersuchen und anzuwenden. Dabei liegt der Fokus nicht auf der Analyse von einzelnen Lichtsignalanlagen, einem wichtigen infrastruktureitigen Einfluss auf den innerstädtischen Verkehr, sondern in der Betrachtung von ganzen Streckenzügen, welche u.a. von den Lichtsignalanlagen beeinflusst werden.

Ortsinformationen dienen der Eingrenzung von aufgezeichneten Daten auf ein festgelegtes Untersuchungsgebiet. Orts- und Zeitinformation können in Geschwindigkeits- und in weiterer Folge in Beschleunigungsdaten transformiert werden, aus welchen fahrzeug- und streckenspezifische Kenngrößen ermittelt werden. Streckenunabhängige fahrdynamische Kenngrößen wie z.B. die mittlere Reisegeschwindigkeit ermöglichen dabei in der Analyse Vergleiche von unterschiedlichen Streckenzügen.

Zunächst werden die Datenakquisition und die Datenaufbereitung untersucht. Hier wird auf die grundlegende Problematik der Aufzeichnungsqualität im städtischen Bereich eingegangen. Für mäßig bebauten Stadtgebiet ohne Untertunnelung wird die Erfassung von GPS-Daten als unproblematisch und ausreichend genau eingestuft. Weiters werden Verfahren zur Hebung der Datenqualität im Postprocessing vorgestellt und angewendet, wobei der Schwerpunkt auf den Kalman-Filter gelegt wird. Die Auswirkungen des Aufzeichnungsintervalls auf fahrdynamische Kenngrößen wird ebenfalls untersucht, wobei der Unterschied von 10Hz bis 1Hz-Daten als vernachlässigbar eingestuft wird.

Bei der Analyse verschiedener Zeiträume während tageszeitabhängiger Signalprogramme auf unterschiedlichen Streckenzügen konnte für die Kenngröße Beschleunigungsrauschen, welche das Beschleunigungs- und Bremsverhalten beschreibt, eine Abhängigkeit zur straßenseitigen Infrastruktur in Form der Knotenpunktdichte festgestellt werden. Die gemeinsame Betrachtung weiterer Kenngrößen wie der mittleren Reisegeschwindigkeit und der Stillstandsanteile ermöglichen eine differenziertere Betrachtung des Verkehrsflusses hinsichtlich der Effizienz und der Homogenität, während der Congestion Index zur Bewertung der erzielten Geschwindigkeit herangezogen wird.

Zusätzlich zur Verkehrsflussanalyse auf Basis empirischer Realdaten wird ein Streckenzug in einem mikroskopischen Verkehrsflussmodell simuliert. Dabei wird ein Einfluss von Verkehrsmenge und Lichtsignalsteuerung festgestellt und in Sensitivitätsanalysen analysiert. Mit Hilfe der Simulation konnte ein benötigter Durchdringungsgrad von 2% bis 6% an Messfahrzeugen identifiziert werden, deren Daten den gesamten Verkehrsfluss auf einer Strecke ausreichend repräsentieren können. Dieser variiert jedoch stark je nach Verkehrsbelastung und Signalsteuerung und kann nicht allgemeingültig für verschiedene Streckenzüge bestimmt werden.

Mit der in dieser Arbeit angewendeten Methodik können Verkehrsflussanalysen im innerstädtischen Straßenverkehr durchgeführt bzw. um Kenngrößen aus mobiler Datenerfassung erweitert werden. Die maßgeblichen Schritte der Datenaufbereitung und -weiterverarbeitung können mit den entwickelten teilautomatisierten Skripten computergestützt durchgeführt werden.

# Abstract

## **Analysis of Urban Traffic Flow based on GPS data**

157 pages, 100 images, 26 tables

Floating Car Data (FCD) are data of vehicles parting in traffic flow. GPS data are part of FCD, providing time-discrete information such as position, time and current velocity. Since the vehicles are part of traffic, this information provides insight into the traffic flow. The aim of this thesis is to measure FCD and stationary information of traffic volume in the urban area of Graz and to prove their usability for urban traffic flow analysis. The focus is on the analysis of road sections, whose traffic flow is under considerable influence of a number of signalized intersections.

The position-related information is used for determining the proper data about the route section to be investigated. Position and time information can be used to get hold of velocity and, in a further step, acceleration data. In turn, these are being transformed into vehicle and road section-specific parameters. Distance-independent parameters such as travel velocity back up comparison analysis for different road sections.

First of all, the data acquisition and post-processing is examined. The signal quality in moderately built-up areas without underground passages can be regarded as unproblematic. For data processing there are some techniques provided to raise the data quality, focusing on the Kalman filter. The effects of different logging intervals are investigated too, concluding in negligibility of the difference of 10Hz to 1Hz logged data.

By analyzing the data gathered during different time periods whilst changing traffic signalization on varying road sections, a dependence of the acceleration noise on the sections' intersection density was detected. A combined examination of further parameters such as the mean travel velocity and idling ratio allows a more differentiated analysis of traffic flow concerning efficiency and homogeneity, whilst the congestion index can be used to evaluate the travel velocity.

In addition to the analysis of empirical data, a road section is simulated in a microscopic traffic flow model. Doing so, the influence of traffic volume and traffic signal operation is detected and investigated in a sensitivity analysis. In order to represent the traffic flow of a road section, a saturation rate of 2% to 6% of measurement vehicles is determined by means of the simulation. This rate varies considerably according to traffic volume and traffic light signalization and cannot be determined as a generalization for different road sections.

The methodology applied can be used for traffic flow analysis in urban areas or rather to 'upgrade' them. The relevant steps of data preparation and processing can be conducted with the specifically developed and mostly automated IT scripts.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>i</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>iii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>vi</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>vii</b>
<b>1 Motivation und Ziele der Arbeit</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Beschreibung des Verkehrsablaufs</b> .....	<b>2</b>
2.1 Kenngrößen des Verkehrsablaufs.....	5
2.2 Lokale Datenerhebung.....	8
2.3 Charakteristika des innerstädtischen Verkehrsablaufs.....	9
<b>3 Kenngrößen aus streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten</b> .....	<b>12</b>
3.1 Steuerungsrelevante Kenngrößen.....	13
3.2 Kenngrößen für die Effizienz des Verkehrsflusses.....	14
3.3 Weitere Kenngrößen aus streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten.....	16
3.4 Vergleich lokaler und streckenbezogener Kenngrößen.....	20
<b>4 Erfassung und Aufbereitung streckenbezogener Einzelfahrzeugdaten</b> .....	<b>21</b>
4.1 Die GPS-Technologie und Datenqualität.....	21
4.2 Beschleunigung und Distanz aus Geschwindigkeitswerten.....	24
4.3 Glättung der Datenreihen.....	26
4.3.1 Statistische Glättungsverfahren.....	26
4.3.2 Der Kalman-Filter.....	28
4.3.3 Einfluss von Glättungsmethoden.....	31
4.4 GPS-Verfügbarkeit.....	36
4.4.1 Auswirkung von Signalverlusten auf Geschwindigkeit und Beschleunigung.....	37
4.4.2 Kalman-Filter bei Signalverlusten.....	40
4.4.3 Zusammenfassung.....	43
4.5 Einfluss des Aufzeichnungsintervalls.....	45
4.5.1 Einfluss auf die Datenmenge.....	45
4.5.2 Einfluss auf ermittelte Kenngrößen.....	46
4.5.3 Beurteilung des Einflusses des Aufzeichnungsintervalls.....	50
4.6 Stichprobengröße bei streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten.....	50
4.7 Zusammenfassung.....	53
<b>5 Empirische Erhebung streckenbezogener Einzelfahrzeugdaten</b> .....	<b>54</b>
5.1 Datenaufnahme und Untersuchungsgebiet.....	56
5.1.1 Visuelle Datenprüfung.....	59
5.1.2 Untersuchung der Signalverluste.....	60
5.1.3 Glättung der Geschwindigkeitsprofile.....	61

5.1.4	Splitten der Trajektorien .....	62
5.2	Berechnung und Überprüfung der Kenngrößen .....	63
5.3	Abhängigkeiten zwischen fahrdynamischen Kenngrößen .....	65
5.4	Kenngrößenauswahl für die Datenanalyse .....	67
<b>6</b>	<b>Auswertung der realen streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten .....</b>	<b>70</b>
6.1	Voruntersuchung .....	70
6.1.1	Reisezeiten und Verkehrsbelastung .....	70
6.1.2	Einschränkung des Testgebiets .....	73
6.2	Analyse einzelner Streckenzüge .....	75
6.2.1	Exemplarische Detailanalyse Wiener Straße .....	75
6.2.2	Analyse der weiteren Untersuchungsgebiete .....	80
6.3	Vergleichsanalyse am Untersuchungsgebiet Wiener Straße .....	83
6.4	Analyse von Geschwindigkeitsprofilen .....	85
<b>7</b>	<b>Auswertung simulationsbasierter Einzelfahrzeugdaten .....</b>	<b>89</b>
7.1	Grundlagen Mikroskopische Simulation .....	89
7.1.1	Aufbau der Mikrosimulation .....	90
7.1.2	Simulationsdurchführung und Datenausgabe in VISSIM .....	91
7.2	Datenaufbereitung des Simulationsoutputs .....	92
7.3	Sensitivitätsanalyse .....	94
7.3.1	Einfluss der Verkehrsmenge .....	94
7.3.2	Einfluss der Signalsteuerung .....	101
7.3.3	Einfluss des Fahrzeugfolgeverhaltens .....	107
7.4	Bestimmung des erforderlichen Durchdringungsgrades .....	111
7.5	Erkenntnisse der simulationsbasierten Kenngrößenanalyse .....	116
<b>8</b>	<b>Vergleich der simulierten mit gemessenen Trajektorien .....</b>	<b>117</b>
8.1	Einschränkungen für den Datenvergleich .....	117
8.2	Kenngrößenausprägungen im Vergleich .....	119
8.3	Zusammenfassung .....	122
<b>9</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>125</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>129</b>
	<b>Anhang A: Testfeld und Realdatenauswertung .....</b>	<b>133</b>
	<b>Anhang B: Kenngrößenänderung Messung 1 – Messung 2 .....</b>	<b>143</b>
	<b>Anhang C: Simulation .....</b>	<b>147</b>
	<b>Anhang D: Digitale Medien .....</b>	<b>157</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einflüsse auf den Verkehrsablauf (SCHICK, 2003).....	3
Abbildung 2: Verkehrsstärke-Ganglinie in unterschiedlichen Zeitintervallen (SCHICK, 2003).....	4
Abbildung 3: Erfassung von Verkehrskenngrößen der freien Strecke (SCHNABEL&LOHSE, 2011).....	4
Abbildung 4: Brutto- und Nettolücken im Fahrzeugstrom (SCHNABEL&LOHSE 2011) .....	7
Abbildung 5: Fundamentaldiagramm mit empirisch erhobenen 1-Minuten-Daten (SCHICK, 2003) .....	9
Abbildung 6: Reale Fahrzeugtrajektorien (BOLTZE et al., 2010) .....	10
Abbildung 7: Erhebungsmethoden von Verkehrsdaten innerstädtisch (BOLTZE et al., 2010).....	10
Abbildung 8: Zeit-Weg-Diagramm der einzelnen Fahrzeuge eines Fahrzeugstroms reproduziert aus Luftaufnahmen (LEUTZBACH, 1988) .....	12
Abbildung 9: Kinematische Zusammenhänge (Fellendorf, 2009) .....	13
Abbildung 10: Die 4 Fahrmodi bei signalisierten Knotenpunkten unter der Kapazitätsgrenze (MATZOROS&VAN VLIET, 1991).....	17
Abbildung 11: Ortungsfehler innerstädtisch (KOJIMA et al., 2012) .....	22
Abbildung 12: Empfang der vom Satelliten abgestrahlten Wellen (MANSFELD, 2010): reflektierte Welle (a); direkte Welle und reflektierte Welle (b).....	23
Abbildung 13: Diagrammdarstellung der Bewegung (SCHNABEL&LOHSE, 2011).....	24
Abbildung 14: Zuordnung von Beschleunigungs- zu Geschwindigkeitswerten.....	25
Abbildung 15: Der permanente diskrete Kalman-Filter-Zyklus (WELCH&BISHOP, 2001) .....	29
Abbildung 16: Bestimmung des a posteriori Schätzwerts (FARAGHER, 2012).....	29
Abbildung 17: zugeordnete Beschleunigungen.....	31
Abbildung 18: Versuchstrajektorie 10Hz (Data-Logger: Racelogic VideoVBOX, siehe Anhang).....	32
Abbildung 19: Geschwindigkeits- und Beschleunigungstrajektorien im Vergleich .....	32
Abbildung 20: Arithmetisches Mittel von Beschleunigungen I .....	33
Abbildung 21: Arithmetisches Mittel von Beschleunigungen II .....	34
Abbildung 22: Geschwindigkeits- und daraus berechnete Beschleunigungstrajektorie: Behandlung von Signalverlust (Sekunde 30 bis 90) .....	38
Abbildung 23: Vergleich von verschiedenen Verfahren zur Behandlung von Datenlücken.....	40
Abbildung 24: Angewendeter KALMAN-Filter – Ausschnitt (VBOXTools, 2003); Original-Trajektorie (a); Trajektorie mit Kalman-Filter geglättet (Speed + Position) (b) .....	41
Abbildung 25: Ausschnitt einer Trajektorie, mit Kalman-Filter geglättet (Speed) .....	42
Abbildung 26: Einfluss des Kalman-Filters bei einem Signalverlust – ganze Trajektorie (VBOXTools, 2003); Original-Trajektorie (a); Trajektorie mit Kalman-Filter geglättet (b) .....	42
Abbildung 27: Vergleich der Geschwindigkeitsganglinie zweier GPS-Logger (VBOXTools, 2003).....	44
Abbildung 28: Verortung von Logging-Punkten unterschiedlicher Aufzeichnungsraten .....	45
Abbildung 29: Abstand von Datenpunkten je Aufzeichnungsintervall.....	46
Abbildung 30: Kenngrößenverhältnis je Logging-Intervall: Reisezeit.....	48
Abbildung 31: Kenngrößenverhältnis je Logging-Intervall: Beschleunigungsrauschen (a) und Mean Velocity Gradient (b).....	49
Abbildung 32: Fahrzeugtrajektorie während der drei Phasen des Verkehrsflusses (REHBORN et al., 2012) .....	52
Abbildung 33: Phasenänderung im ASDA/FOTO-Modell aus Schleifendetektoren (a) und Einzelfahrzeugdaten (b) (REHBORN et al., 2012).....	52
Abbildung 34: ASDA/FOTO-Modell: Stau-Rekonstruktion aus Schleifendetektoren und FCD (REHBORN et al., 2012) .....	53
Abbildung 35: Skripte und Ablauf des Realdatenpostprocessings.....	55

Abbildung 36: Untersuchungsgebiet im Stadtgebiet von Graz (Google Earth) .....	56
Abbildung 37: Drift der Positionsdaten bei Stillstand (VBOXTools, 2003) .....	60
Abbildung 38: Signalverluste Triester Straße, Signalprogramm Nacht .....	61
Abbildung 39: Geglättete Geschwindigkeitsganglinie bei kurzfristigem Signalausfall (VBOXTools, 2003) ..	61
Abbildung 40: Splitten von Trajektorien .....	62
Abbildung 41: Boxplot der Reisedistanzen Wienerstraße, Fahrtrichtung Nord (Messung 1) .....	64
Abbildung 42: Vergleich Reisegeschwindigkeit - Mean Velocity Gradient.....	65
Abbildung 43: Vergleich Anteil der Stillstandszeiten - Congestion Index .....	66
Abbildung 44: Abhängigkeit Anteilskenngößen und mittlere Geschwindigkeit .....	66
Abbildung 45: Vergleich Mittlere Reisegeschwindigkeit - Congestion Index .....	67
Abbildung 46: Vergleich Beschleunigungsrauschen - Reisegeschwindigkeit .....	67
Abbildung 47: Voruntersuchung: Boxplot Reisezeiten.....	71
Abbildung 48: Verkehrsbelastungen und Reisezeiten Wienerstraße, Fahrtrichtung Nord.....	72
Abbildung 49: Zeit-Weg-Diagramm Wienerstraße, Fahrtrichtung Nord (Messung 1) .....	73
Abbildung 50: Auswirkung der Berücksichtigung der ersten Lichtsignalanlage eines Steuerungsgebietes (Messung 2).....	74
Abbildung 51: Splitten des Steuergebiets Wienerstraße, nördliche Begrenzung .....	75
Abbildung 52: Verkehrsbelastung Wiener Straße, Fahrtrichtung Nord, Messung 1 .....	76
Abbildung 53: Reisezeiten Wiener Straße, Fahrtrichtung Nord, Messung 1.....	76
Abbildung 54: Zeit-Weg-Diagramm Wiener Straße Nord: Abend- (a) und Nachtprogramm (b) .....	77
Abbildung 55: Reisezeit - Anzahl der Halte (Wiener Straße, Fahrtrichtung Nord).....	77
Abbildung 56: Verkehrsbelastung - Anzahl der Halte (Wiener Straße, Fahrtrichtung Nord) .....	77
Abbildung 57: Beschleunigungsverlauf im innerstädtischen Gebiet (Fahrtrichtung Nord); geringe (a) und hohe (b) Verkehrsbelastung (ArcGIS) .....	80
Abbildung 58: Ganglinie der Verkehrsbelastung Wiener Straße: Messung 1 (a) und Messung 2 (b) .....	83
Abbildung 59: Mittelwerte der Reisezeiten (a) und des Beschleunigungsrauschens (b): Wiener Straße, Fahrtrichtung Süd, Messungen 1 und 2 .....	84
Abbildung 60: Mittelwerte der Reisezeiten (a) und des Beschleunigungsrauschens (b): Wiener Straße, Fahrtrichtung Nord, Messungen 1 und 2 .....	85
Abbildung 61: Geschwindigkeitsprofile Wiener Straße Süd, Signalprogramm Morgen .....	85
Abbildung 62: Zeit-Weg-Diagramm Wiener Straße Süd, Signalprogramm Morgen .....	86
Abbildung 63: Geschwindigkeitsprofile Wiener Straße Süd, Signalprogramm Nacht.....	86
Abbildung 64: Zeit-Weg-Diagramm Wiener Straße Süd, Signalprogramm Nacht.....	87
Abbildung 65: Geschwindigkeitsprofile Schönaugürtel Süd, Signalprogramm Nacht.....	87
Abbildung 66: Zeit-Weg-Diagramm Schönaugürtel Süd, Signalprogramm Abend.....	88
Abbildung 67: Simulierter Streckenzug (VISSIM) mit Längeninformationen und Simulationsdaten .....	91
Abbildung 68: Screenshot der VLSA 301 (VISSIM).....	91
Abbildung 69: Skripte und Ablauf des Simulationsdatenpostprocessings .....	93
Abbildung 70: Mittlere Geschwindigkeitsparameter bei steigender Verkehrsbelastung.....	94
Abbildung 71: Congestion Index (a) und reale Verkehrsmenge (b) bei steigender Verkehrsbelastung .....	95
Abbildung 72: Kenngrößenänderung bei steigender Belastung: mittl. Reisegeschwindigkeit (a), Idling Mode (b).....	96
Abbildung 73: Mittlere Anteilsparameter bei steigender Verkehrsbelastung .....	97
Abbildung 74: Kenngrößenänderung bei steigender Belastung: mittlere Geschwindigkeit-Idling Mode (a) und mittlere Geschwindigkeit-Beschleunigungsrauschen (b) .....	97
Abbildung 75: Mittlere Reisegeschwindigkeit und mittleres Beschleunigungsrauschen in Abhängigkeit von der Verkehrsmenge.....	100

Abbildung 76: Mittlerer Stillstandsanteil und mittlerer Congestion Index in Abhängigkeit von der Verkehrsmenge .....	100
Abbildung 77: Mittlere Geschwindigkeitsparameter bei unterbrochener Grüner Welle .....	101
Abbildung 78: Kenngrößenänderung bei unterbrochener Grüner Welle: mittlere Geschwindigkeit – Q; Versatz +10 Sekunden (a) – Versatz +40 Sekunden (b).....	103
Abbildung 79: Congestion Index bei unterbrochener Grüner Welle.....	103
Abbildung 80: Mittlere Anteilsparameter bei unterbrochener Grüner Welle .....	104
Abbildung 81: Kenngrößenänderung bei unterbrochener Grüner Welle: mittlere Geschwindigkeit- Stillstandsanteile (Idling Mode) .....	104
Abbildung 82: Mittleres Beschleunigungsrauschen bei unterbrochener grüner Welle.....	105
Abbildung 83: Kenngrößenänderung bei unterbrochener Grüner Welle: mittlere Geschwindigkeit – Beschleunigungsrauschen; Versatz +20 Sekunden (a) – Versatz +40 Sekunden (b).....	106
Abbildung 84: Fahrzeugfolgemodell nach WIEDEMANN (1974).....	107
Abbildung 85: Geschwindigkeitsparameter (a) und Verkehrsnachfrage (b) bei verändertem Modell des Fahrzeugfolgeverhaltens.....	108
Abbildung 86: Kenngrößenänderung bei unterschiedlichen Fahrverhaltensmodellen: mittlere Geschwindigkeit (a) und Stillstandszeiten (b) in Abhängigkeit der Verkehrsstärke .....	109
Abbildung 87: Kenngrößenänderung bei unterschiedlichem Fahrverhalten: mittlere Geschwindigkeit in Abhängigkeit von Beschleunigungsrauschen (a) und Stillstandsanteil (b).....	109
Abbildung 88: Beschleunigungsrauschen (a) und Anteilsparameter (b) bei verändertem Modell des Fahrzeugfolgeverhaltens.....	110
Abbildung 89: Dichteverteilungen: mittlere Reisegeschwindigkeit (a), Beschleunigungsrauschen (b), Stillstandsanteile (c), Congestion Index (d).....	112
Abbildung 90: Mittlere Reisezeiten bei steigender Verkehrsbelastung.....	115
Abbildung 91: Ganglinie der realen Verkehrsbelastung (a) und Boxplot der realen und simulierten Verkehrsbelastungen (b).....	117
Abbildung 92: Boxplot der Verkehrsbelastungen .....	118
Abbildung 93: mittlere Reisegeschwindigkeit real und simuliert: Scatterplot(a), Boxplot(b), Datenblatt(c) .....	119
Abbildung 94: Beschleunigungsrauschen real und simuliert: Scatterplot(a), Boxplot(b), Datenblatt(c) ...	120
Abbildung 95: Scatterplot von Beschleunigungsrauschen und Reisegeschwindigkeit real und simuliert .	121
Abbildung 96: Stillstandsanteile real und simuliert: Scatterplot(a), Boxplot(b), Datenblatt(c) .....	121
Abbildung 97: Scatterplot von Stillstandsanteilen und Reisegeschwindigkeit real und simuliert .....	122
Abbildung 98: Untersuchungsgebiet Schönaugürtel (SG_70) .....	134
Abbildung 99: Untersuchungsgebiet Wiener Straße (SG_30) .....	134
Abbildung 100: Untersuchungsgebiet Triesterstraße (SG_41) .....	134

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Einflüsse auf die Kapazität (SCHNABEL&LOHSE, 2011).....	5
Tabelle 2:	Klassische Kenngrößen der Verkehrsflussanalyse .....	8
Tabelle 3:	Klassifizierung von Erhebungsmethoden (BOLTZE et al., 2010) .....	11
Tabelle 4:	Definition der Fahrbereiche (ERICSSON, 2001).....	17
Tabelle 5:	Fahrparameter nach HUNG et al. (2005), WANG et al. (2008) .....	18
Tabelle 6:	Klassische und streckenbezogene Kenngrößen .....	20
Tabelle 7:	Auswirkung von verschiedenen Logging-Intervallen und Mittelungsmethoden auf Geschwindigkeit und Beschleunigung .....	35
Tabelle 8:	Theoretischer Abstand [m] von gemessenen Datenpunkten bei verschiedenen Geschwindigkeiten .....	46
Tabelle 9:	Umrechnungsfaktoren der Kenngrößen je Aufzeichnungsrate .....	47
Tabelle 10:	Empfehlung der erforderlichen Stichprobengröße (BOLTZE et al., 2010) .....	51
Tabelle 11:	Protokoll Messfahrten Graz .....	58
Tabelle 12:	Untersuchungsgebiete .....	59
Tabelle 13:	Variable aus den Messdaten.....	63
Tabelle 14:	Kennwerte für die gemessenen Distanzen je Untersuchungsgebiet und Fahrtrichtung (Werte vor Einschränkung des Testgebiets, siehe Unterabschnitt 6.1.2).....	65
Tabelle 15:	Ausgewählte Kenngrößen und Berechnungsweise in R (vereinfacht) .....	68
Tabelle 16:	Datenblatt Wiener Straße (SG_30), Fahrtrichtung Nord, Messung 1 .....	78
Tabelle 17:	Tagesmittel des Beschleunigungsrauschens je Untersuchungsgebiet.....	82
Tabelle 18:	Mittelwerte der Kenngrößen aus stationärer und mobiler Messdatenerhebung (Messung 1) und prozentuelle Veränderung (Messung 2): Untersuchungsgebiet Wiener Straße, Fahrtrichtung Süd .....	84
Tabelle 19:	Parameteränderung bei steigender Verkehrsbelastung.....	99
Tabelle 20:	relative Parameteränderung (Mittelwerte) bei variabler Verkehrsbelastung.....	99
Tabelle 21:	Parameteränderung bei Versatz des Grünbandes.....	106
Tabelle 22:	Kenngrößenausprägungen für verschiedene Fahrverhaltensparameter.....	110
Tabelle 23:	Genauigkeitsfaktor k für verschiedene Verteilungen bei normalverteilten Größen und zweiseitiger Entscheidung (SCHNABEL&LOHSE, 2011) .....	111
Tabelle 24:	erforderliche Stichprobengrößen bei variierender statistischer Sicherheit .....	113
Tabelle 25:	Repräsentativität der Kenngrößen bei Datenerhebung mit zwei Messfahrzeugen .....	115
Tabelle 26:	Datenbasis für Vergleich Messfahrten - Simulation.....	118

## Abkürzungen

GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System (offiziell: NAVSTAR GPS)
DOP	Dilution of Precision (Kenngröße für die Qualität satellitengestützter Verortung)
FCD	Floating Car Data
ACN	Beschleunigungsrauschen, engl. Acceleration Noise
MVG	Mittlerer Geschwindigkeitsgradient, engl. Mean Velocity Gradient
Idling Mode	Anteil der Stillstandszeiten bzw. Stillstandsanteil an der gesamten Fahrzeit
mph	Geschwindigkeitseinheit (engl. „Miles per Hour“): 1 [mph] $\approx$ 1,61 [km/h]
Scatter-Plot	Punktwolkendiagramm



# 1 Motivation und Ziele der Arbeit

Die herkömmliche, stationäre Verkehrsdatenerhebung erzeugt punktuelle Aufnahmen des Verkehrs. Sie erfolgt manuell (z.B. Verkehrszählung mit Strichlisten) oder automatisiert (z.B. Verkehrszählung mit Induktionsschleifen), ist jedoch an einen bestimmten Ort gebunden. Da im innerstädtischen Bereich viele Störungen durch signalisierte und nicht signalisierte Knotenpunkte den Verkehr maßgeblich beeinflussen und somit einen stark wechselnden Verkehrsfluss hervorrufen, sind klassisch erhobene Verkehrsdaten nur bedingt geeignet, um den Verkehrsfluss zu beschreiben. Im Gegensatz dazu können durch Floating Car Data (FCD) Informationen über einen ganzen Streckenzug oder selbst über ein ganzes Streckennetz gewonnen werden. Dabei dienen im Verkehr mitschwimmende Fahrzeuge als Messsonden, deren in äquidistanten Zeitintervallen gemessene Geschwindigkeitswerte herangezogen werden können für die Bildung von fahrdynamischen Kenngrößen. Eine einfache und praktikable Technologie zur mobilen Datenerhebung von Einzelfahrzeugdaten ist GNSS (Global Navigation Satellite System), welche satellitenbasiert Positions- und Geschwindigkeitsinformationen zur Verfügung stellen kann. Durch die Verwendung relativ einfacher Messgeräte (bestehend aus Empfangseinheit bzw. Antenne und der Logging-Einheit, welcher die satellitenbasierten Rohdaten in Geschwindigkeits-, Zeit- und Ortsinformationen umwandelt und speichert oder sendet) können diese fahrdynamischen Kenngrößen bestimmt werden. Da der Messaufbau im Gegensatz zur stationären Datenerhebung sehr einfach erfolgen kann (Anbringen eines GPS-Aufzeichnungssystems an einem Messfahrzeug) und an beliebigen Stellen des Verkehrsnetzes eingesetzt werden kann, stellt die mobile Datenerhebung eine sehr flexible und kostengünstige Variante für die gezielte Verkehrsdatenerfassung dar.

Ziel dieser Arbeit ist es, fahrdynamische Kenngrößen zur Erweiterung der klassischen Verkehrsflussanalyse zu bestimmen und hinsichtlich des innerstädtischen Verkehrsflusses zu untersuchen. Dabei soll einerseits die Variante der Verwendung von Realdaten aus einem im Verkehrsfluss mitschwimmenden Fahrzeug (streckenbezogene Einzelfahrzeugdaten) untersucht werden, andererseits erfolgt eine Untersuchung an einem Verkehrsmodell, welches die Erfassung aller Fahrzeuge erlaubt. Dabei soll der Einfluss der Verkehrsmenge und der Lichtsignalsteuerung auf ausgewählte fahrdynamische Kenngrößen getestet werden, sowie die Repräsentativität von einzelnen Messfahrzeugen im Verkehrsstrom untersucht werden.

Im zweiten Kapitel dieser Arbeit werden der Verkehrsablauf und seine klassischen Kenngrößen beschrieben. Das dritte Kapitel widmet sich fahrdynamischen Kenngrößen, welche aus streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten gewonnen werden können. In Kapitel vier wird auf die Datengewinnung von streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten eingegangen. Dabei wird auf die Ermittlung von Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufen (Trajektorien), ihre Glättung, die Verfügbarkeit von Satelliteninformationen, die Logging-Frequenz und die Stichprobengröße eingegangen. Anschließend werden in Kapitel 5 auf Basis dieser Erkenntnisse in einem Testfeld erhobene Realdaten herangezogen, um daraus fahrdynamische Kenngrößen zu bestimmen. In Kapitel 6 werden diese gemeinsam mit klassischen, stationären Daten (Verkehrsmenge) analysiert. Zuletzt erfolgt in Kapitel 7 ein Simulationsaufbau, durch welchen ein Streckenzug abstrahiert dargestellt wird, um die Repräsentativität eines einzelnen Messfahrzeugs zu prüfen, und um ausgewählte fahrdynamische Kenngrößen einer Sensitivitätsanalyse hinsichtlich Verkehrsmenge und Lichtsignalsteuerung zu unterziehen. Abschließend werden die Daten aus Realdatenerhebung und Simulation in Kapitel 8 verglichen und in Kapitel 0 ein Fazit gezogen.

## 2 Beschreibung des Verkehrsablaufs

Als Verkehrsfluss wird die Bewegung der *Gesamtheit der sich bewegenden Fahrzeugeinheiten* definiert, wobei diese Gesamtheit als Verkehrsstrom bezeichnet wird (SCHNABEL&LOHSE, 2011)

Im Gegensatz zum Verkehrsfluss kann unter dem Begriff des Verkehrsablaufs *die Gesamtheit der zeitlichen und räumlichen Abwicklung der Verkehrs- und Bewegungsvorgänge auf den Straßenverkehrsflächen* verstanden werden. Dies sind zum Beispiel Fahren, Beschleunigen, Bremsen, Anhalten, aber auch Überholen, Einfädeln etc.

Der Verkehrsablauf wird durch die Gesamtheit der Verkehrsteilnehmer eingeschränkt. Das heißt, dass neben den physikalischen Einschränkungen (z.B. Abhängigkeit der maximalen Beschleunigung von Motorisierung und Kraftschluss über die Fahrbahnreibung) Limitierungen vor Allem durch die gegenseitige Beeinflussung von Nutzern der Verkehrsinfrastruktur existieren. Das Verhalten des einzelnen Verkehrsteilnehmers selbst wird wiederum durch eine *Vielzahl von Faktoren (z.B. Witterung, Verkehrsvorschriften, Verkehrslage)* beeinflusst. Das Resultat dieser vielseitigen Wechselwirkungen ist der **Verkehrsfluss**.

Grundsätzlich kann eine Verkehrsflussanalyse auf zwei sich stark unterscheidende Bereiche angewendet werden, nämlich auf das hochrangige und das niederrangige Straßennetz.

Strecken des hochrangigen Straßennetzes sind durch die begrenzte Anzahl von Zu- und Abfahrtmöglichkeiten und die gleichmäßige geometrische Ausführung (Über viele Kilometer dieselbe Fahrstreifenanzahl und Querschnittsaufbau) vergleichsweise homogen. Am niederrangigen Straßennetz und insbesondere im städtischen Bereich trifft man auf eine große Anzahl unterschiedlich ausgeführter Straßen, um ihren verschiedenen Anforderungen und Funktionen (Verbindung, Erschließung, Aufenthalt) (FELLENDORF, 2011) gerecht zu werden. Außerdem führen geregelte und nicht geregelte Knotenpunkte, aber auch Zu- und Ausfahrten von Parkplätzen oder Standstreifen zu einem sich dynamisch verändernden Verkehrsfluss, welcher schwer zu beschreiben und zu klassifizieren ist. Eine Beschreibung des Verkehrsflusses auf Basis von querschnittsbezogenen Daten ist aber nur je an einzelnen Punkten, z.B. durch Bestimmung der Verkehrsmenge und Geschwindigkeiten, möglich, wobei durch die Verknüpfung von einzelnen lokalen Messungen auch Informationen über dazwischenliegende Strecken gewonnen werden können (z. B. Reisezeiten).

Um die vielen verschiedenen Eigenschaften von Strecken und Knotenpunkten im niederrangigen Straßennetz zu erfassen, werden diese in der Literatur einzeln betrachtet. Im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS, 2001) erfolgt neben den Autobahnabschnitten außerhalb der Knotenpunkte eine Einteilung in planfreie Knotenpunkte, Streckenabschnitte von zweistreifigen Landstraßen, Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage, Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage, Streckenabschnitte von Hauptverkehrsstraßen und weiteren Kapiteln für den öffentlichen, Fahrrad- und Fußgängerverkehr. Einteilungen dieser Art sind von Nöten, da der Verkehrsablauf von Wegbedingungen (baulich und betrieblich) und zeitlich variablen Umfeld- und Verkehrsbedingungen (Helligkeit, Witterung und Fahrbahn bzw. Fahrerkollektiv und Fahrzeugkollektiv) beeinflusst wird (siehe Abbildung 1). Folglich können Streckenzüge in sich oder untereinander, aber für ähnliche Weg-, Umfeld- und Verkehrsbedingungen analysiert werden.

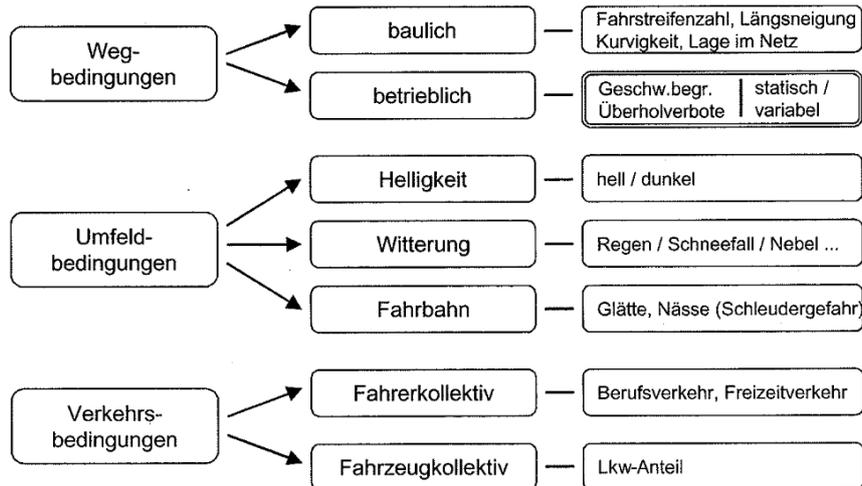


Abbildung 1: Einflüsse auf den Verkehrsablauf (SCHICK, 2003)

In diesem Kapitel werden Eigenschaften des Verkehrsablaufs beschrieben, welche in den Werken von SCHNABEL&LOHSE (2011), SCHICK (2003) und BRILON&PONZLET (1996) angeführt werden. Sie lassen sich auf die Erhebung von Messdaten der Geschwindigkeit von vielen Einzelfahrzeugen, sowie ihrer zeitlichen und örtlichen Zuordnung zurückführen. Bestimmte Kenngrößen, welche keine Informationen über die Geschwindigkeit benötigen, können zudem nur über die Belegung (Zählung) erhoben werden.

Es lassen sich folgende allgemeine Kenngrößen des Verkehrsstroms von einem äußeren Betrachter beobachten:

- die Verkehrsstärke oder Intensität,
- die Dichte oder Konzentration,
- die Geschwindigkeit,
- die zeitlichen Abstände der Fahrzeuge untereinander (Zeitlücken) und
- die räumlichen Abstände zwischen den Fahrzeugen (Weglücken, meist als Raumlücken bezeichnet).

Diese Kenngrößen können in **mikroskopische** und **makroskopische Kenngrößen** eingeteilt werden, wobei die mikroskopischen Größen das Fahrverhalten einzelner Fahrzeuge betrachten, makroskopische den Verkehrsstrom in seiner Gesamtheit unter Berücksichtigung seiner stochastischen Eigenschaften. Makroskopische Kenngrößen können aus mikroskopischen durch Mittelung (z.B. der Geschwindigkeiten) oder Addition (z.B. Summe der Fahrzeuge) bestimmt werden. Für die Bestimmung von makroskopischen Kenngrößen muss entsprechend der Erfordernisse ein **zeitliches Bezugsintervall** definiert werden, für welches die Kenngrößen bestimmt werden.

In Abbildung 2 ist ersichtlich, dass kleinere Aggregationsintervalle den Verkehrszustand detaillierter abbilden (größte Ausprägung von Maxima und Minima bei Aggregationsintervall von einer Minute), wohingegen bei höheren Aggregationsintervallen Spitzen und somit kurzzeitige Effekte geglättet werden. Häufig werden Intervalle von einer Stunde gewählt, um eine gute statistische Absicherung gegen zufällige Schwankungen im Verkehrsfluss zu erreichen (Schick, 2003). Kleinere Intervalle erlauben hingegen die Betrachtung von kurzzeitigen Effekten, wie z.B. kurzfristige Änderungen der Geschwindigkeiten aufgrund einer Geschwindigkeitsbeschränkung an einer Verkehrsbeeinflussungsanlage.

## Beschreibung des Verkehrsablaufs

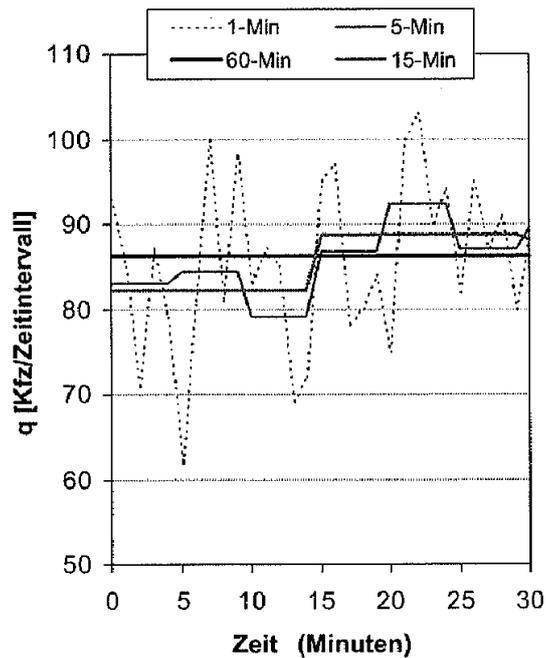


Abbildung 2: Verkehrsstärke-Ganglinie in unterschiedlichen Zeitintervallen (SCHICK, 2003)

Eine weitere Unterscheidung kann hinsichtlich **lokaler und momentaner Datenerfassung** getroffen werden. Lokale Datenerhebung bedeutet, dass die Daten an einem bestimmten Messquerschnitt  $i$  (siehe Abbildung 3) während der Zeitdauer  $\Delta T$  erhoben werden. Dazu zählen nach SCHNABEL&LOHSE (2011) die Verkehrsstärke, Zeitlücken und die lokale Geschwindigkeit. In der Praxis erfolgen lokale Datenerhebungen z.B. durch in die Fahrbahn eingelassene Induktionsschleifen und durch Sensoren, welche seitlich oder über dem lichten Raums einer Straße angebracht werden. Momentane Datenerhebung bedeutet, dass die Daten zu einem festen Zeitpunkt  $t$  auf einem betrachteten Streckenabschnitt  $S$  (siehe Abbildung 3) erhoben werden. Daten dieser Art werden aus lokalen Messungen abgeleitet oder durch Videosysteme erhoben, erfasste Kenngrößen sind Dichte, Abstände und die momentane Geschwindigkeit.

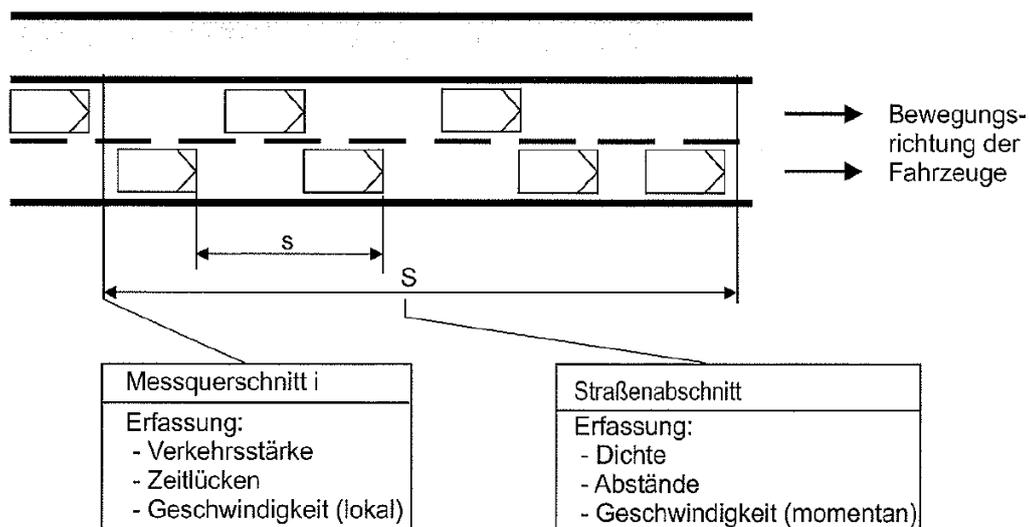


Abbildung 3: Erfassung von Verkehrskenngrößen der freien Strecke (SCHNABEL&LOHSE, 2011)

## 2.1 Kenngrößen des Verkehrsablaufs

Nachfolgend werden in Anlehnung an SCHNABEL&LOHSE (2011) Kenngrößen aufgeführt, welche im Gegensatz zu streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten (Kapitel 3) durch ortsfeste lokale oder momentane Datenerfassung gewonnen werden können.

### Verkehrsstärke

Die Verkehrsstärke  $q$  ergibt sich aus dem Quotienten aus der Anzahl der Fahrzeuge  $N$  und der Zeitspanne  $T$ , während der die Fahrzeuge den Beobachtungsquerschnitt durchfahren.

$$q = \frac{N}{T} \quad [\text{Kfz/h}] \quad (1)$$

### Auslastungsgrad

Nach SCHNABEL&LOHSE (2011) ist der Auslastungsgrad  $a$  der Quotient aus der vorhandenen Verkehrsstärke  $q$  und der Kapazität  $C$ .

$$a = \frac{q}{C} \quad [\%] \quad (2)$$

Die Kapazität ist laut Definition die „größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom bei gegebenen Weg- und Verkehrsbedingungen an dem für ihn bestimmten Querschnitt erreichen kann“ (FGSV, 2001). Die Bestimmung der Kapazität teilt GEISTEFELDT (2007) in die konventionelle Betrachtungsweise mit einem konstanten Wert als Kapazitätsgrenze (Scheitelpunkt der  $q$ - $v$ -Kurve) und in stochastische Ansätze ein, welche auf dem Gebiet der Verkehrsflussanalyse und der Verkehrsflussmodellierung zu verfolgen sind. Die Kapazität wird dabei ob ihrer erheblichen Variation unabhängig von systematischen Einflüssen als Zufallsgröße aufgefasst. Von den Anlageverhältnissen unabhängige statische oder variable Kapazitätsgrenzen werden von gültigen Regelwerken wie zum Beispiel dem deutsche Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen *HBS* (HBS 2001) oder dem amerikanische *Highway Capacity Manual* (HCM 2000) verwendet, was unter dem Gesichtspunkt der Bemessung vertretbar ist.

Es gibt verschiedene Bedingungen, welche sich auf die Kapazität und somit auf den Verkehrsfluss auswirken, die grob in bauliche, verkehrliche und sonstige Bedingungen eingeteilt werden können (siehe Tabelle 1).

**Tabelle 1: Einflüsse auf die Kapazität (SCHNABEL&LOHSE, 2011)**

<b>Bauliche Bedingungen</b>
Fahrstreifenbreite, Anzahl der Fahrstreifen, Querschnittsgestaltung (z.B. Richtungstrennung durch Mittelstreifen, Standspuren usw.), seitliche Hindernisse, Hochborde am Fahrbahnrand, Fahrbahnzustand, Sicht, Neigung, Kurvenabmesser
<b>Verkehrliche Bedingungen</b>
Verkehrsmischung, Fahreigenschaften der Fahrzeuge, Verkehrsart, Fahrgewohnheiten
<b>Sonstige Bedingungen</b>
Rechtliche Bestimmungen (zulässige Geschwindigkeiten), Witterung, Tageszeit, Wochentag, Jahreszeit

### Verkehrsdichte

Die Verkehrsdichte wird nach SCHNABEL&LOHSE (2011) durch den Quotienten aus der Anzahl der Fahrzeuge  $N$  zum Zeitpunkt  $t$  und der Länge  $S$  des betrachteten Streckenzugs bestimmt.

$$k = \frac{N}{S} \quad [\text{Kfz/km}] \quad (3)$$

### Geschwindigkeit

Geschwindigkeiten werden an Querschnitten (lokal) oder an ganzen Streckenzügen (momentan) gemessen.

Die **mittlere lokale Geschwindigkeit**  $\bar{v}_l$  bestimmt sich für N Fahrzeuge an einem festen Querschnitt im Zeitintervall T zu

$$\bar{v}_l = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{li} \quad [\text{km/h}]. \quad (4)$$

Die **mittlere momentane Geschwindigkeit**  $\bar{v}_m$  wird für N Fahrzeuge zum Zeitpunkt t am betrachteten Streckenzug bestimmt zu

$$\bar{v}_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{li} \quad [\text{km/h}]. \quad (5)$$

Mittlere lokale und momentane Geschwindigkeit stehen nach WARDROP (1952) in folgender Beziehung:

$$\bar{v}_l = \bar{v}_m + \frac{\sigma_m^2}{\bar{v}_m} \quad [\text{km/h}] \quad (6)$$

mit der Streuung der momentanen Geschwindigkeiten  $\sigma_m^2$ .

Nur bei exakt gleichen Geschwindigkeiten stimmen lokale und momentane Geschwindigkeit überein; ansonsten ist die lokale immer größer als die momentane Geschwindigkeit.

### Zeitlücken und Raumlücken

Als **Zeitlücke** wird der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Fahrzeugen bezeichnet. Unterschieden wird dabei zwischen Brutto- und Nettozeitlücke, wobei erstere von Bug zu Bug und letztere vom Heck des voranfahrenden bis zum Bug des nachfolgenden Fahrzeugs gemessen wird. Zeitlücken sind lokale Kenngrößen und können durch die Differenz der Zeitpunkte der Überfahrt eines Messquerschnitts von zwei hintereinanderfahrenden Fahrzeugen erhoben werden (siehe Abbildung 4 unten).

Die mittlere Bruttozeitlücke  $\bar{t}$  eines Verkehrsstroms von N Fahrzeugen im Beobachtungsintervall T ist

$$\bar{t} = \frac{T}{N} \quad [\text{sec}] \quad (7)$$

und somit der Kehrwert der Verkehrsstärke q.

Als **Raumlücke**  $\bar{s}$  wird der räumliche Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Fahrzeugen bezeichnet. Sie ist eine momentane Kenngröße (siehe Abbildung 4 oben), und der Kehrwert der Verkehrsdichte k.

$$\bar{s} = \frac{S}{N} \quad [\text{m}] \quad (8)$$

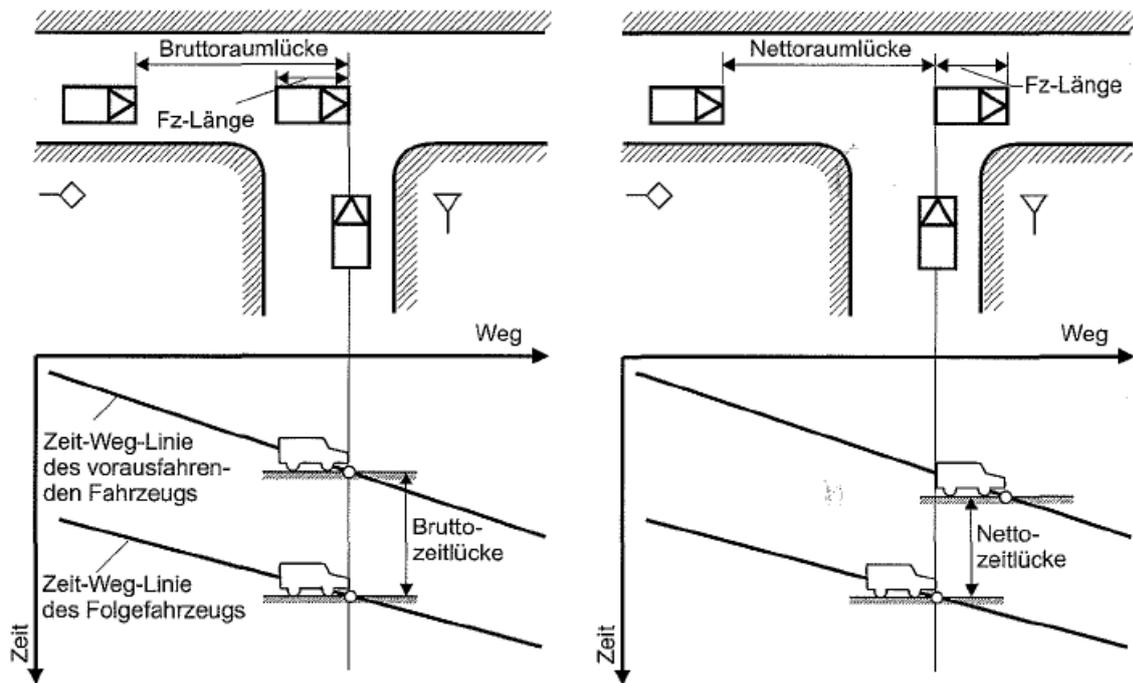


Abbildung 4: Brutto- und Nettolücken im Fahrzeugstrom (SCHNABEL&LOHSE 2011)

In seinen Untersuchungen zu den Einflüssen von Streckenbeeinflussungsanlagen am hochrangigen Straßennetz stellt SCHICK (2003) fest, dass eine ungleichmäßige Aufteilung des Verkehrs (**Fahrstreifenbelegung**) bei hoher Gesamtverkehrsstärke zu einer verhältnismäßig hohen Belastung auf dem linken Fahrstreifen führt. Dies wirkt sich in kürzeren Zeitlücken auf diesem Fahrstreifen und somit störungsanfälligerem Verkehrsfluss aus. Somit ist auch die Fahrstreifenbelegung eine relevante Kenngröße für den Verkehrsfluss.

### Reisezeit

In der Literatur werden allgemein die Begriffe Reisezeitersparnis und ihr Äquivalent Reisezeitverlust benutzt (z.B. SCHICK 2003), um die Auswirkungen von höheren bzw. geringeren Geschwindigkeiten am/an selben Querschnitt(en) zu beschreiben. Faktisch können Reisezeiten an festen Querschnitten durch individuelle Fahrzeugerkennung (Differenz des Zeitpunkts der Erfassung desselben Fahrzeugs an zwei verschiedenen Querschnitten) bestimmt werden. Dies führt bei KFZ-kennzeichenbasierten Systemen zu Datenschutzproblemen, aus laufenden Projekten ist jedoch bekannt, dass in Österreich am hochrangigen Straßennetz querschnittsmessungsbasierte Reisezeitmessungen von LKWs durchgeführt werden und hierfür anonyme Positions- und Zeitdaten an Mautgantries verwendet werden.

Bei mobilen Geräten zur anonymen Fahrzeugverfolgung auf Basis automatisierter Kennzeichenverfolgung besteht das Problem der Genauigkeit bzw. Ungenauigkeit der Messung, weshalb etwa bei dem Projekt GAVE (HIRSCHMANN et al., 2009) die Daten aus Messungen mit Bluetooth-basierten BLIDS-Geräten nicht herangezogen werden konnten.

### Anzahl der Halte

Ein Halt erfolgt bei einer Geschwindigkeit  $v = 0$  km/h. Als klassische Kenngröße mit ortsfesten Messungen kann diese Kenngröße durch momentane Messungen bestimmt werden. In der Praxis wird der Begriff der „Anzahl der Halte von Kraftfahrzeugen“ (HBS 2001) verwendet, ein errechneter Indikator, der zur Bewertung von Lichtsignalanlagen herangezogen wird.

### Haltezeit

Die Haltezeit ist jene Zeit, welche zwischen der Beendigung eines Haltevorgangs (Bremsen) und des Beginns eines Anfahrvorgangs (Beschleunigen) vergeht. (SCHNABEL&LOHSE 2011) So wie die Anzahl der Halte kann diese Kenngröße klassisch mit ortsfesten Geräten durch momentane Messungen bestimmt werden.

### Wartezeit

Nach dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS, 2001) wird für lichtsignalgesteuerte Knotenpunkte die Wartezeit bestimmt, welche die *gegenüber der freien Durchfahrt zusätzlich benötigte Zeit beim Befahren des Knotenpunkts mit Lichtsignalanlage* bestimmt. Die Wartezeit kann neben *weiteren Kenngrößen für die Qualitätsbewertung herangezogen werden, z.B. Anzahl der Fahrzeuge im Stau, Anzahl der Haltevorgänge oder der Durchfahrten, Sättigungsgrad, Anteil überlasteter Umläufe.*

Nach dieser Definition kann also die Wartezeit im Gegensatz zur Haltezeit als **Verlustzeit** betrachtet werden, welcher aus der Differenz aus tatsächlich benötigter und minimaler Reisezeit bestimmt wird.

### Rückstaulänge

Die Rückstaulänge beschreibt die Länge einer Warteschlange vor einen Knotenpunkt (insbesondere einer Verkehrslichtsignalanlage). Durch die Messung von Rückstaulängen durch Detektoren kann eine Verkehrssteuerung auf die momentane Warteschlangenbildung angepasst werden.

Durchgangsverkehrsanteil

## 2.2 Lokale Datenerhebung

In der Praxis hat für die klassische Verkehrsflussanalyse ob des geringeren Aufwandes die lokale Messmethode eine große Verbreitung erfahren (WALDEER 1999). Standardmäßig können die in folgender Tabelle mit einem „x“ gekennzeichneten Kenngrößen durch Querschnittsmessungen direkt und automatisiert erhoben werden, wohingegen nicht gekennzeichnete einer gesonderten Beobachtung bedürfen.

**Tabelle 2: Klassische Kenngrößen der Verkehrsflussanalyse**

Kenngröße	Einheit	Datenerhebung lokal
Verkehrsstärke	Kfz/h	x
Auslastungsgrad	%	x
Verkehrsdichte	Kfz/km	
mittlere lokale Geschwindigkeit	km/h	x
mittlere momentane Geschwindigkeit	km/h	
Fahrzeugkollektiv (z.B. LKW-Anteil)	%	x
Zeitlücken	sek	x
Raumlücken	m	
Fahrstreifenbelegung	%	x
Reisezeit	min	(x)
Anzahl der Halte	-	
Haltezeit	min	

Einzelne Kenngrößen können den Verkehrsfluss für sich alleine nicht beschreiben. Dies wird vielmehr durch die Verknüpfung der einzelnen Größen erreicht. Für unbeeinflusste Querschnitte gilt die Zustandsgleichung

$$q = k \cdot v \quad [\text{Kfz/h}] \quad (9)$$

Diese kann im Fundamentaldiagramm (Abbildung 5) abgebildet werden, dessen Hauptbestandteile das q-v-Diagramm und das k-v-Diagramm sind.

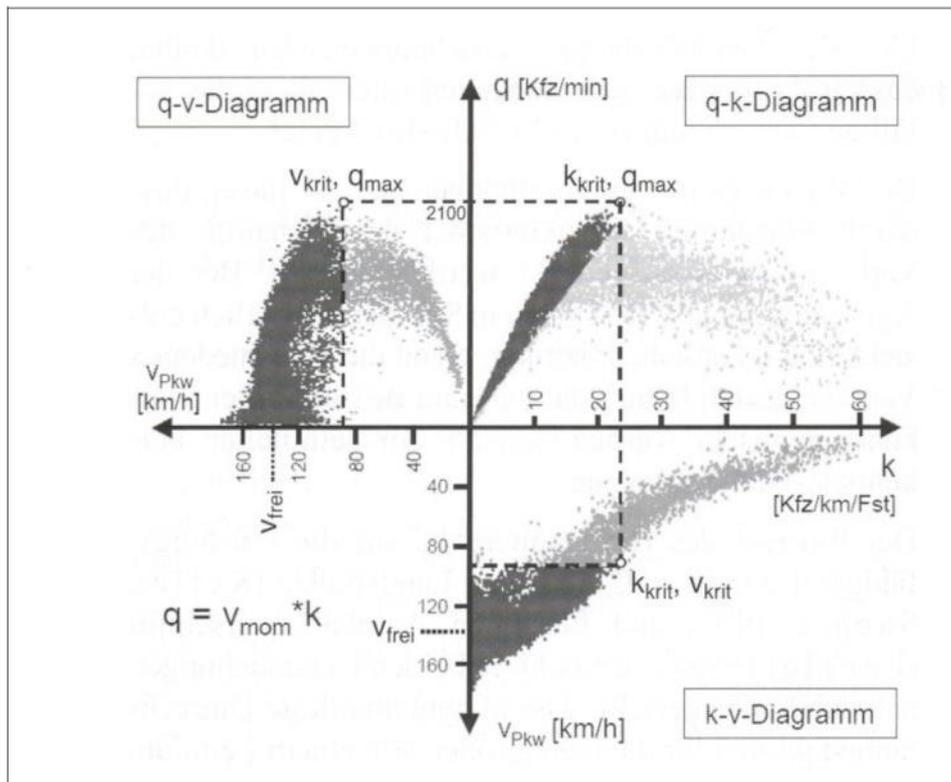


Abbildung 5: Fundamentaldiagramm mit empirisch erhobenen 1-Minuten-Daten (SCHICK, 2003)

Im q-v-Diagramm ist eine annähernd parabelförmige Verteilung der Messgrößen erkennbar, deren Scheitelpunkt die Kapazitätsgrenze beschreibt. Es ist auch erkennbar, dass diese Kapazitätsgrenze nicht statisch ist. Ein Überschreiten der Kapazitätsgrenze führt zum Verkehrszusammenbruch (hellgraue Bereiche). Dieser Übergang erfolgt abrupt, es lassen sich aber je nach Definition weitere Verkehrszustände erfassen. KERNER (2004) definiert in der Drei-Phasen-Theorie die Bereiche *freier Verkehrsfluss* (engl. *free flow*) und *gestauter Verkehrszustand* (engl. *congested traffic*). Zweiterer lässt sich nach dieser Theorie in *gebundenen Verkehr* (engl. *synchronized flow*) und *sich bewegendem breiter Stau* (engl. *wide moving jam*) einteilen.

Die Notwendigkeit der Analyse von Kenngrößen in verknüpfter Art und Weise kann bei Betrachtung des q-v-Diagramms (Abbildung 5 oben links) erklärt werden. Geringe gemessene momentane Verkehrsstärken können bei hohem wie bei niedrigem Verkehrsaufkommen auftreten, doch erst die zusätzliche Information der Geschwindigkeit gibt Aufschluss darüber und somit über den Verkehrszustand.

### 2.3 Charakteristika des innerstädtischen Verkehrsablaufs

In diesem Abschnitt wird auf die Besonderheiten des innerstädtischen Verkehrsablaufs wegen der Inhomogenität des Verkehrsnetzes auf Grund von Knotenpunkten und Verkehrslichtsignalanlagen (VLSA) eingegangen.

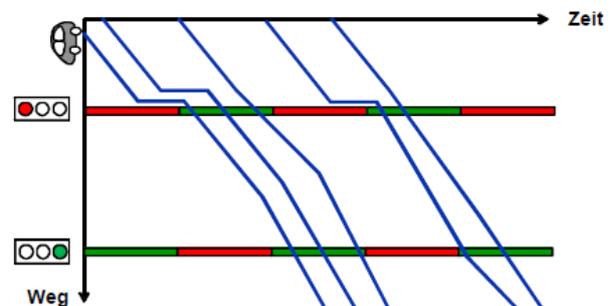
## Beschreibung des Verkehrsablaufs

Der Verlauf von sich im Verkehr bewegendem Fahrzeugen wird in Abbildung 6 mit Zeit-Weg-Trajektorien skizziert. Dabei wird auch der wichtigste Einflussfaktor im innerstädtischen Verkehr – die Lichtsignalanlagen – visualisiert.

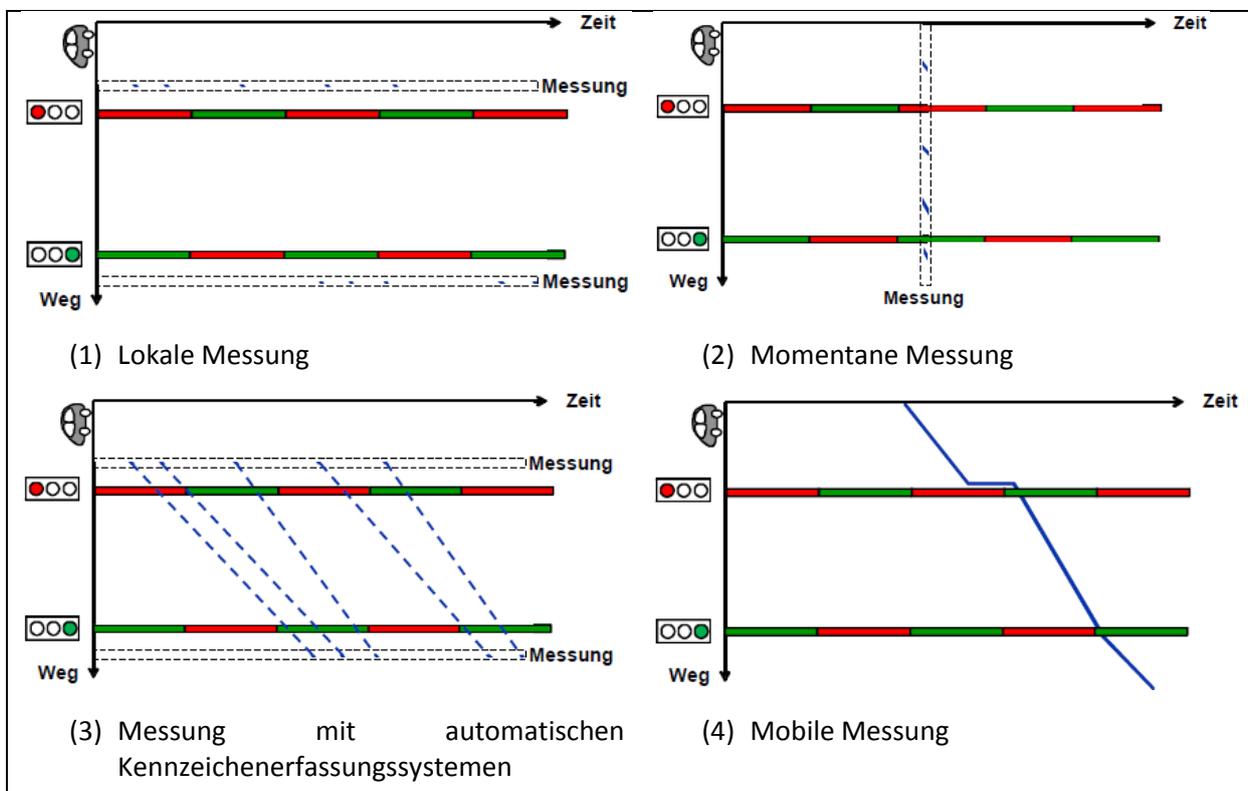
Sich bewegendem Fahrzeuge halten bei Ankunft an einem Haltesignal an (linke Trajektorie), nachfolgende Fahrzeuge kommen hinter diesem zum Stehen (zweite Trajektorie, Halt auf der Wegachse vor dem vorherigen Fahrzeug) usw.

Um den Verkehrsablauf räumlich begrenzt (z.B. in einem zusammenhängenden Steuergebiet von Lichtsignalanlagen) in einem gewissen Zeitraum beschreiben zu können, bedient man sich verschiedener Kenngrößen, welche unter

Einsatz unterschiedlicher Technologien erhoben werden können. Wegen der Störungen des Verkehrsflusses durch VLSA kann aber durch lokale und momentane Datenerfassung (vgl. Abbildung 7: (1), (2)) nur geringe Information über die zwischen den Messungen liegenden Bereiche gewonnen werden. Auch die momentane Datenerfassung mit Videokameras kann nur einen gewissen Bereich zeitlich und räumlich erfassen. Eine Linearisierung zwischen zwei Messungen (vgl. Abbildung 7: (3)), wie sie zum Beispiel mit automatischen Kennzeichenerfassungssystemen durchgeführt wird, führt nicht zur Abbildung gestörter realer Fahrverläufe (vgl. Abbildung 7: (4)), eignet sich aber sehr gut für die Erhebung von Reisezeiten (und somit durchschnittlicher Geschwindigkeiten), sowie zur Erfassung von Quelle-Ziel-Beziehungen.



**Abbildung 6: Reale Fahrzeugtrajektorien (BOLTZE et al., 2010)**



**Abbildung 7: Erhebungsmethoden von Verkehrsdaten innerstädtisch (BOLTZE et al., 2010)**

Der reale Verlauf über Zeit und Weg kann durch mobile Messungen mit einem Messfahrzeug erhoben werden (vgl. Abbildung 7: (4)). Im Gegensatz zu momentanen Messungen wird dabei aber nur das Messfahrzeug, nicht jedoch die es umgebenden anderen Verkehrsteilnehmer abgebildet.

Kann über die Daten von mehreren permanent im Verkehr fließenden Fahrzeugen (z.B. Taxis) verfügt werden, spricht man von Floating Car Data (FCD), welche den Verkehr je nach Durchdringungsgrad besser repräsentieren können als einzelne Messfahrten.

In Tabelle 3 finden sich typische Erhebungsmethoden für lokale, mobile und momentane Datenerhebung. Diese können bezogen auf ihre Verfügbarkeit auch in permanente und temporäre Erhebungsmethoden eingeteilt werden.

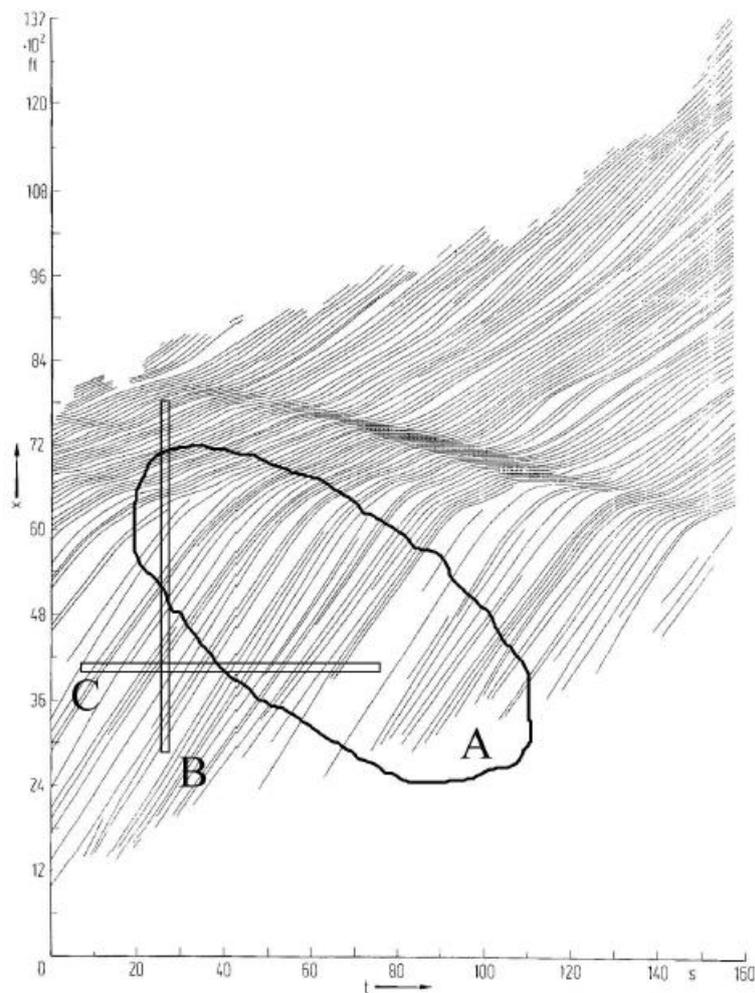
**Tabelle 3: Klassifizierung von Erhebungsmethoden (BOLTZE et al., 2010)**

Installation/ Messdauer	Erfassungsmethode					
	Lokal	Mobil			Momentan	
<b>Permanent</b>	Induktionsschleifen	FCD	aus	einer	Kamerabasierte Erfassung von Streckenabschnitten	
<b>Temporär</b>	Menschliche Zähler	Messfahrzeuge	mit	GPS-	Überflug mit Flugzeug oder Hubschrauber	
		Logger				

Die Möglichkeit der genauen Abbildung von Fahrzeugtrajektorien durch die mobile Messmethode führt zu neuen Möglichkeiten in der Verkehrsflussanalyse. Daher sind die Kapitel 3 und 4 den daraus ermittelbaren Kenngrößen und der Datenerhebung selbst gewidmet.

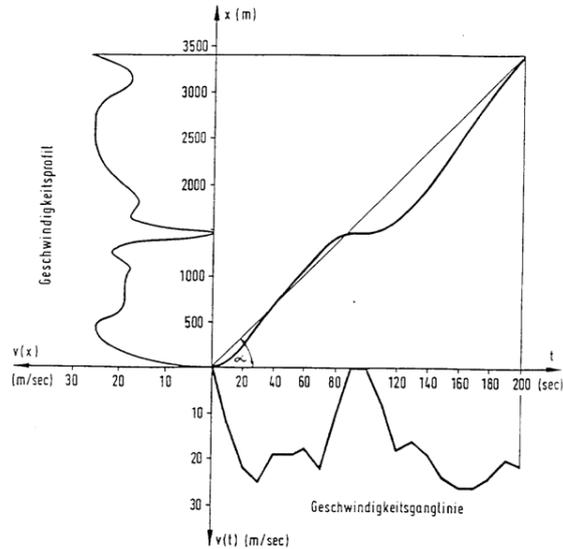
### 3 Kenngrößen aus streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten

Streckenbezogene Einzelfahrzeugdaten erlauben die Beschreibung von ganzen Fahrten. Die sich verändernde Position von einzelnen Fahrzeugen bestimmt dabei die Zeit-Weg-Trajektorie. Die vollständige Erfassung aller Verkehrsteilnehmer beschreibt somit den gesamten Verkehr. In Abbildung 8 ist eine solche vollständige Datenerfassung dargestellt. Der vertikale Balken skizziert eine lokale Messung, der horizontale eine momentane (vgl. Kapitel 2). Durch umfangreiche Einzelfahrzeugdaten können beispielsweise wie hier dargestellt sich bewegende Stauwellen erkannt werden.



**Abbildung 8: Zeit-Weg-Diagramm der einzelnen Fahrzeuge eines Fahrzeugstroms reproduziert aus Luftaufnahmen (LEUTZBACH, 1988)**

Die für den Verkehrsfluss relevanten erfassbaren Daten sind folglich die aktuelle **Zeit**, der **Ort** und die **Geschwindigkeit**. Der Zusammenhang dieser Größen wird in Abbildung 9 verdeutlicht. Die erste Ableitung (Steigung) des Zeit-Weg-Diagramms aus einer Messfahrt nach der Zeit bestimmt die Geschwindigkeit. Aufgetragen über dem Weg (Abbildung 9 links) wird diese als Geschwindigkeitsprofil bezeichnet, über die Zeit (Abbildung 9 unten) wird die Geschwindigkeitsganglinie abgebildet.



**Abbildung 9: Kinematische Zusammenhänge (Fellendorf, 2009)**

Diese Daten können mit geringem Aufwand mit allen GPS-fähigen Geräten wie Navigationsgeräten oder modernen Mobiltelefonen erhoben werden, die Datenqualität ist dabei abhängig von Hard- und Software. Eine gängige und technisch ausgereifte Lösung für die genaue Erfassung streckenbezogener Einzelfahrzeugdaten ist die satellitenbasierte Messung mit Hilfe von am Fahrzeug angebrachten spezieller GPS-Logger für Geschwindigkeitsmessungen. Dabei werden in konstanten Zeitintervallen der Zeitstempel, Position (Koordinaten) und Geschwindigkeit sowie weitere Größen bestimmt.

In der Regel liegen keine ausreichenden Informationen vor, um ein Zeit-Weg-Verhältnis aller Verkehrsteilnehmer (vgl. Abbildung 8) vollständig abzubilden; daher werden häufig einzelne Messfahrten als Datengrundlage herangezogen. Da die Erfassung von streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten nur stichprobenmäßig erfolgen kann, ist für eine umfassende Erfassung von Daten des Verkehrsflusses eine zusätzliche lokale Detektion von Verkehrsstärken nötig, da diese durch einzelne Messfahrten nicht erfasst werden können. Aus den Trajektorien von im Verkehr mitschwimmenden einzelnen Messfahrzeugen (vgl. TREIBER et al., 2010; OTTO, 2011) können mikroskopische Kenngrößen gewonnen werden, welche für eine Fahrt über eine bestimmte Strecke gelten und daher eine für den Benutzer der Straße maßgebliche Größe darstellen (WINZER, 1981).

In den folgenden Abschnitten werden für den Verkehrsfluss relevante mikroskopische Kenngrößen vorgestellt, welche aus streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten gewonnen werden können.

### 3.1 Steuerungsrelevante Kenngrößen

Da die wichtigste Einflussgröße auf den niederrangigen, innerstädtischen Verkehrsablauf die Verkehrssteuerung darstellt, können Kenngrößen hinsichtlich ihrer Relevanz für die VLSA-Steuerung festgelegt werden. Die Forschungsarbeit AMONES (BOLTZE et al., 2010) legt den Fokus auf unterschiedliche VLSA- (Verkehrslichtsignalanlagen-) Steuerungen und deren Wirkungen. Dabei werden als durch Einzelfahrzeugdaten erzeugbare fahrdynamische Kenngrößen die Fahrzeit, Verlustzeit, Reisegeschwindigkeit, Wartezeit und die Anzahl der Halte genannt.

Die Fahrzeit, auch bekannt als **Reisezeit  $T$** , wird bestimmt durch Subtraktion der Zeitstempel an Anfang und Ende eines betrachteten Streckenabschnitts.

Die **Reisegeschwindigkeit**  $v$  kann bestimmt werden durch den Quotienten aus Distanz (auch durch Map-Matching bestimmbar) und Reisezeit:

$$v_R = \frac{d}{T} \quad (10)$$

mit der Gesamtdistanz  $d$  und der Reisezeit  $T$

Durch die Bestimmung der Differenz von tatsächlicher Reisezeit  $T$  und Reisezeit bei freier Fahrt  $T_0$  kann die **Verlustzeit**  $T_v$  bestimmt werden.

Einzig für die Ermittlung der Wartezeit und **Anzahl der Halte** sind die gesamten erhobenen Trajektorien absolut nötig, da sie durch die Unterschreitung eines gewissen Geschwindigkeitsschwellwerts beschrieben werden und daher die Geschwindigkeit der gesamten Fahrt bekannt sein muss. Die Wartezeit wird als jene Zeit definiert, in welcher ein bestimmter Geschwindigkeitsschwellwert nicht überschritten wird. Somit ist sie gleichzusetzen mit der Haltezeit oder **Stillstandszeit**  $T_s$  mit einem definierten Schwellwert. Ob der Ungenauigkeit von Messgeräten werden häufig höhere Grenzen als 0 km/h, z.B. 3 km/h zur Definition eines Halts verwendet (vgl. ERICSSON, 2001, nach KUHLE&KARSTENS, 1978).

Abgesehen von obigen wichtigen Parametern der Verkehrssteuerung finden sich in der Literatur weitere Kenngrößen, welche in Verbindung mit der Effizienz des niederrangigen Straßennetzes verwendet werden. Diese werden in Abschnitt 3.2 einer genauen Betrachtung unterzogen.

### 3.2 Kenngrößen für die Effizienz des Verkehrsflusses

Die Effizienz des Verkehrsflusses kann mit dem Fahrzeugdurchsatz je Zeiteinheit definiert werden, wird aber durch Faktoren wie der Infrastruktur, der Verkehrssicherheit, ökologischen Aspekten und der Fahrzeugtechnik eingeschränkt. Nach D'ESTE et al. (1999) kann die Verkehrseffizienz auf viele verschiedene Arten gemessen werden, doch aus der Sicht des Benutzers der Infrastruktur ist die Stauung das wichtigste Kriterium. Faktoren, welche den Stauungsgrad (level of congestion) widerspiegeln, sind zeitliche Verzögerungen, Reisezeiten und Kosten, Warteschlangenbildung, vermehrte Störfälle und, sowie übermäßiger Energieverbrauch und Umweltverschmutzung. Für diesen Zweck geeignete quantitative Kenngrößen, welche auf Geschwindigkeitsinformationen aus GPS-Daten basieren, sind die Reisezeit, die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit, Congestion Index, Fahrzeit ohne Stillstandszeiten, Anteil der Haltezeit an der Gesamtfahrzeit, Beschleunigungsrauschen und der mittlere Geschwindigkeitsgradient. Für die Beschreibung des Staulevels an verschiedenen Straßenzügen werden wegen ihrer unterschiedlichen Eigenschaften von TAYLOR et al. (2000) (nach UNDERWOOD 1968) die Kenngrößen Congestion Index, der zeitliche Anteil von Stillstandszeiten und das Beschleunigungsrauschen genannt. Zusätzlich wird der mittlere Geschwindigkeitsgradient als Alternative zum Acceleration Noise genannt. Diese Kenngrößen werden in den folgenden Abschnitten auf ihre Bestimmung und Bedeutung hin untersucht.

#### Der Congestion Index

Nach TAYLOR et al. (2000) handelt es sich beim Congestion Index um eine Gesamtmessung der Stauung auf einer Strecke. Es handelt es sich um eine relative, einheitenfreie Größe, welche auf jedwede Strecke (auch vergleichend) angewendet werden kann. Dabei wird die reale Fahrzeit  $T$  einer möglichen Dauer gegenübergestellt, welche als Reisezeit bei freier Fahrt  $T_0$  definiert wird. Die Reisezeit bei freier Strecke wird von der Geschwindigkeit bestimmt, bei welcher nach Definition ein bestimmter Streckenzug bei ungestörtem Verkehrsfluss durchfahren werden kann. Sie wird durch gesetzliche (Geschwindigkeitsbeschränkungen) und bauliche (straßenseitige Infrastruktur, Anzahl

und Art der Knotenpunkte, Topographie etc.) Einschränkungen beeinflusst. Die Reisezeit bei freier Strecke kann vereinfacht entweder durch den Quotienten aus zurückgelegter Strecke und der gültigen Geschwindigkeitsbegrenzung oder durch die geringste beobachtete Reisezeit definiert werden (D'ESTE et al., 1999 nach RICHARDSON&TAYLOR, 1978). Die Wahl der Referenzgröße Die Wahl dieser Referenzgröße  $T_0$  hat entscheidenden Einfluss auf die Kenngröße Congestion Index  $CI$ . Der Congestion Index ist definiert durch

$$CI = \frac{T - T_0}{T_0} \quad (11)$$

mit der tatsächlichen Reisezeit  $T$  und der Reisezeit bei freier Fahrt  $T_0$ .

Ein Wert von  $CI=1$  bedeutet eine doppelt so lange Reisezeit, also die angenommene Reisezeit bei freier Fahrt. Bei einem  $CI$  größer als 2 wird der Verkehrszustand als gestaut bewertet (dreifache Reisezeit als bei freier Strecke), ein Wert nahe 0 lässt auf einen idealen Verkehrsfluss schließen. Wird die Referenz-Reisezeit genügend hoch gewählt, ist auch ein negativer Congestion Index möglich.

### Der zeitliche Anteil von Stillstandszeiten

Der zeitliche Anteil von Stillstandszeiten ist nach TAYLOR et al. (2000) und D'ESTE et al (1999) ein hilfreicher Parameter für die Messung von Verkehrsstörungen und Fahrtqualität und kann zwischen verschiedenen Strecken oder Streckenabschnitten verglichen werden. Er gibt das Ausmaß von Staubildung wieder und gibt im innerstädtischen Verkehr die Wartezeit vor Lichtsignalanlagen (sofern andere Einflüsse ausgeschlossen werden können) wieder, bezogen auf die Reisezeit. Der zeitliche Anteil von Stillstandszeiten beschreibt somit die Zeit, welche in Warteschlangen verbracht wird. Der zeitliche Anteil (Proportion Idling)  $P_i$  von Stillstandszeiten wird definiert als

$$P_i = \frac{T_s}{T} \quad (12)$$

mit der Stillstandszeit  $T_s$  und der tatsächlichen Reisezeit  $T$

### Das Beschleunigungsrauschen

Das Beschleunigungsrauschen (Acceleration Noise ACN), das durch die Standardabweichung der Beschleunigung eines Fahrzeugs im Verkehrsstrom definiert ist, beschreibt den Grad der Geschwindigkeitsänderung auf einer Strecke (KO et al. 2010). Es ist eine Messung der Schwankungen von momentanen Geschwindigkeiten bezogen auf die mittlere Reisegeschwindigkeit und eine hilfreiche parametrische Messung, wenn die mittlere Reisegeschwindigkeit über 30km/h liegt (D'ESTE et al., 1999). Das Beschleunigungsrauschen wird von drei großen Faktoren beeinflusst: Fahrer, Infrastruktur und Verkehrszustand (HERMAN et al, 1959).

Nach JONES&POTTS (1962) ist das Beschleunigungsrauschen  $\sigma$  definiert durch den Effektivwert der Beschleunigung:

$$\sigma^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [a(t) - a_{mean}]^2 dt; \quad (13)$$

mit  $n$  in der Zeit  $T$  (Reisezeit) im Intervall  $\Delta t$  erfassten Beschleunigungswerte  $a$  und der mittleren Beschleunigung  $a_{mean}$ .

Durch eine Näherung von Formel (13) kann das Beschleunigungsrauschen ACN für eine ausreichende Zahl an Datenpunkten definiert werden zu

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n (a(t) - a_{mean})^2} \quad [m/s^2]. \quad (14)$$

Über das Beschleunigungsrauschen ist bekannt, dass er bei sinkender Verkehrsqualität (bestimmt z.B. als Level of Service nach HCM, 2000) auf hochrangigen Strecken steigt (KO, 2010). Aber auch das Fahrverhalten sowie die Fahrzeugeigenschaften haben einen Einfluss auf die Kenngröße (vgl. JONES&POTTS, 1962; KO et al., 2010).

### Der mittlere Geschwindigkeitsgradient

Der Mean Velocity Gradient (MVG)  $\rho$  wird von UNDERWOOD (1968) als Alternative zum Beschleunigungsrauschen für niedrige Durchschnittsgeschwindigkeiten empfohlen. Er ist definiert als Quotient aus Beschleunigungsrauschen  $\sigma$  und der Reisegeschwindigkeit  $v_{mean}$

$$\rho = \frac{\sigma}{v_{mean}} \quad [\text{m/s}^2]. \quad (15)$$

Der Mean Velocity Gradient MVG ist eine Alternative zum Acceleration Noise und nach UNDERWOOD (1968) für mehr Verkehrszustände einsetzbar als der Acceleration Noise.

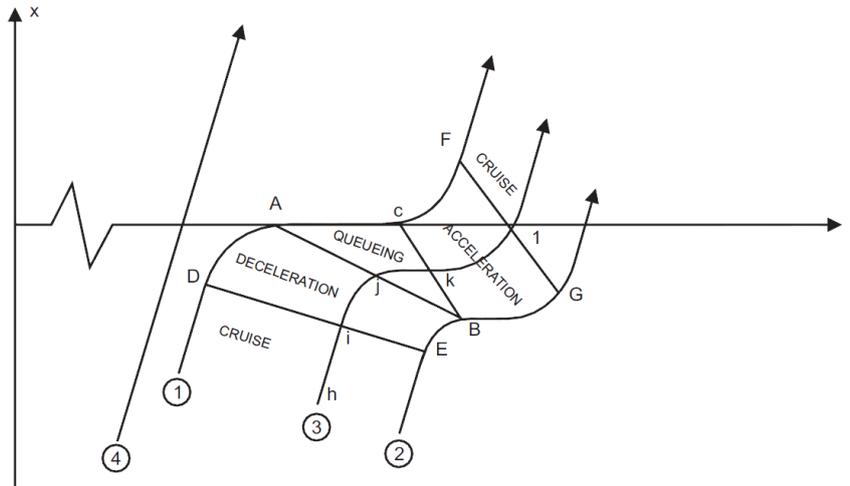
Nach WINZER (1981), welcher den mittleren Geschwindigkeitsgradienten am hochrangigen Straßennetz untersuchte, eignet sich der Geschwindigkeitsgradient gut als Maßstab für die qualitative Beurteilung von Einzelfahrten, da diese Kenngröße sowohl „Erfolge“ (Reisegeschwindigkeit) und „Misserfolge“ (Beschleunigungsrauschen“) berücksichtigt. In seinen Untersuchungen am hochrangigen Netz stellt er weiters fest, dass der Einfluss von Verkehrsstärke und Verkehrsdichte implizit vorhanden sind.

## 3.3 Weitere Kenngößen aus streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten

Im Bereich der Fahrzeugtechnik werden seit den 70er Jahren (z.B. KRUSE et al., 1973, KUHLE und KARSTENS, 1978; WATSON, 1983) mit Einzelfahrzeugen generierte Daten verwendet, um Faktoren zu bestimmen, mit deren Hilfe auf Emissionen geschlossen bzw. Emissionsmodelle erstellt wurden. In diesem Abschnitt wird eine Auswahl von Kenngrößen aufgelistet, die in Arbeiten zur Bestimmung von Fahrverhaltensmustern und Emissionen verwendet wurden.

### Fahrmodi

Ein Fahrzeug kann prinzipiell die Zustände Fahren und Halten einnehmen, dazwischen wird das Fahrzeug beschleunigt oder verzögert. MATZOROS&VAN VLIET (1991) beschreiben diese Zustände an Hand der Vorgänge an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten. Demzufolge gibt es vier Fahrmodi, welche an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten unterschieden werden können: konstante Fahrt (engl. „cruising“, Abk. C), Bremsen (engl. „deceleration“, Abk. D), Halt (engl. „queueing“, Abk. Q) und Beschleunigung (engl. „acceleration“, Abk. A). Der Modus „Queueing“ wird in der Literatur auch als „idling mode“ oder „idle period“ bezeichnet.



**Abbildung 10: Die 4 Fahrmodi bei signalisierten Knotenpunkten unter der Kapazitätsgrenze (MATZOROS&VAN VLIET, 1991)**

Je nach Position, an welcher ein Fahrzeug den Wartebereich vor einem signalisierten Knotenpunkt erreicht, nimmt es verschiedene Fahrmodi ein. Das vorderste Fahrzeug (Trajektorie 1) erreicht die Haltelinie bei „rot“: Es beendet den Modus C, bremst (Modus D), wartet an der Haltelinie (Modus Q), beschleunigt nach Umschalten auf „grün“ (Modus A) und erreicht wieder den Modus C. Weitere Fahrzeuge (Trajektorie 3) erreichen den Wartebereich während der Rot- oder der nächsten Grünphase (während noch Fahrzeuge auf die Auflösung des Wartebereichs warten), halten aber nicht an der Haltelinie, sondern hinter den vor ihm wartenden Fahrzeugen. Die Beschleunigungsphasen der wartenden Fahrzeuge beginnen zeitversetzt, da zuerst das jeweils vordere Fahrzeug losfahren muss. Trajektorie 2 beschreibt den Fahrverlauf eines Fahrzeugs, welches während der Grünphase auf das Ende des Wartebereichs trifft. Ab diesem Zeitpunkt bis zur nächsten Rotphase erreichen Fahrzeuge keinen Stillstand mehr. Dennoch kann es nötig sein, dass sie den Modus D und entsprechend den Modus A annehmen müssen.

So lassen sich alle Fahrverläufe durchgängig in diese vier Fahrmodi einteilen. ERICSSON (2001) grenzt diese nach KUHLE&KARSTENS (1978) durch Grenzwerte von Beschleunigung und Geschwindigkeit ein (siehe Tabelle 4).

**Tabelle 4: Definition der Fahrbereiche (ERICSSON, 2001)**

Cruising	Deceleration	Idling Mode	Acceleration
Konstante Fahrt	Bremsen	Stillstand	Beschleunigung
$ a  < 0.1 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$a < -0.1 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$v < 3 \text{ [km/h]}$ $ a  < 0.1 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$a > 0.1 \text{ [m/s}^2\text{]}$

Der Modus Stillstand („Idling Mode“) ist nach dieser Definition im Modus Konstante Fahrt („Cruising“) inkludiert.

Entsprechend dieser Einteilung lassen sich aus den Informationen des Zeitstempels, der Geschwindigkeit und der Beschleunigung für ganze Trajektorien folgende Parameter ableiten (HUNG et al. 2005, WANG et al. 2008, nach KUHLE&KARSTENS, 1987):

**Tabelle 5: Fahrparameter nach HUNG et al. (2005), WANG et al. (2008)**

Parameter	Abkürzung	Einheit
1. Mittlere Geschwindigkeit des gesamten Fahrzyklus inklusive Idling Mode	<b>V1</b>	km/h
2. Mittlerer Geschwindigkeit des gesamten Fahrzyklus exklusive Idling Mode	<b>V2</b>	km/h
3. Mittlere Beschleunigung aller Beschleunigungsphasen	<b>A</b>	m/s <sup>2</sup>
4. Mittlere Verzögerung aller Verzögerungsphasen	<b>D</b>	m/s <sup>2</sup>
5. Mittlere Länge der Fahrperioden (von Start bis Stillstand)	<b>L</b>	s
6. Mittlere Anzahl der Änderungen von Beschleunigung zu Bremsen (und umgekehrt) in einer Fahrperiode (von Start bis Stillstand)	<b>M</b>	-
7. Anteil (Proportion) Idling (Stillstand: $v = 0$ [m/s <sup>2</sup> ])	<b>P<sub>i</sub></b>	% der Zeit
8. Anteil Cruising (konstante Fahrt: $ a  < 0.1$ [m/s <sup>2</sup> ], $v > 5$ m/s)	<b>P<sub>c</sub></b>	% der Zeit
9. Anteil Acceleration (Beschleunigung: $a > 0.1$ [m/s <sup>2</sup> ])	<b>P<sub>a</sub></b>	% der Zeit
10. Anteil Deceleration (Verzögerung: $a < -0.1$ [m/s <sup>2</sup> ])	<b>P<sub>d</sub></b>	% der Zeit
11. Anteil Creeping (konstante Fahrt: $ a  < 0.1$ [m/s <sup>2</sup> ], $v < 5$ m/s)	<b>P<sub>cr</sub></b>	% der Zeit

Die Definition des Creep-Modus (vgl. Tabelle 5: 11) ist angelehnt an HUNG et al. (2005). Dieser beschreibt nach MATZOROS&VAN VLIET (1992) die Bewegung von aneinandergereihten Fahrzeugen, wenn diese sich langsam mit vielen Halte- und Anfahrvorgängen bewegen. Bei „Creeping“ weist das Fahrzeug geringe Beschleunigungen (wie bei „Cruising“) auf, es bewegt sich aber mit geringerer Geschwindigkeit.

#### **PKE, Maximalgeschwindigkeit und RMS**

In den Arbeiten von HUNG et al. (2004) und WANG et al. (2008) werden weitere Parameter aus den Arbeiten von KRUSE und HULS (1973) und KENT et al. (1978) angewendet, um aus einer großen Menge an GPS-Teiltrajektorien die repräsentativste ganze Trajektorie zusammenzustellen. Diese werden ebenso von WATSON (1983) zur Untersuchung von Fahrverläufen aufgegriffen.

- Positive kinetische Energie (Abk. **PKE** für engl. „positive acceleration kinetic energy“ [m/s<sup>2</sup>]):

$$PKE = \frac{v_f^2 - v_i^2}{x} \text{ [m/s}^2\text{]}, \quad \frac{dv}{dt} > 0 \quad (16)$$

Mit  $v_i$  und  $v_f$  Als Anfangs- (inital) und Endgeschwindigkeit (final) und der zurückgelegten Distanz  $x$ .

ERICSSON (2001) zählt diesen Faktor zu jenen, welche einen wichtigen Einfluss auf Verbrauch und Emissionen haben. Er steigt bei vielen lokalen Minima und Maxima der Geschwindigkeitskurve und sinkt bei homogenerem Fahrverlauf.

- Maximalgeschwindigkeit  $v_{\max}$  eines gesamten Zyklus [km/h]
- Effektivwert der Beschleunigung (Abk. **RMS** für engl. „root mean square acceleration“ [m/s<sup>2</sup>])

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n a_i^2 \Delta t_i} \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (17)$$

Mit  $n$  in der Zeit  $T$  im Intervall  $\Delta t$  erfasste Werten  $a$ .

Verkehrliche Untersuchungen zu RMS sind nicht bekannt.

### Prozentuale Verteilungen von Kenngrößen

In den Arbeiten von ERICSSON (2000 und 2001) werden Zeitverteilungen von Kenngrößen gebildet. Hierzu werden Klassen in konstanten Schritten festgelegt und die prozentuale Zeitverteilung von Kenngrößen über diese Klassen ermittelt (z.B. % der Zeit  $0 < a < 0.5$ , % der Zeit  $0.5 < a < 1$  usw.), da Verteilungsmessungen detailliertere Beschreibungen von Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofilen zulassen.

In ERICSSON (2000) werden die Größen

- Geschwindigkeit  $v$  und
- Beschleunigung  $a$  untersucht.

Es wird festgehalten, dass zur Spitzenstunde („Peak“) im Vergleich zu „Off-Peak“ innerstädtisch Geschwindigkeiten zwischen 0 und 15 km/h größere zeitliche Anteile aufweisen, hingegen negative Beschleunigungen zwischen  $-2,5$  und  $-1,5$  m/s<sup>2</sup> geringere. Das Geschlecht der Testfahrer weist einen Einfluss auf die positive Beschleunigung auf (weiblich: größere Anteile von 0 bis 0,5 m/s<sup>2</sup>; männlich: größere Anteile bei  $a > 1,0$  m/s<sup>2</sup>).

In ERICSSON (2001) werden zusätzlich folgende Werte bestimmt (FOMUNUNG et al., 1999):

- Inertial Power  $av$
- Drag Power  $av^2$

Dies sind Ersatzkenngrößen für NO<sub>x</sub>-Modellierung, hinsichtlich Verkehrsfluss sind keine Untersuchungen bekannt.

### Staukennzahl (Congestion Ratio)

WANG et al. (2008) definieren eine sogenannte Congestion Ratio, welche durch den Quotienten aus der mittleren Geschwindigkeit  $V1$  zur Spitzenstunde und  $V1$  zur Schwachlastzeit bestimmt ist.

$$r_c = \frac{V1_{peak}}{V1_{off-peak}} \quad (18)$$

Weitere Kenngrößen

In Untersuchungen zum Fahrverhalten und Emissionen werden folgende Parameter zur Schwingungsmessung (engl. oscillation measures) bestimmt (ERICSSON 2000)

- **RPA** (Relative Positive Acceleration)

Der relativen Positive Beschleunigung wird eine positive Korrelation mit Kraftstoffverbrauch und Emissionen von schweren Fahrzeugen (heavy vehicles) zugeschrieben (nach WEIJER 1997), da sie Beschleunigungen bei höheren Geschwindigkeiten stärker gewichtet. Untersuchungen zum Verkehrsfluss sind nicht bekannt.

$$RPA = \frac{1}{x} \sum a_i^+ v_i \quad (19)$$

Mit den positiven Beschleunigungen  $a^+$ , den zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$  und der gesamten zurückgelegten Distanz  $x$ .

- Der Quotient aus der Summe der quadratischen Beschleunigung und der Anzahl der Zeitschritte

$$\frac{1}{n} \sum a_i^2 \quad (20)$$

Mit der Beschleunigung  $a$  (positiv und negativ) und  $n$  Zeitschritten.

Nach ERICSSON (2001) steigt dieser Parameter, wenn das Geschwindigkeitsprofil schwankt.

### 3.4 Vergleich lokaler und streckenbezogener Kenngrößen

Mikroskopische fahrdynamische Kenngrößen beschreiben die Fahrt eines einzelnen Fahrzeugs auf einem Streckenabschnitt im fließenden Verkehr. Dadurch unterscheiden sie sich grundlegend von den klassischen Kenngrößen, welche im Falle lokaler Datenerhebung jeweils die Daten von vielen Fahrzeugen an einem Querschnitt verwenden. Durch Heranziehen (Mittelwertbildung) der fahrdynamischen Kenngrößen mehrerer Fahrten kann der Verkehr für den entsprechenden Zeitraum auf dem betreffenden Streckenzug genähert beschrieben werden. Diese makroskopische fahrdynamischen Kenngrößen können zum Teil klassische Kenngrößen ersetzen. In diesem Abschnitt wird dargelegt, welche klassischen makroskopischen Kenngrößen aus Abschnitt 2.1 durch mikroskopische streckenbezogene Einzelfahrzeugdaten aus einzelnen Messfahrten erfasst werden können (siehe Tabelle 6).

**Tabelle 6: Klassische und streckenbezogene Kenngrößen**

Klassische Kenngröße makroskopisch	streckenbezogene Kenngröße makroskopisch	Datengrundlage mikroskopisch
mittlere Verkehrsstärke	-	
mittlerer Auslastungsgrad	-	
mittlere Verkehrsdichte	-	
mittlere Geschwindigkeit lokal	-	
mittlere Geschwindigkeit momentan	mittlere Reisegeschwindigkeit	Reisegeschwindigkeit
mittlere Zeitlücken	-	
mittlere Raumlücken	-	
mittlere Fahrstreifenbelegung		
mittlere Reisezeit	mittlere Reisezeit	Reisezeit
mittlere Haltezeit	mittlere Haltezeit	Haltezeit
mittlere Verlustzeit	mittlere Verlustzeit	Verlustzeit
mittlere Rückstaulänge	mittlerer Abstand der Halteposition zur Haltelinie	Position des Halts vor Lichtsignalanlage

Nur wenige klassische makroskopische Kenngrößen können durch die streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten aus mobiler Datenerfassung herangezogen werden. Die momentane mittlere Geschwindigkeit kann näherungsweise durch die mittlere Reisegeschwindigkeit beschrieben werden, ebenso die mittlere Reisezeit, mittlere Haltezeit und mittlere Verlustzeit. Die mittlere Rückstaulänge kann durch die Position von Halten vor der Haltelinie bestimmt werden. Dahingegen liefern die Kenngrößen aus Einzelfahrzeugdaten weitergehende Information über den Verlauf einer Fahrt auf einer ganzen Strecke.

Die streckenbezogenen Kenngrößen Beschleunigungsrauschen und Anteil der Stillstandszeit, sowie die meisten weiteren in Kapitel 3 aufgelisteten Kenngrößen benötigen im Gegensatz zur mittleren Reisegeschwindigkeit oder der Reisezeit die einzelnen Geschwindigkeits- und daraus abgeleiteten Beschleunigungswerte einer Trajektorie für ihre Bestimmung. Im nächsten Kapitel werden daher die praktische Erhebung von Geschwindigkeitstrajektorien mittels GPS, die folgende Ermittlung von Beschleunigungstrajektorien und grundlegende Informationen zum Postprocessing beschrieben.

## 4 Erfassung und Aufbereitung streckenbezogener Einzelfahrzeugdaten

In diesem Kapitel wird generell auf die Erzeugung von streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten mit satellitengestützter Ortung eingegangen. Dabei wird die GNSS-Technologie (Global Navigation Satellite System) selbst in Grundzügen erklärt sowie das Verfahren zur Bestimmung von Geschwindigkeit und Beschleunigung. Weiters wird auf technologiespezifische Aspekte wie der Empfangsproblematik und dem Aufzeichnungsintervall eingegangen.

### 4.1 Die GPS-Technologie und Datenqualität

Für die Erfassung von Positions- und Geschwindigkeitsdaten werden Hard- und Softwarepakete von spezialisierten Herstellern verwendet. Die Technologie oder auch Wissenschaft der Satellitenortung ist in der Literatur umfangreich beschrieben, wobei MANSFELD (2010) ein umfassendes Werk zur Satellitenortung und ihren Anwendungen in deutscher Sprache verfasst hat. Aktuell wird standardmäßig das Globale Satellitennavigationssystem Navstar GPS (Global Positioning System) für die Satellitenortung verwendet, da es frei verfügbar ist und in der Navigation hohe Genauigkeiten von unter 20 Metern, bzw. unter 3 Metern mit Differential-GPS (DGPS) erreicht (MANSFELD, 2010). Mit Hilfe der GNSS-Technologie können die momentane Position und auch die momentane Geschwindigkeit eines Empfängers bestimmt werden. Diese Informationen werden in einem festen Zeitintervall geloggt und somit Zeitreihen erzeugt. Für Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung kommen dabei verschiedene Verfahren zum Einsatz.

#### POSITIONSBESTIMMUNG

*Die Ortung erfolgt nach dem Entfernungsmessverfahren mit der Einweg-Methode (MANSFELD, 2010).* Einweg-Methode bedeutet, dass die Satelliten ihre Positions- und Bahndaten (Ephemeriden und Almanach), sowie ihre aktuelle Systemzeit (Atomuhr an Bord jedes Satelliten) mit einem hochfrequenten Signal versenden, welche von Empfangsgeräten als passiver Bestandteil des Systems empfangen werden können. Zur dreidimensionalen Positionsbestimmung werden zeitgleich die Signale von drei Satelliten benötigt, um die Position aus dem Schnittpunkt von drei Kugelflächen zu bestimmen. Diese Kugelflächen werden aus den Signallaufzeiten zwischen Empfänger und Sender (Satellit) bzw. den daraus errechneten Entfernungen bestimmt. Diese Entfernungen werden Pseudoentfernung (engl. „pseudo range“) genannt, da sie ohne Berücksichtigung des Uhrzeitfehlers zwischen Sender und Empfänger bestimmt werden. Da aber die Quarzuhr eines GPS-Empfängers zu ungenau ist, muss eine vierte Entfernung zur exakten Bestimmung der Uhrzeit gemessen werden. Somit stellen vier sichtbare Satelliten (sichtbar im Sinne von Radiowellen, Bewölkung stellt kein Hindernis dar) die Mindestanforderung für eine genaue Positionsbestimmung im dreidimensionalen Raum mittels GPS dar. Standardmäßige GPS-Empfänger von Navigationsgeräten, welche die Ortung auf der Basis von Signallaufzeiten vornehmen, weisen im innerstädtischen Bereich oft einen horizontalen Ortungsfehler von 30 m und mehr auf, was jedoch für Ortung und Zielführung im Straßenverkehr ausreichend ist (KOJIMA et al., 2012).

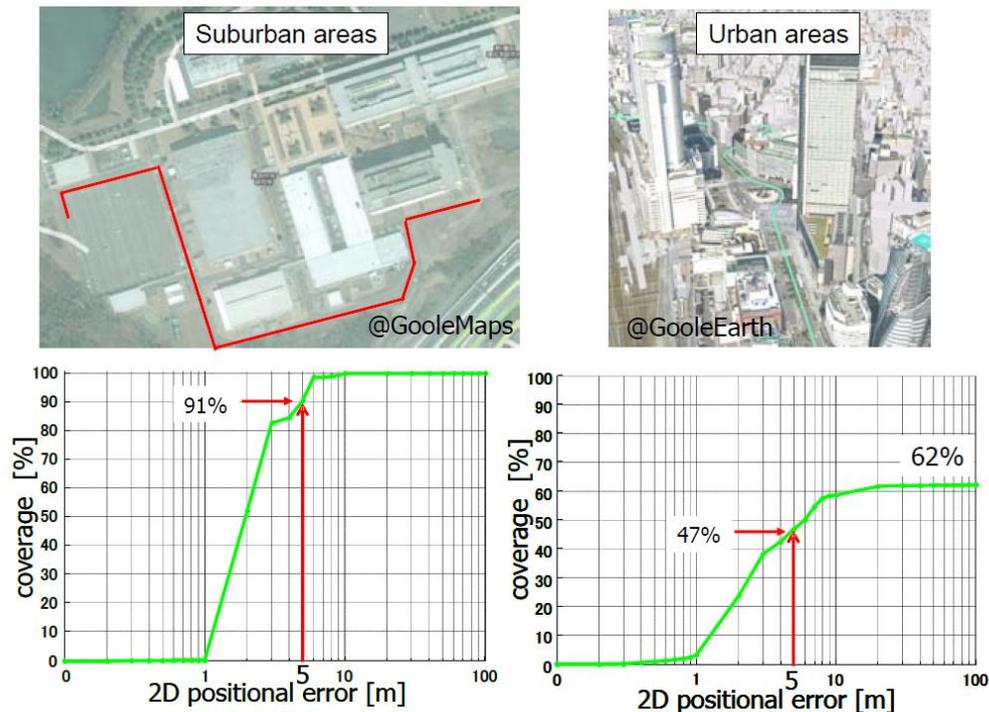


Abbildung 11: Ortungsfehler innerstädtisch (KOJIMA et al., 2012)

In Abbildung 11 wird dieser Ortungsfehler in Form einer Summenfunktion dargestellt. In mäßig bebautem Stadtgebiet werden im illustrierten Beispiel bei einfacher GPS-Ortung 91% der Positionsdaten mit einer maximalen Abweichung von 5 Metern bestimmt, für stark bebaute innerstädtische Gebiete erfüllen diese Anforderung nur 47%.

Differential GPS

### GESCHWINDIGKEITSMESSUNG

Um Geschwindigkeitsinformationen von Fahrzeugen zu erheben, bedienen sich Messgeräte zumeist des **Doppler-Effekts** (MANSFELD, 2010). Diese weisen höhere Genauigkeiten auf als Geschwindigkeitstrajektorien, welche aus Positionsdaten auf Basis von Signallaufzeiten gewonnen werden (D'ESTE et al., 1999). Befinden sich Sender und Empfänger in Ruhe bzw. ist ihr Abstand konstant, so hat die von dem Sender ausgestrahlte Welle auch am Eingang des Empfängers dieselbe Frequenz. Bewegt sich aber der Sender, der Empfänger oder beide, so besteht zwischen ihnen eine Relativgeschwindigkeit. Der sogenannte Doppler-Effekt beschreibt den Umstand, dass die Frequenz des ausgesendeten Signals gestaucht bzw. gestreckt wird, nähert bzw. entfernt sich der Sender vom Empfänger. Diese Frequenzverschiebung oder Doppler Shift ist äquivalent zur Relativgeschwindigkeit zwischen Sender und Empfänger, wobei die Geschwindigkeit des Senders (Satelliten) bekannt ist. Daraus kann die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs bestimmt werden.

Essentiell für die Datenqualität ist demzufolge der korrekte Empfang der Satelliteninformationen. Dieser wird neben geringen Einflüssen der Ionosphäre und der Troposphäre auf die Signallaufzeit (MANSFELD, 2010) durch Abschattungen und Mehrwegeausbreitungen behindert.

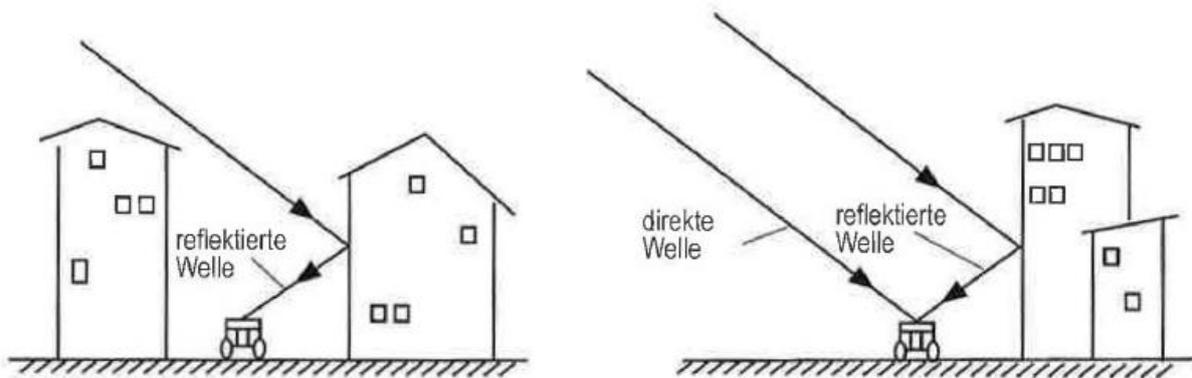
### ABSCHATTUNGEN

Die Hersteller von GPS-Loggern geben die Genauigkeiten ihrer Geräte für den Fall der Verfügbarkeit der GPS-Satelliten, sowie für den Fall von „idealen“ Bedingungen an, also bei freier Sichtverbindung zu den Satelliten. Diese „freie Sichtverbindung“ bezieht sich auf die elektromagnetischen Wellen, welche als Signalträger verwendet werden. Bewölkung stellt also theoretisch keine Behinderung des Signals dar. Im Gegensatz dazu führt Bebauung oder Bepflanzung (z.B. Bäume an der Straße) zu

Abschattungen, welche die Anzahl der sichtbaren Satelliten direkt reduzieren. Solche kurzfristigen Signalausfälle können durch den Einsatz eines Beschleunigungssensors kompensiert werden, welcher durch Bäume, Tunnel, Brücken etc. bedingte Abschattungen zu einem gewissen Maße kompensieren kann. Damit können bei einem GPS-Empfänger Signalausfälle im Sekundenbereich überbrückt werden.

### MEHRWEGEAUSBREITUNG

Als Mehrwegeausbreitung wird jener Effekt beschrieben, der durch die Reflexion eines Satellitensignals z.B. an einer Hausfassade auftreten kann. Durch Messung der zu großen Entfernung entsteht ein Ortungsfehler. Dabei kann durch das Leistungsverhältnis der direkten zur reflektierten Welle die reflektierte erkannt werden, um dieses Signal nicht zu berücksichtigen. Bei sehr geringen Erhebungswinkeln des Satelliten ist dieser Unterschied jedoch geringer. Daher kann durch die Definition eines höheren minimalen Erhebungswinkels im GPS-Empfänger die Qualität der Rohdaten gehoben werden, jedoch muss auch auf eigentlich gültige Signale unter diesem Erhebungswinkel verzichtet werden.



**Abbildung 12: Empfang der vom Satelliten abgestrahlten Wellen (MANSFELD, 2010): reflektierte Welle (a); direkte Welle und reflektierte Welle (b)**

Als Qualitätskriterium für einen korrekten Signalempfang kann daher die Anzahl der verfügbaren Satelliten zur Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung herangezogen werden. Durch ein Festlegen des Kriteriums auf 5 oder 6 verfügbaren Satelliten (anstatt den Minimum von 4) kann so eine höhere Datenqualität erzielt werden, jedoch zu Lasten der Datenmenge valider Daten. Ein weiteres Qualitätskriterium sind DOP-Faktoren (Dilution of Precision), die von vielen Datenprotokollen mitgeloggt werden und ebenso ein Indikator für die Datenqualität von GPS-Daten sind. Der für die dreidimensionale Ortung maßgebliche PDOP (position dilution of precision) ist das umgekehrte Äquivalent zum Pyramidenvolumen, welche durch die sichtbaren Satelliten mit dem GPS-Empfänger geformt wird. Je größer das Volumen dieser Pyramide, desto genauer ist die Positionsbestimmung und umso kleiner der PDOP-Wert. Befinden sich z.B. die verfügbaren Satelliten knapp über dem Horizont, wird die Datenqualität beeinträchtigt. In der Literatur wird der PDOP-Wert oft neben der Mindestsatellitenanzahl (4) als Gültigkeitskriterium verwendet. JUN et. al (2006) setzt den maximal gültigen PDOP auf 8 fest. D'ESTE et al. (1999) sprechen von einem Qualitätsverlust ab einem PDOP =5 und von einer sehr guten Satellitenkonstellation bei einem PDOP-Wert unter 2.

Wegen der oben angeführten Einflüsse erfüllen GPS-Logger die vom Hersteller angeführten Genauigkeiten nur bei idealen Bedingungen, welche sich jedoch grundlegend von jenen im städtischen Gebiet unterscheiden (vgl. D'ESTE et al., 1999). Diese Abweichung kann nur durch den Vergleich zu anderen Messsystemen (z.B. Geschwindigkeitssensor des Fahrzeugs) erhoben werden und hängt von der verwendeten Hard- und Software ab. Die aus empfangenen GPS-Signalen

erzeugten Geschwindigkeitsdaten sind daher einem gewissen Rauschen unterworfen, welches sich ebenso auf die Beschleunigungstrajektorien auswirkt, welche für einige Kenngrößen aus Kapitel 3 von Relevanz sind. In Abschnitt 4.2 wird daher auf die Bestimmung von Beschleunigungszeitreihen eingegangen, während sich Abschnitt 4.3 mit der Glättung beschäftigt.

## 4.2 Beschleunigung und Distanz aus Geschwindigkeitswerten

Nach der Datenerhebung und dem Postprocessing werden aus den erzeugten Geschwindigkeitsinformationen Beschleunigungswerte errechnet, welche für einige fahrdynamische Kenngrößen (vgl. Kapitel 3) relevant sind. In diesem Abschnitt wird die Bestimmung der Beschleunigung behandelt.

Die Geschwindigkeit (siehe Formel 21) ist die Ableitung der Strecke nach der Zeit. Wird die Geschwindigkeit erhöht, so spricht man von einer beschleunigten Bewegung. Die Veränderung des Weges über die Zeit wird bei einer konstant beschleunigten Bewegung durch einen exponentiellen Verlauf ausgedrückt (vgl. Abbildung 13: Weg-Zeit-Diagramm). Steigende Beschleunigung über die Zeit führt zu einem exponentiellen Geschwindigkeitsverlauf (Abbildung 13, Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm), die Fläche unter dem v-t-Graphen stellt die zurückgelegte Distanz dar.

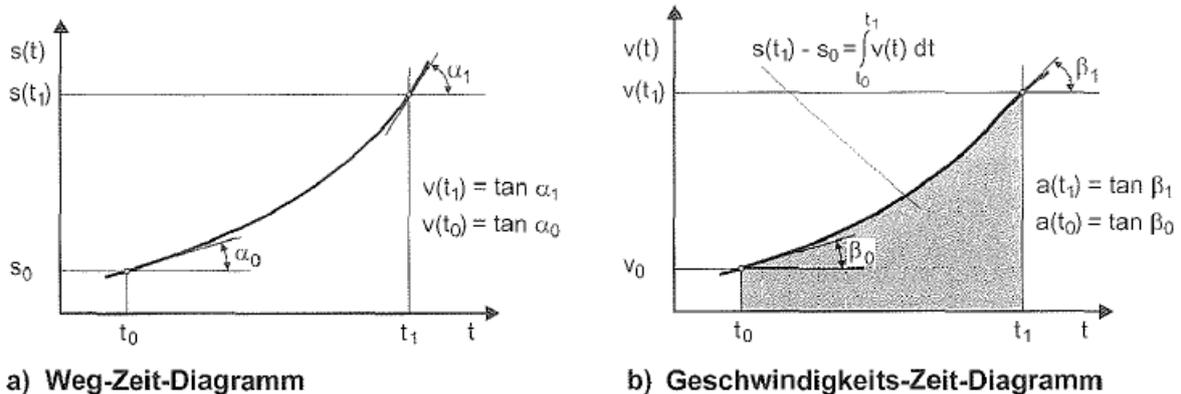


Abbildung 13: Diagrammdarstellung der Bewegung (SCHNABEL&LOHSE, 2011)

Die Änderung des Weges  $s$  in der Zeiteinheit  $t$  ist die von der Zeit abhängige Geschwindigkeit  $v(t)$ :

$$v(t) = \frac{ds}{dt} \quad (21)$$

Die Änderung der Geschwindigkeit  $v$  in der Zeiteinheit  $t$  ist die von der Zeit abhängige Beschleunigung  $a(t)$ :

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \tan(\beta) \quad (22)$$

Nach SCHNABEL&LOHSE (2011) werden zur Bewegungsbeschreibung eines Einzelfahrzeugs größtenteils die Gesetzmäßigkeiten der geradlinigen Bewegung eines Massenpunkts benutzt. Dies heißt, dass angenommen wird, dass die Geschwindigkeit zwischen zwei erhobenen Punkten linear verläuft und die Beschleunigung zwischen diesen Punkten entsprechend konstant ist. Je höher also die Aufzeichnungsfrequenz, also je geringer die einzelnen Zeitintervalle sind, umso besser trifft diese vereinfachte Annahme zu.

Für ein beliebiges Logging-Intervall  $\Delta T$  kann also die Beschleunigung  $a$  für zwei aufeinanderfolgende gemessene Geschwindigkeiten (unter Annahme einer linearen Bewegung) nach folgender Formel berechnet werden:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t \cdot 3,6} \quad [\text{m/s}^2] \quad (23)$$

Mit dem konstanten Logging-Intervall  $\Delta t$  [s] und der Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta v$  [km/h]

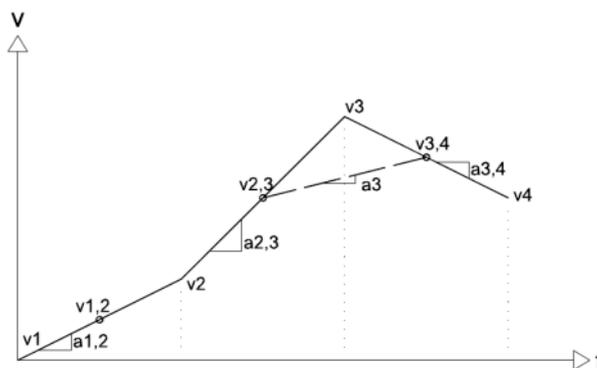
Bei Annahme einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung kann die zurückgelegte Strecke  $s$  zwischen zwei gemessenen Geschwindigkeiten durch die Multiplikation der mittleren Geschwindigkeit mit der Zeit ermittelt werden:

$$s = \frac{\Delta v}{2 \cdot 3,6} \Delta t \quad [\text{m}] \quad (24)$$

Mit der Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta v$  [km/h] im Zeitintervall  $\Delta t$  [s]

Für manche Kenngrößen wie der relativen positiven Beschleunigung (RPA) oder für die Bedingungen von Fahrmodi (vgl. Abschnitt 3.3) werden der Geschwindigkeit zugeordnete Beschleunigungen benötigt. Die nach Formel (23) bestimmte Beschleunigung ist per se der mittleren Geschwindigkeit  $v_{mean}$  zwischen zwei Datenpunkten zuzuordnen, da die Eingangsgrößen jeweils zwei Geschwindigkeits- bzw. Zeitinformationen sind. In Abbildung 14 wird aus den Geschwindigkeitswerten „v1“ und „v2“ gewonnene Beschleunigung „a1,2“ der mittleren Geschwindigkeit „v1,2“ zugeordnet, dem Mittel aus „v1“ und „v2“.

Ein mögliches Verfahren zur korrekten Zuordnung einer konstanten Beschleunigung ist im umgekehrten Sinne also die Bildung des gleitenden Mittels von zwei gemessenen Geschwindigkeiten (Abbildung 14: „v2,3“ und „v3,4“), die Bestimmung der Beschleunigung (Abbildung 14: „a3“) und die Zuordnung dieser zu der nicht gemittelten Geschwindigkeit (Abbildung 14: „v3“).



**Abbildung 14: Zuordnung von Beschleunigungs- zu Geschwindigkeitswerten**

Da aber die Berechnung der Beschleunigung ohne die Mittelwertbildung der Geschwindigkeit auskommt, kann die Beschleunigung als Vereinfachung der ersteren oder zweiten Geschwindigkeit zugeordnet werden. In Abbildung 14 ist ersichtlich, dass die Zuordnung der Beschleunigung „a3,4“ zu ersterer Geschwindigkeit („v3“) dazu führt, dass eine negative Beschleunigung zugeordnet wird, obwohl die exakt zugeordnete Beschleunigung („a3“) positiv ist. Die Auswirkungen der Zuordnung von Beschleunigungswerten zu z.B. der vorherliegenden Geschwindigkeit werden geringer, je geringer der Unterschied zwischen den Geschwindigkeiten ist. Dies kann durch eine höherfrequente Datenaufzeichnung erreicht werden.

### 4.3 Glättung der Datenreihen

Alle Messsignale enthalten Rauschen in unterschiedlichem Maß. Es kann wichtige Merkmale des Messsignals verdecken, wie Spitzen (positiv und negativ) oder Impulsbreiten. Mit GPS-Empfängern aufgezeichnete Geschwindigkeitstrajektorien, sogenannte Zeitreihen, weisen ebenso ein Rauschen auf, obwohl diese abhängig von Aufzeichnungsgerät und -software bereits einem entsprechenden Filterungs-Algorithmus unterzogen wurde (vgl. JUN et al., 2006). Ist dieses in der Geschwindigkeitstrajektorie noch nicht ersichtlich, so wird es durch die zeitliche Ableitung (Berechnung der lateralen Beschleunigung) verstärkt. Um diesem Umstand zu begegnen, werden Filterungstechniken angewendet (Filterung von Rauschen). Weiters kann mit diesen Techniken eine Korrektur von lokalen Ausreißern in der Zeitreihe erreicht werden. Neben dem Term „Filter“ wird auch von „Glätten“ gesprochen, da viele Filter auch einen Glättungseffekt aufweisen. Durch eine Glättung wird die Krümmung einer Kurve (in diesem Fall einer Geschwindigkeits-Ganglinie) verringert. Dabei soll wenig Information verloren werden bei gleichzeitiger Hervorhebung der wichtigen Eigenschaften. Geschwindigkeitstrajektorien besitzen die Eigenschaft, dass sie jedweden zufälligen Verlauf annehmen können, wobei die Krümmungen durch real maximal mögliche Beschleunigungen begrenzt sind. Es gilt also, Geschwindigkeitskurven realitätsnah abzubilden, wobei die daraus abgeleiteten Beschleunigungswerte ebenfalls von Ausreißern und Messrauschen befreit sein sollen.

In diesem Abschnitt werden grundlegende, einfache Tiefpassfilter und komplexere statistische Verfahren vorgestellt, welche mögliche Anwendungen für die Glättung von GPS-basierten Geschwindigkeitstrajektorien sind.

#### 4.3.1 Statistische Glättungsverfahren

Durch den Einsatz von einfachen Tiefpassfiltern können Datenreihen mit geringem Aufwand gefiltert bzw. geglättet werden. Tiefpassfilter dienen dazu, das Messrauschen zu verringern, indem sie hohe Frequenzen filtern. Dies kann erreicht werden, indem ein Datenpunkt den ihn umgebenden Informationen angepasst wird, was eine Glättung der Datenreihe nach sich zieht. Eine solche Glättung von Zeitreihen kann durch den **gleitende Durchschnitt** (auch gleitendes Mittel) herbeigeführt werden (KREISS&NEUHAUS, 2006). Dabei werden die Mittelwerte aus Untermengen der vorliegenden Datenpunkte gebildet. Die Untermenge wird aus einer gleich bleibenden Anzahl (Fenster) von Datenpunkten gebildet. Dieses Fenster wird nach jeder Mittelwertbildung um  $\Delta T$  (Aufzeichnungsintervall) in Richtung der Zeitachse verschoben. Wird dieses Fenster in gleichem zeitlichem Abstand vor und nach dem betrachteten Messwert gewählt, spricht man von einem symmetrischen Mittel, welches für die Anwendung auf historische Zeitreihen am besten geeignet ist (Trendschätzung: einseitig gleitendes Mittel). Dabei wird jeder Messwert  $x_t$  durch einen geglätteten Wert  $y_t$  ersetzt, jedoch stehen zu Beginn und am Ende der Messreihe für die Glättung weniger Informationen fehlen (z.B. hat die jeweils erste Messung keinen vorherigen Wert):

$$y_t = \sum_{u=-q}^q a_u \cdot x_{t-u}, t = s + 1, \dots, N - q \quad (25)$$

Mit der Gewichtung  $a_u$  und  $\sum a_u = 1$ .

Für die konstante Gewichtung  $a_u = \frac{1}{2q+1}$  wird der **einfache gleitende Durchschnitt** erzeugt. Für das symmetrische Mittel über 5 Werte ( $u = -2, \dots, 2$ ) ergibt sich  $y_t = \frac{x_{t-2} + x_{t-1} + x_t + x_{t+1} + x_{t+2}}{5}$

Durch entsprechende Wahl des Gewichtes  $a_u$  kann ein **linearer gleitender Durchschnitt** erzeugt werden, bei welchem die Nachbarn mit steigender Entfernung geringer gewichtet werden. Selbiges gilt in verstärkter Form für den **exponentiellen gleitenden Durchschnitt**. Durch das Wiederholen der Glättung mit dem gleitenden Durchschnitt kann eine weitere Glättung herbeigeführt werden.

Eine weitere Glättungsmethode ist die des **arithmetischen Mittels** für hintereinanderliegende gleich große Zeitfenster. Im Gegensatz zum gleitenden Durchschnitt weist der Datenoutput entsprechend der Länge des Zeitfensters eine geringere Frequenz auf. Je betrachtetem Zeitfenster ergibt sich für jeden Messwert  $x_f(t)$  der geglättete Wert  $y_{f_{neu}}(t)$ :

$$y_{f_{out}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{f_{out}-1} x_f(t)}{f_{out}-1} \quad [\text{km/h}]; \quad f_{out} < f \quad (26)$$

Mit  $y_{f_{out}}$ ... geglätteter Messwert in zu bestimmender Frequenz [km/h]  
 $x_f$ ... Messwert in der Frequenz der Rohdaten [km/h]  
 $f$ ... Frequenz der Rohdaten [Hz]  
 $f_{out}$ ... Frequenz des Datenoutputs [Hz]

Neben den vorgestellten einfachen Tiefpassfiltern gibt es komplexere, statistische Verfahren, von denen einige in der Literatur für Geschwindigkeitstrajektorien aus GPS-Daten verwendet werden. Für die Glättung von auf GPS-Daten basierten Geschwindigkeitstrajektorien untersucht JUN et al. (2006) die Auswirkungen auf Zufallsfehler von verschiedenen Glättungstechniken auf 1Hz-Trajektorien. Diese sind:

- **Least-Squares Spline Approximation**

In der „least-squares spline approximation“, auch genannt „piecewise polynomial regression model“ werden die vorliegenden Daten in verschiedene lokale Teilstücke eingeteilt, welche einem festen Intervall unterliegen. (z.B. 3 Sekunden: 3 Datenpunkte bei 1Hz-Trajektorien). Für jedes lokale Teilstück wird durch das lokale polynomiale Regressionsmodell eine Regressionsfunktion bestimmt, welche für die Minimierung der Summe der Fehlerquadrate (Residual Sum of Squares RSS) sorgt. Das gewählte Intervall und die Ordnung der Regressionskurve beeinflussen die Intensität der Glättung.

- **Discrete Kalman-Filter**

Der Kalman-Filter ist ein optimaler Schätzer im Sinne der kleinsten Quadrate, welcher wichtige Parameter zu ungenauen und unsicheren Beobachtungen berücksichtigen kann. Er sagt eine Beobachtung auf der Basis von vorherigen Beobachtungen vorher, und korrigiert die Vorhersageparameter durch einen Vergleich mit der aktuellen Beobachtung. Es erfolgt eine Glättung von Datenpunkten durch rekursive Änderung von Fehlerwerten. Im Gegensatz zu obigen Verfahren werden die Eigenschaften der Glättung über die Angabe des Messrauschens und des Prozessrauschens gesteuert. (siehe Unterabschnitt 4.3.2).

- **Modified Kalman-Filter**

Mit dem modifizierten Kalman-Filter konnte der große Messfehler bei schlechten Satellitenbedingungen berücksichtigt werden (Anzahl der verfügbaren Satelliten  $< 4$  und PDOP  $> 8$ ).

Für jede Glättungstechnik wurde eine Glättungsmethode definiert und auf einen großen GPS-Datensatz angewandt, um den Einfluss auf berechnete Geschwindigkeits-, Beschleunigungs- und Reisedistanzprofile abzuschätzen. Diese wurden mit den Daten des Geschwindigkeitssensors (engl.

„vehicle speed sensor“ VSS) und des „onboard diagnostics systems“ (OBD) verglichen. Ein wichtiger Punkt war dabei aus folgenden Gründen, wie die Filtertechniken mit Ausreißern umgehen:

- Für aus zeitlich äquidistant gewonnenen GPS-Geschwindigkeitsdatenpunkte resultieren aus der Anwendung der Glättungstechniken an der originalen Geschwindigkeitstrajektorie verschiedene Beschleunigungsprofile.
- Da statistische GPS-Fehler in der Geschwindigkeitstrajektorie unrealistische Beschleunigungen hervorrufen, müssen extrem hohe Beschleunigungswerte (positiv und negativ) durch die Glättungstechnik entfernt werden.
- Die Glättungstechnik erzeugt üblicherweise keine viel höheren Beschleunigungswerte (positiv und negativ), als die originalen.

Es wird festgehalten, dass der unterschiedliche statistische Hintergrund einer jeden verwendeten Glättungstechnik Besonderheiten beim Output der Geschwindigkeitstrajektorie hervorruft, die mittlere Abweichung der Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ist jedoch sehr ähnlich. Für den Fall von schlechtem Satellitensignal wurde festgestellt, dass mit dem modifizierten Kalman-Filter behandelte Daten die geringsten Abweichungen von VSS- generierten (vehicle speed sensor) Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Reisedistanzen aufwies. Bei Ausreißern führt die Least Square Spline Approximation zu übermäßigen Bewegungen der Geschwindigkeitstrajektorie, welche zu überhöhten Beschleunigungen führt

In der obigen Arbeit wird der Kalman-Filter als gute Glättungsmethode für Geschwindigkeitszeitreihen identifiziert. Im folgenden Unterabschnitt wird auf die Eigenschaften dieser Methodik eingegangen, welche für die Bearbeitung von GPS-basierten Geschwindigkeitsdaten einige Vorteile besitzt.

### 4.3.2 Der Kalman-Filter

Der Kalman-Filter ist einer der gebräuchlichsten und wichtigsten Algorithmen auf dem Gebiet der Informationsverarbeitung. Dieser Umstand ist auf die geringe erforderliche Rechenleistung, elegante rekursive Eigenschaften und den Status als idealer Schätzer für eindimensionale lineare Systeme mit gaußscher Fehlervarianz zurückzuführen (FARAGHER, 2012). Die folgende Ausführung zum Kalman-Filter ist an WELCH et al. (2001) angelehnt, welcher im betreffenden Abschnitt 4.1 den Filter in seiner originalen Formulierung (KALMAN, 1960) beschreibt, bei welchem Messungen stattfinden und der Zustand an diskreten Zeitpunkten geschätzt wird.

#### ZUSTANDSMODELL

Das Modell des Diskreten Kalman-Filters behandelt das generelle Problem, den Zustand von  $x$  eines zeitdiskreten kontrollierten Prozesses zu schätzen, der durch die lineare stochastische Differenzgleichung

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_k \quad (27)$$

bestimmt ist mit einer Messung  $z$

$$z_k = Hx_k + v_k. \quad (28)$$

Der Zustand  $x$  zum Zeitpunkt  $k$  wird bestimmt durch den Zustand  $x$  zum vorherigen Zeitpunkt  $k - 1$  (In Beziehung gesetzt durch die  $n \times n$  Matrix  $A$ ), einem optionalen Input oder Kontrollgröße  $u$  zum Zeitpunkt  $k$  (in Beziehung gesetzt durch die  $n \times l$  Matrix  $B$ ) und der Zufallsvariable  $w$  zum Zeitpunkt  $k - 1$ , welche das Prozessrauschen repräsentiert. Für sie wird angenommen, dass sie von dem Messrauschen  $v_k$  unabhängig und normalverteilt ist:

$$p(w) \sim N(0, Q) \quad (29)$$

Mit  $Q$ ... Kovarianzmatrix des Prozessrauschens

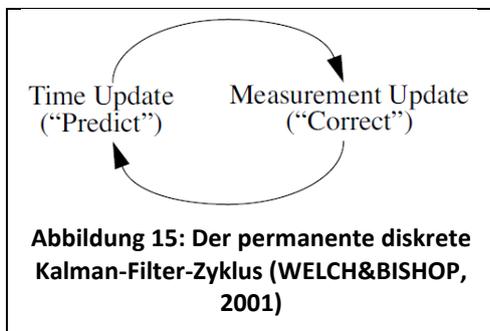
Der Term des Prozessrauschens ermöglicht es, dass das vorliegende lineare Modell Abweichungen vom linearen Verlauf (Kurven) zulässt und ist insofern für die Glättungsintensität der gemessenen Werte verantwortlich.

Die Messung  $z$  zum Zeitpunkt  $k$  kann eine oder mehrere Größen erfassen. Die  $m \times n$  Matrix  $H$  setzt den Zustand  $x_k$  in Beziehung zur Messung  $z_k$ . Die Zufallsvariable  $v$  repräsentiert das Messrauschen, für welches eine Normalverteilung angenommen wird:

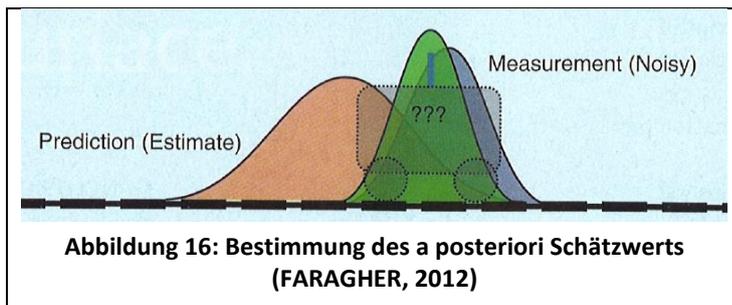
$$p(v) \sim N(0, R) \quad (30)$$

Mit  $R$ ... Kovarianzmatrix des Messrauschens

Das Messrauschen ist durch die Geräteeigenschaften vorgegeben (z.B. Genauigkeit des Messgeräts  $\pm 0,1$  m/s). Es ist zu beachten, dass im realen Einsatz die angegebenen idealen Messgenauigkeiten nicht erreicht werden (JUN et al., 2001).



Ausgehend vom Zustandsmodell schätzt der Kalman-Filter den Zustandsvektor zu einer bestimmten Zeit (time update) und bezieht in einem nächsten Schritt (measurement update) Messgrößen mit ein (siehe Abbildung 15). Der Schritt „time update“ dient dazu, den derzeitigen Zustand und die entsprechende Fehlervarianzmatrix in der Zeit nach vorne zu übertragen, um einen *a priori* Schätzwert für den nächsten Zeitschritt zu bestimmen (Vorhersage/prediction). Der Schritt „measurement update“ dient der Rückkopplung, um z.B. durch das Einbeziehen einer neuen Messung in die *a priori* Schätzung einen verbesserten *a posteriori* Schätzwert zu bestimmen (Korrektur/correction). Nach jedem Time Update und Measurement Update-Paar wird der Prozess wiederholt (rekursiver Algorithmus), mit dem vorherigen *a posteriori* Schätzwert, um den neuen *a priori*-Schätzer vorherzusagen.



Dieser Vorgang wird in Abbildung 16 veranschaulicht. Die Zustandsvektoren werden in der folgenden Ausführung vereinfacht als Werte, die zugehörigen Fehlervarianzmatrizen als Verteilung bezeichnet. Es liegt zum Zeitpunkt  $k - 1$  ein Wert mit einer bestimmten

Verteilung vor. Im Schritt „Time Update“ wird durch das Zustandsmodell ein neuer *a priori* Schätzwert  $x_k^-$  für den Zeitpunkt  $k$  bestimmt (orange Verteilung). Zum Zeitpunkt  $k$  wird der Wert  $z_k$  mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung gemessen (graue Verteilung). Diese Verteilungen werden miteinander in Verbindung gebracht und der *a posteriori* Schätzwert  $x_k^+$  mit einer neuen Verteilung (Produkt aus zwei Wahrscheinlichkeitsverteilungen - grün) bestimmt. Dieser ist der durch den Kalman-Filter ermittelte Wert und wird für den nächsten Zeitschritt als Ausgangsgröße für den *a priori* Schätzwert verwendet. Somit wird deutlich, dass die Informationen aus allen Werten vor dem aktuellen Zeitschritt durch den Kalman-Filter berücksichtigt werden, indem sie in der aktuellen Fehlervarianzmatrix berücksichtigt sind. So kann eine unendliche Anzahl von Wahrscheinlichkeitsverteilungen über die Zeit multipliziert werden, ohne die Komplexität zu erhöhen, wodurch sich ein positiver Effekt auf die benötigte Rechenleistung ergibt.

Der Kalman-Filter bietet in Bezug auf GPS-basierte Daten noch weitere Vorteile. Einer davon ist, dass der Kalman-Filter je nach Anforderung in der Zeit vorwärts (Von Zeitpunkt  $k - 1$  nach Zeitpunkt  $k$ ), rückwärts (Von Zeitpunkt  $k$  nach Zeitpunkt  $k - 1$ ), sowie vor- und rückwärts gemeinsam angewandt werden kann. Dabei ist das Zeitintervall zwischen den Zeitpunkten  $k - 1$  und Zeitpunkt  $k$  definiert durch das Logging-Intervall des GPS-Geräts. Wird eine Echtzeit-Glättung von Daten angestrebt (z.B. bei ständiger Übertragung von GPS-Geschwindigkeitstrajektorien an ein Rechenzentrum), so ist nur eine Anwendung in Vorwärts-Richtung möglich. Aufgezeichnete (historische) Daten können hingegen vor- und rückwärts angewandt werden, was durch die Berücksichtigung der Zustände vor und nach einem zu bestimmenden Wert zu besseren Ergebnissen führt. Außerdem können in Zustands- und Messmodell nicht nur Zeitreihen einer einzigen Größe integriert werden, sondern ganze Vektoren. Daher kann der Kalman-Filter auch verwendet werden, um beispielsweise die Daten aus Beschleunigungssensoren oder aus dem CAN-Bus eines Fahrzeugs in die Schätzung zu integrieren, um so sicherere Daten zu erhalten bzw. um zum Beispiel Signalausfälle zu kompensieren. Durch die Verwendung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen an jedem Punkt, welche die Streuung der neuen Schätzung beschränken, können außerdem kurzfristige Ausreißer in besonderem Maße geglättet werden, da die Wahrscheinlichkeitsverteilung des letzten Zeitschrittes vor einem Ausreißer vergleichsweise geringe Varianzen zulässt und so der neue Messwert eine entsprechend geringe Gewichtung erhält.

Da der Kalman-Filter verschiedene Eingangsgrößen in einem Schätzmodell bei vergleichsweise geringem Rechenaufwand berücksichtigen kann, wird er häufig für die Datenaufbereitung von GPS-Daten angewendet. Eine typische Anwendung ist die Positionsschätzung unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit. Im folgenden Beispiel kann ein GPS-Gerät nur rein die zweidimensionale Position bestimmen, die Geschwindigkeit wird rein über den Kalman-Filter geschätzt. Der Zustandsvektor  $x$  enthält also Position und Geschwindigkeit in x- und y-Richtung:

$$x = \begin{pmatrix} x \\ y \\ v_x \\ v_y \end{pmatrix} \quad (31)$$

Die Matrix  $A$  muss durch Multiplikation mit dem Vektor  $x$  die mathematischen Formeln für den physikalischen Zusammenhang zwischen Position und Geschwindigkeit erstellen ( $x = x_0 + v \cdot \Delta t$ ). Somit ist

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (32)$$

Die Messung  $z$  setzt sich aus  $x$  und  $v$  zusammen. Die Matrix  $H$  muss daher den Zustandsvektor  $x$  auf die Form von  $z$  bringen, welcher nur die Positionen  $x$  und  $y$  enthält, da das Messgerät nur diesen messen kann.

$$z = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (33)$$

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (34)$$

$$v = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \quad (35)$$

Zusätzlich müssen die Kovarianzmatrizen bestimmt werden. Die Kovarianzmatrix  $Q$  ist zu bestimmen und wird für dieses einfache Beispiel mit 0 belegt. Die Kovarianzmatrix  $R$  für das Messrauschen wird vom Hersteller definiert z.B. zu 5 Meter in x- und 5 Meter in y-Richtung zu

$$R = \begin{pmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{pmatrix} \quad (36)$$

Mit den Formeln 31 bis 36 könnte dieser einfache Kalman-Filter gestartet werden.

Der Kalman-Filter findet eine breite Anwendung auf dem Gebiet der Navigation und auch auf dem Gebiet der Verkehrsanalyse. Eine unvollständige **Auflistung von Anwendungen** findet sich hier:

KO et al. (2010) verwenden in ihrer Arbeit zu Effekten von Fahrer-/Fahrzeugeigenschaften auf das Beschleunigungsrauschen unter Verweis auf JUN (2006) Kalman-Filter für die Glättung von GPS-Daten, um große Datenfehler zu unterbinden.

WITTE et al. (2005) verwenden ebenfalls eine Kalman-Filterung in ihren Untersuchung zu Erhöhung der Genauigkeit von Positions- und Geschwindigkeitsdaten bei Verwendung von WAAS (Wide-Angle Augmentation System) und EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service).

In einer Untersuchung zur Genauigkeit von „non-differential“ GPS zur Geschwindigkeitsermittlung (WITTE et al., 2004) wird der Kalman-Filter angewendet, um die Effekte aus der Orbitalgeschwindigkeit der Satelliten, der Rotationsgeschwindigkeit der Erde und der Empfängerbewegung (nach Kalman, 1960) zu entfernen.

BEVLY et al. (2000) verwendet ein Kreiselsystem zur Messung der Giergeschwindigkeit und benutzt diese Daten als Eingangsparameter für einen Kalman-Filter, um die Fahrtrichtung eines Testfahrzeugs (Fahrrad) zu bestimmen.

Die optimale Glättungsmethode ist abhängig von den zu analysierenden Daten. Im folgenden Unterabschnitt wird der Einfluss von verschiedenen Glättungstechniken auf real erhobene GPS-Daten untersucht, wobei die verwendeten Daten jenen des Testfelds (Kapitel 5) entsprechen.

### 4.3.3 Einfluss von Glättungsmethoden

Die Notwendigkeit der Glättung von Geschwindigkeitstrajektorien ist durch das Rauschen der aufgezeichneten Signale und den Einfluss insbesondere auf die Beschleunigungstrajektorien gegeben. Grundsätzlich weisen die Beschleunigungswerte bei Berechnung nach Formel 31 (vgl. Formel 23; Zuordnung der Beschleunigung zum je ersten Geschwindigkeitswert vgl. Abschnitt 4.2) dieselbe Frequenz wie die Geschwindigkeitswerte auf (siehe Abbildung 17: a0 bis a29).

$$a_f(t) = f \frac{v_f(t+1) - v_f(t)}{3.6} \quad [\text{m/s}^2] \quad (37)$$

Mit  $a_f$ ... Beschleunigung in der Frequenz der Rohdaten [ $\text{m/s}^2$ ]  
 $v_f$ ... Geschwindigkeit in der Frequenz der Rohdaten [ $\text{km/h}$ ]  
 $f$ ... Frequenz der Rohdaten [Hz]

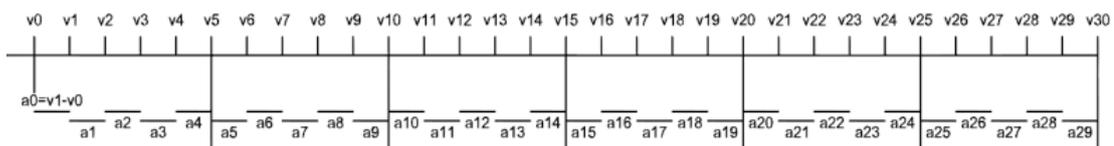


Abbildung 17: zugeordnete Beschleunigungen

In diesem Unterabschnitt werden die Einflüsse der verschiedenen Glättungsverfahren auf eine reale Geschwindigkeits- und Beschleunigungstrajektorie (10Hz-Trajektorie mit 1200 Datenpunkten) veranschaulicht. Die Originale Geschwindigkeits- und daraus abgeleitete Beschleunigungstrajektorie werden in Abbildung 18 dargestellt. Sehr deutlich ist das Rauschen des Beschleunigungsverlaufs ersichtlich.

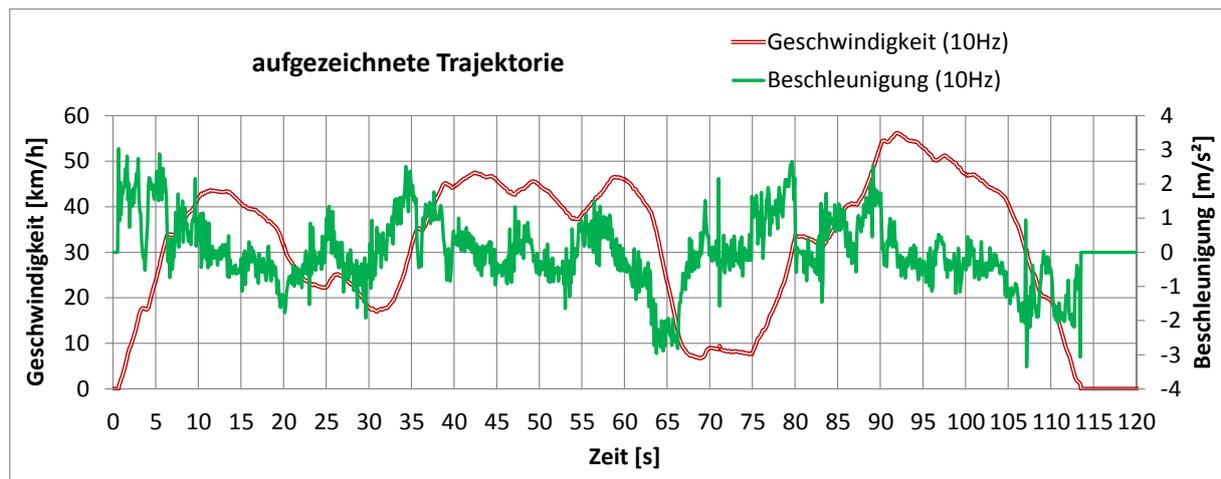


Abbildung 18: Versuchstrajektorie 10Hz (Data-Logger: Racelogic VideoVBOX, siehe Anhang)

Für eine einfache Glättung wurden zunächst die originalen Geschwindigkeitstrajektorien (Abbildung 19 oben: Trajektorie 01) dem Verfahren des **einfachen gleitenden Durchschnitts** (Trajektorie 03) mit einem symmetrischen Zeitfenster von 9 Datenpunkten, sowie einer Kalman-Filterung unterworfen. Die Anwendung des Kalman-Filters erfolgte mit Hilfe der Software VBOXTools (2003), es wurden Filter mittlerer (Trajektorie 07) und maximaler Stärke (Trajektorie 08) verwendet. Eine stärkere Glättung bedeutet eine geringere Varianz im Zustandsmodell des Kalman-Filters (vgl. Unterabschnitt 4.3.2). Es wurden sowohl die Geschwindigkeit (Speed), also auch die Position als Eingangsgrößen verwendet. Die nach Formel 31 abgeleiteten Beschleunigungswerte sind in Abbildung 19 unten aufgetragen.

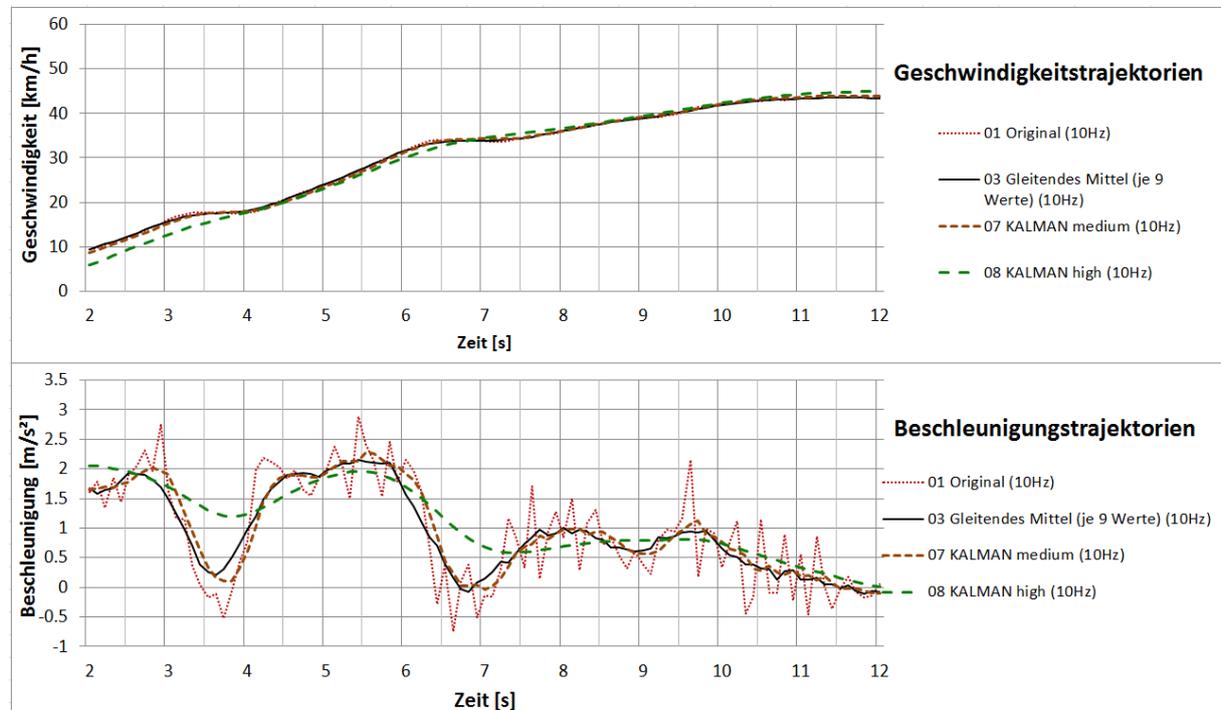


Abbildung 19: Geschwindigkeits- und Beschleunigungstrajektorien im Vergleich

Bei der Betrachtung der Geschwindigkeitstrajektorien (Abbildung 19) fällt zunächst auf, dass der Verlauf aller Trajektorien sehr glatt wirkt, auch bei der originalen Trajektorie, welche direkt aus dem GPS-Logger übernommen wurde. Es sind selbst Schaltvorgänge (bei Sekunde 3,5 und Sekunde 7) zu erkennen. Einzig bei der stark geglätteten Kurve 08 sind diese kurzfristigen Veränderungen innerhalb eines Sekundenintervalls nicht mehr festzustellen.

Dahingegen lassen sich im Plot der Beschleunigungskurven deutlich die Auswirkungen von unzureichend geglätteten Geschwindigkeitstrajektorien erkennen. Während diese allesamt einen sehr glatten Verlauf aufweisen, ist in der Beschleunigungskurve der originalen Trajektorie 01 sehr deutlich ein Messrauschen festzustellen. Während die Trajektorie 03 (gleitendes Mittel) und 07 (mittlerer Kalman-Filter) die originale Geschwindigkeitstrajektorie sehr gut repräsentieren, ist es im Falle der Trajektorie 08 nicht mehr möglich, da die Glättung zu stark ist. Die Beschleunigungskurven von Trajektorien 03 (gleitendes Mittel) und 07 (mittlerer Kalman-Filter) weisen für den gewählten Ausschnitt eine große Ähnlichkeit auf. Diese beiden Trajektorien stellen eine gute Glättung der Beschleunigungstrajektorie dar, da sie das Rauschen, nicht aber kurzfristige Änderungen im Beschleunigungsverlauf eliminieren. Im Gegensatz dazu ist Trajektorie 08 so stark geglättet, dass nicht alle kurzfristigen Änderungen berücksichtigt werden. Dies deckt sich mit den Beobachtungen aus dem Geschwindigkeitsverlauf.

Ein weiterer, im vorliegenden Plot nicht ersichtlicher, Effekt der Kalman-Filterung ist, dass Geschwindigkeiten ob der Glättung bei kurzen Halten nicht Null werden. Dies ist in der Berechnung der Kenngrößen gesondert zu berücksichtigen, z.B. in Form einer Grenzgeschwindigkeit für die Definition eines Halts.

Der Kalman-Filter stellt sich in obigen Beobachtungen als sehr gutes Werkzeug zur Glättung von Geschwindigkeitsverläufen hinsichtlich der daraus errechneten Beschleunigungsverläufe heraus. Im nachfolgenden Abschnitt werden weitere mögliche Glättungsmethoden im Sinne des gleitenden und arithmetischen Durchschnitts aufgeführt. Anschließend werden die Auswirkungen von verschiedenen Mittelungsverfahren auf ausgewählte Kenngrößen der Geschwindigkeit und Beschleunigung untersucht.

### Weitere Glättung der Beschleunigungswerte

Eine weitere Glättung der Beschleunigungswerte kann beispielsweise basierend auf aus direkt aus den Geschwindigkeitswerten gewonnenen Beschleunigungswerten (vgl. Abbildung 17:  $a_0$  bis  $a_9$ , vgl. Formel 23) nach dem Prinzip der arithmetischen Mittelung hintereinanderliegender Zeitfenster (vgl. Abbildung 20: A1 bis A3) erfolgen.

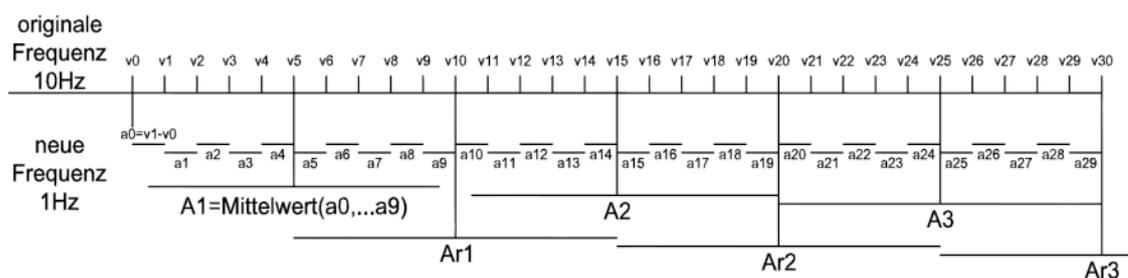


Abbildung 20: Arithmetisches Mittel von Beschleunigungen I

In vereinfachter Schreibweise ergibt sich diese zu

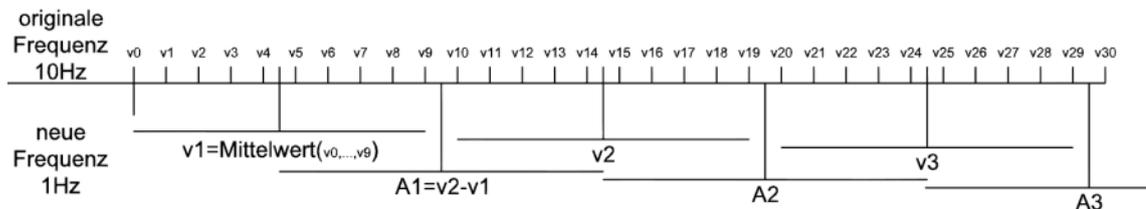
$$a_{f_{out2.1}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{f-1} a_f}{\frac{f}{f_{out}} - 1} \quad [m/s^2] \quad (38)$$

- Mit
- $a_{f_{out}}$ ... Beschleunigung in Frequenz des Outputs[m/s<sup>2</sup>]
  - $a_f$ ... Beschleunigung in der Frequenz der Rohdaten [m/s<sup>2</sup>]
  - $f$ ... Frequenz der Rohdaten [Hz]
  - $f_{out}$ ... Frequenz des Datenoutputs [Hz]

Es ist möglich, durch ein gleitendes Mittel, in diesem Falle über je zwei benachbarte Werte  $a_{f_{neu2.1}}(t)$  eine weitere Glättung im Sinne des gleitenden Mittels herbeizuführen (Abbildung 20: Ar1 bis Ar3):

$$a_{f_{out2.2}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^2 a_{f_{out2.1}}}{2} \quad [\text{m/s}^2] \quad (39)$$

Ein weiteres mögliches Verfahren führt zunächst über die arithmetische Mittelwertbildung der Geschwindigkeitswerte zu  $v_{f_{out}}$  nach Formel 26 (vgl. Abbildung 21: v1 bis v3).



**Abbildung 21: Arithmetisches Mittel von Beschleunigungen II**

Die Beschleunigung wird aus der Differenz zweier gemittelter Geschwindigkeitswerte ermittelt (Abbildung 21: „A1“, „A2“, „A3“).

$$a_{f_{out1}}(t) = \frac{f}{f_{out}} \frac{v_{f_{out}}(t+1) - v_{f_{out}}(t)}{3.6} \quad [\text{m/s}^2] \quad (40)$$

Mit  $v_{f_{out}}$ ... Geschwindigkeit in Frequenz des Outputs [km/h]  
 $a_{f_{out}}$ ... Beschleunigung in Frequenz des Outputs [m/s<sup>2</sup>]

Diese beiden Beispiele veranschaulichen die vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten der Glättung in verschiedenen Stufen mit gleitendem und arithmetischem Mittel. Die Beschleunigungen werden dabei auf der Zeitachse unterschiedlich verschoben (vgl. Abbildung 19 und Abbildung 20). In Anwendungen, bei welchen eine genaue Zuordnung von v- und a-Werten (z.B. Relative Positive Beschleunigung RPA) eine Rolle spielt, ist auf diesen Effekt Rücksicht zu nehmen.

Die Auswirkungen der Mittelungsverfahren lassen sich quantitativ festhalten. Hierzu wurde die verwendete Trajektorie (siehe Abbildung 18) hinsichtlich Maximal-, Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeit, sowie hinsichtlich minimaler, maximaler und Standardabweichung der Beschleunigung (siehe Tabelle 7) untersucht. Zur Ermittlung der Beschleunigung wurde nach Formel 31 die Differenz aus je zwei aufeinanderfolgenden Geschwindigkeiten gebildet. Es wurden verschiedene Glättungen mit Tiefpassfilter untersucht (Verfahren 01 bis 06), sowie Kalman-Filter mit verschiedenen Glättungsintensitäten unter Berücksichtigung von Geschwindigkeits- und Positionsdaten (Verfahren 07, 08). Um die Unterschiede der nach verschiedenen Verfahren (01 bis 06 und 01 bis 08) bestimmten maximalen Größen zu veranschaulichen, wurde der Multiplikator m berechnet, welcher ausgehend vom Maximalwert aller Verfahren (inklusive der Originaldaten) den Minimalwert bestimmt:

$$m = \frac{x_{min} - x_{max}}{x_{max}} \quad (41)$$

Mit  $m$ ... Multiplikator  
 $x_{min}$ ... Minimalwert einer Größe  
 $x_{max}$ ... Maximalwert einer Größe

**Tabelle 7: Auswirkung von verschiedenen Logging-Intervallen und Mittelungsmethoden auf Geschwindigkeit und Beschleunigung**

Bezeichnung	Beschreibung	$v_{\max}$ [km/h]	$v_{\text{mittel}}$ [km/h]	$\sigma_v$	$a_{\min}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{\max}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\sigma_a$
<b>01</b> Original	10Hz Trajektorie	56.181	31.069	15.672	<b>-3.353</b>	<b>3.028</b>	0.985
<b>02</b> Gleitendes Mittel (je 3 Werte)	10Hz; Je 3 v-Werte (1 zurück + 1 nach) werden gemittelt	56.142	31.069	15.669	-2.709	2.507	0.921
<b>03</b> Gleitendes Mittel (je 9 Werte)	10Hz; Je 9 v-Werte (4 zurück und 4 vor) werden gemittelt	55.974	31.069	15.649	-2.578	2.233	0.880
<b>04</b> Arithmetisches Mittel (je 9 Werte)	1Hz; Arithmetische Mittelung von v-Blöcken zu je 9 Werten	55.658	30.838	15.871	-2.338	1.966	0.858
<b>05</b> Gleitendes (je 3 Werte) nach arithm. Mittel in v	1Hz; Gleitendes Mittel von je 3 v-Werten auf Basis arithmetisch gemittelter Werte (je 9)	55.179	30.846	15.669	-2.312	1.562	0.779
<b>06</b> Downscaling	1Hz; Löschen von je 9 v-Punkten; Gleichzusetzen mit 1Hz-Datenlogging	56.181	30.852	15.902	-2.465	2.187	0.878
<b>Multiplikator m</b>	<b>01 bis 06</b>	<b>-0.018</b>	<b>-0.007</b>		<b>0.310</b>	<b>-0.484</b>	
<b>07</b> KALMAN medium	10Hz; KALMAN-Filter mittlerer Stärke	56.288	31.086	15.763	-2.597	2.756	0.910
<b>08</b> KALMAN high	10Hz; KALMAN-Filter hoher Stärke	<b>57.109</b>	<b>31.188</b>	16.121	-2.844	2.053	0.935
<b>Multiplikator m</b>	<b>01 bis 08</b>	<b>-0.034</b>	<b>-0.011</b>		<b>0.310</b>	<b>-0.484</b>	

Es wird ersichtlich, dass die verschiedenen Mittelungsverfahren auf die mittleren Geschwindigkeiten einen geringen Einfluss haben (Multiplikator  $m$  für die Verfahren 01 bis 06  $= -0.018$  für  $v_{\max}$  bzw.  $-0.007$  für  $v_{\text{mittel}}$ ), die Beschleunigungen aber stark auf die Datenbearbeitung reagieren (Veränderungen im Vergleich zur Originaltrajektorie mit den höchsten Beschleunigungs- und Verzögerungswerten  $a_{\max}$  bzw.  $a_{\min}$  von bis zu 31 bzw. 48 Prozent). Die stärkste Glättung unter den angewandten Verfahren weist das zweistufige Verfahren 05 auf, bei welchem arithmetisch gemittelte Geschwindigkeitswerte einer weiteren gleitenden Durchschnittsbildung unterzogen werden. Der Vergleich von Verfahren 03 und 04 offenbart, dass die gleitende Mittelwertbildung (03) bei einem verwendeten Kern von 9 Datenpunkten eine geringfügig geringere Mittelung als das arithmetische Mittelwertverfahren (04) mit 9 Datenpunkten aufweist hinsichtlich aller untersuchten Kenngrößen mit Ausnahme der Streuung  $\sigma_v$  der Geschwindigkeiten (z.B. mittlere Geschwindigkeit bei Verfahren 03 mit 55.97 km/h um 1.8% höher als bei Verfahren 04 mit 55.66 km/h). Jedoch bleiben bei der gleitenden Mittelwertbildung die Informationen in der Frequenz der Originaltrajektorie erhalten. Das Downscaling der Originaltrajektorie (Verfahren 09) führt zu geringeren Maximal- und Minimalwerten der Beschleunigung als Verfahren 03 (gleitendes Mittel von 9 Datenpunkten), jedoch zu größeren Streuungen der Geschwindigkeitswerte, sowie einer höheren gemessenen maximalen Geschwindigkeit. Dies ist darauf zurückzuführen, dass weniger Datenpunkte für die Mittelung zur Verfügung stehen und Extrema der Originaltrajektorie nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 10% (im Fall des Beispiels) getroffen werden, was zu einer Glättung führt, Maximalwerte in der Geschwindigkeit jedoch ident mit jenen der Originaltrajektorie sein können ( $v_{\max,01} = v_{\max,02}$ ). Dies kann bei einer gleitenden Mittelwertbildung oder auch einem arithmetischen Verfahren nicht der Fall sein, sofern die Maxima nicht für die Dauer des gewählten Glättungskerns auftreten.

Die Datenbearbeitung mit Kalman-Filtern (Verfahren 07 und 08) führen zu erhöhten Werten der maximalen und mittleren Geschwindigkeit, sowie der Standardabweichung der Geschwindigkeit bei gleichzeitiger Verringerung der mittleren Beschleunigung und Verzögerungen. Dies bedeutet, dass der verwendete Kalman-Filter lokale Maxima der Geschwindigkeitstrajektorie erhöht, während die einzelnen Datenpunkte jedoch geglättet werden, was sich in geringeren Beschleunigungswerten niederschlägt. Die Verstärkung der Maxima der Geschwindigkeitstrajektorie ist auf die Einbeziehung

der Positionsinformationen zurückzuführen. Dieser Effekt wird in Unterabschnitt 4.4.2 veranschaulicht, da er im Falle von Satellitenausfällen (folgender Unterabschnitt 4.4: GPS-Verfügbarkeit) sehr deutlich zu beobachten ist. Der Effekt des Überschätzens von lokalen Maxima der Geschwindigkeitstrajektorien durch den verwendeten Kalman-Filter kann durch die Nicht-Berücksichtigung von Positionsdaten vermieden werden.

### **Schlussfolgerung**

Der Glättungsalgorithmus ist jeweils an die Messdaten anzupassen und hängt im Wesentlichen vom verwendeten Aufzeichnungsgerät ab. Für die vorliegenden 10Hz-Daten wurden durch eine Kalman-Filterung realistische geglättete Geschwindigkeitstrajektorien erzeugt, in welchen selbst Details wie Schaltvorgänge erkennbar sind bei gleichzeitiger Filterung des Messrauschens. Die Einbindung von mit demselben Gerät erhobenen Positionsdaten eignen sich nicht als weitere Eingangsgröße für die Kalman-Filterung, da dadurch stärkere Ausschläge anstatt einer Glättung von Geschwindigkeitsdaten bewirkt werden können. Dieser Umstand wird in Unterabschnitt 4.4.2 weiter betrachtet.

## **4.4 GPS-Verfügbarkeit**

GPS-Datenpunkte können nur bei bestehender Sichtverbindung zu den Satelliten aufgezeichnet werden. Daher weisen Datenaufzeichnungen je nach der Position der Satelliten und der die Sichtverbindung behindernden Bebauung Lücken auf. Diese Lücken können je nach Ursache örtlich immanent sein (z.B. Tunnel, Unterführungen) oder zu einem gewissen Maß unsicher, z.B. bei hoher bzw. naher Bebauung zum Straßenquerschnitt. Diese unsicheren Signalausfälle sind in der Regel zeitlich sehr begrenzt (von Sekundenbruchteilen bis zu einigen Sekunden). Dies führt dazu, dass Trajektorien auf derselben Strecke unterschiedliche Signalausfälle aufweisen können hinsichtlich Dauer, Ort und Anzahl. Entsprechend kann nur ein geringer Anteil an fehlerhaften Datenpunkten zu gültigen Trajektorien führen, da ansonsten Trajektorien auf derselben Strecke bedingt durch örtlich verschiedene Signalausfälle diese nicht gleichwertig repräsentieren würden.

Bezugsgrößen für Analysen der Vollständigkeit können sowohl die Streckenlänge (konstant für Untersuchungen an gleichen Trajektorien) oder die Fahrdauer (nicht konstant) auf der Strecke sein.

### **Bezugsgröße Streckenlänge des Signalausfalls**

Die Länge der Strecke, auf welcher ein Signalausfall auftritt, ist nur über Map-Matching bestimmbar. Durch die Kenntnis des Ortes des Signalausfalls, des Ortes der Wiedererkennung des Signals und der Kenntnis der befahrenen Strecke kann die Länge der Strecke des Signalausfalls bestimmt werden.

### **Bezugsgröße Dauer des Signalausfalls**

Die Dauer des Signalausfalls kann durch die Ermittlung der Zeitspanne zwischen Signalverlust und neuerlichem Signalerhalt gemessen werden. Bei konstantem Logging ist die Dauer eines Signalausfalls entsprechend der Loggingrate direkt proportional zur Anzahl der kompromittierten Datenpunkte. KO et al. (2010) benutzen nach JUN (2006) das Verhältnis von „schlechten Datenpunkten“ (engl. „bad data points“) zur „Gesamtzahl an Datenpunkten“ (engl. „total number of data points“, um einen GPS-Track zu bewerten. Dieses Verhältnis wird engl. „bad data rate“ genannt. Durchfährt ein Fahrzeug einen Abschnitt mit schlechtem Satellitensignal mit geringer Geschwindigkeit, so wird der zeitliche Signalausfall relativ höher ausfallen, als bei Durchfahren des selben Abschnitts mit einer höheren Geschwindigkeit, während der streckenbezogene Signalausfall gleich bleibt. Bei der Analyse von streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten, welche in zeitkontinuierlichen Intervallen gewonnen werden, eignet sich dennoch die Bestimmung des

zeitlichen Signalausfalles als Einflussfaktor, da kinematische Kenngrößen ebenfalls aus zeitkontinuierlichen Intervallen gewonnen werden.

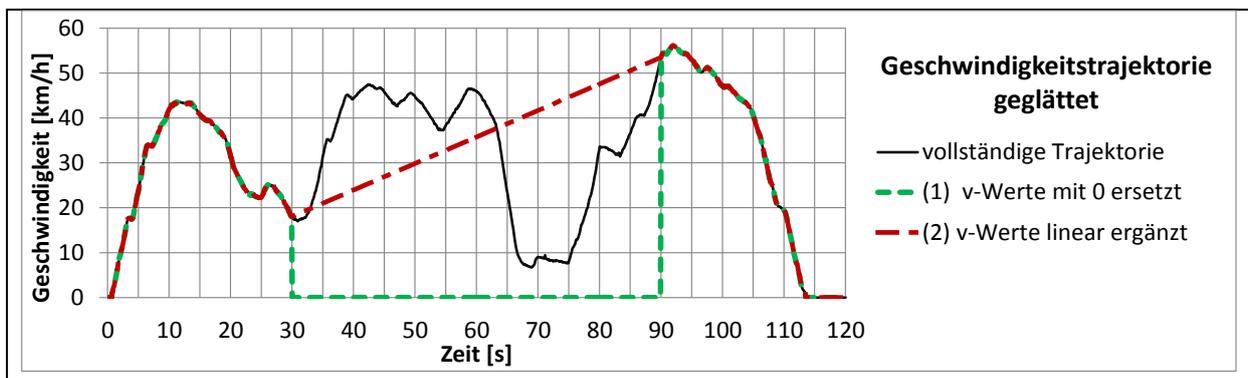
Der tatsächliche Einfluss eines Signalausfalls auf eine Kenngröße hängt jedoch von der zu bestimmenden Kenngröße selbst ab. Beispielsweise kann je nach Art der Berechnung die mittlere Reisegeschwindigkeit aus dem Quotienten der befahrenen Strecke und der Reisezeit oder aus dem Mittelwert aller geloggtten Geschwindigkeitswerte ermittelt werden. Für ersteres Verfahren werden die Information der Streckenlänge (als statische bekannte Größe), sowie die Zeitinformation aus erstem und letztem Zeitstempel benötigt. Kompromittierte Datenpunkte dazwischen wirken sich in diesem Falle nicht auf die mittlere Reisegeschwindigkeit aus, während dies bei der Ermittlung der mittleren Reisegeschwindigkeit aus dem Mittelwert der einzelnen Geschwindigkeitswerte sehr wohl der Fall ist.

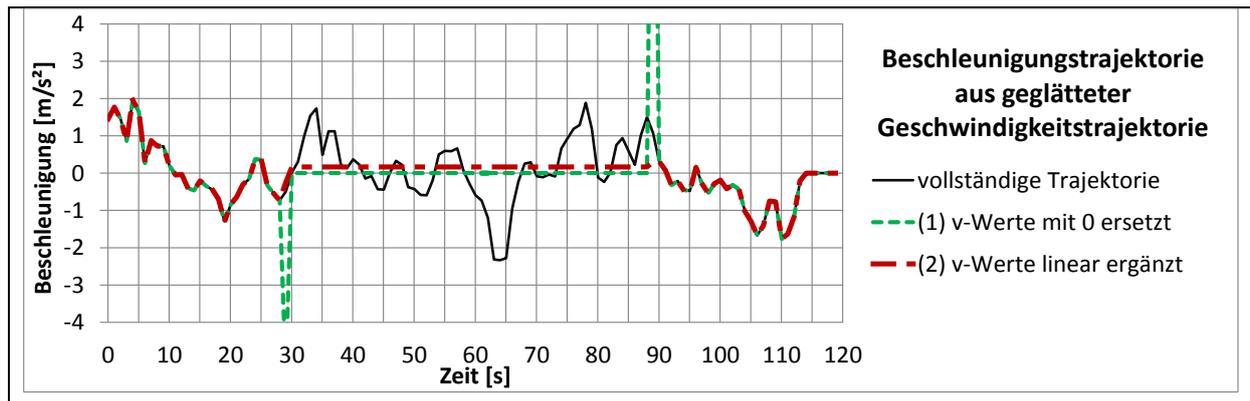
Der Einfluss von Signalausfällen auf fahrdynamische Kenngrößen, welche sich der Informationen der einzelnen Datenpunkte einer Trajektorie bedienen, wird in den folgenden Abschnitten verdeutlicht. Dabei werden die Auswirkung von Signalverlusten und mögliche Anwendungen zur Datenkorrektur veranschaulicht. Als Basis dient dabei eine im Grazer Stadtgebiet aufgezeichnete Trajektorie, welche mit einem künstlichen Signalverlust versehen wird.

#### 4.4.1 Auswirkung von Signalverlusten auf Geschwindigkeit und Beschleunigung

Abgesehen von Bereichen immanenter Nichtverfügbarkeit von Satelliteninformationen (z.B. Tunnel, Unterführungen) sind Signalausfälle zeitlich begrenzt (Bruchteil einer Sekunde bis zu mehreren Sekunden) und es kann ihnen durch den Einsatz von Beschleunigungssensoren begegnet werden. Deren Information kann durch geeignete Algorithmen (z.B. einem Kalman-Filter) für die Ergänzung von Geschwindigkeitstrajektorien an Stellen von Signalverlusten genutzt werden. Stehen für die Zeit von Signalverlusten keine weiteren Daten zur Verfügung, können diese fehlenden Daten beispielsweise durch lineare Ergänzung erzeugt oder gefiltert werden.

In diesem Teil soll durch einen künstlich herbeigeführten Signalausfall veranschaulicht werden, welche Auswirkungen dieser auf Geschwindigkeit, Beschleunigung und daraus abgeleitete statistische Größen haben kann. Es wird dieselbe Trajektorie im städtischen Gebiet (maximale Geschwindigkeit  $\sim 50$  km/h) von zwei Minuten Länge herangezogen wie in Unterabschnitt 4.3.3). Betrachtet werden die originalen 10Hz- Geschwindigkeits- bzw. die aus Differenzbildung errechnete Beschleunigungstrajektorie. 50% der Daten (Sekunde 30 bis 90) werden als ungültig definiert (bad data rate = 0.5). Es werden drei verschiedene Herangehensweisen zur Behandlung von Signalverlusten betrachtet, welche je nach Anwendung eingesetzt werden können, und mit der Originaltrajektorie verglichen (siehe Abbildung 22).





**Abbildung 22: Geschwindigkeits- und daraus berechnete Beschleunigungstrajektorie: Behandlung von Signalverlust (Sekunde 30 bis 90)**

1. Ersetzen von ungültigen Werten mit Null (Abbildung 22: Trajektorien (1))

Dieses Verfahren wird untersucht, da verschiedene handelsübliche Messgeräte bei Signalverlust die Geschwindigkeitswerte mit Null angeben.

Durch das Auffüllen mit äquidistanten Zeitintervallen können einfache Anwendungen, welche die Beschleunigung nur auf Basis von zeitlich äquidistanten Geschwindigkeitswerten bestimmen können, ohne weitere Datenbearbeitung betrieben werden. Jedoch wird dabei je nach Länge und Ausprägung von Geschwindigkeitswerten einer Trajektorie der Mittelwert der Geschwindigkeit verringert. Ein weiterer gravierender Nachteil ist, dass bei Wiedererlangen des Signals durch die zeitliche Ableitung extreme und entsprechend unrealistische Sprünge in der Beschleunigungskurve auftreten. Diese sollten in einem weiteren Schritt gefiltert oder geglättet werden.

2. Filterung von ungültigen Werten

Um sicherzugehen, dass nur nicht kompromittierte Daten als Berechnungs- und/oder Analysegrundlage dienen, ist diese Herangehensweise geeignet.

Es werden nur gültige Daten betrachtet, Auswertungen beziehen sich also auf erhobene und geprüfte Daten. Bei geringen Signalverlusten führt dies zu einem besseren Ergebnis für Beschleunigungskenngrößen, da Ausreißer vermieden werden. Die Streuung von Geschwindigkeit und Beschleunigung wird also korrekt ausgegeben unter der Prämisse, dass für die Anzahl der von einem Signalausfall betroffenen Datenpunkte keine Daten vorhanden sind. Summengrößen wie z.B. die positive kinetische Energie oder auch die aus den einzelnen Geschwindigkeitsdatenpunkten berechnete Distanz (vgl. Abschnitt 4.2) werden jedoch unterschätzt.

3. Lineare Ergänzung von ungültigen Werten (Abbildung 22: Trajektorien (2))

Bei diesem Verfahren werden die fehlenden Daten der Geschwindigkeitstrajektorie ergänzt, indem der letzte gültige mit dem letzten ungültigen Wert linear miteinander verbunden wird. Es erfolgt im Vergleich zum obigen Verfahren eine Schätzung des Geschwindigkeitsverlaufs, wodurch Mittelwerte der Trajektorie weniger von einer vollständigen Trajektorie abweichen. Außerdem treten keine unrealistischen Sprünge im Beschleunigungsverlauf bei Signalverlust auf.

Dieses Verfahren ist beispielsweise für die Bestimmung der zurückgelegten Distanz aus Geschwindigkeitswerten sinnvoll, da für den Fall korrekter vorheriger und nachfolgender Datenpunkte (Geschwindigkeit und Zeit) ebenfalls die korrekte mittlere Geschwindigkeit und somit die tatsächlich zurückgelegte Distanz bestimmt werden kann. Dieses Verfahren wird bei Frequenz-unabhängigen Berechnungsverfahren von Kenngrößen angewendet, also der

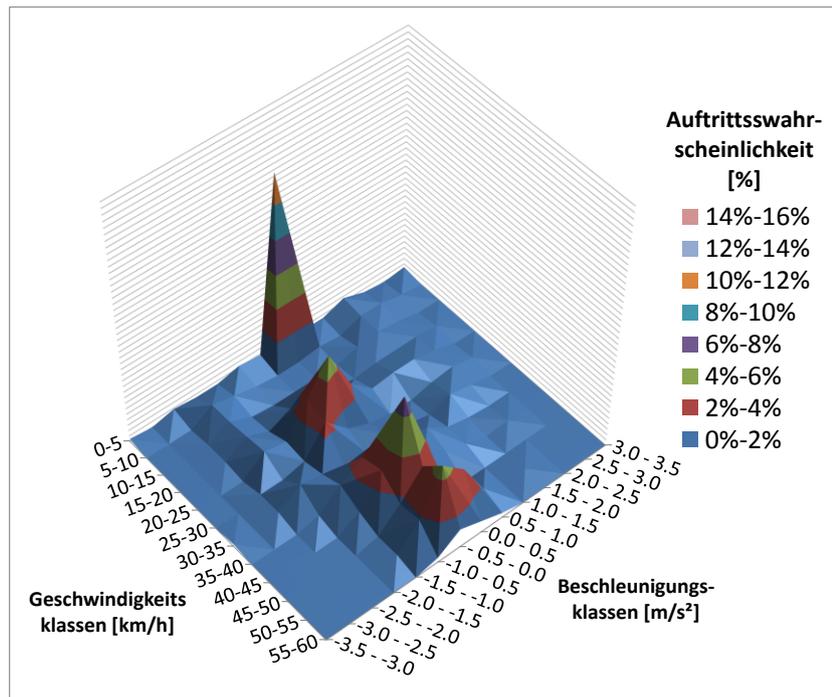
automatischen Berechnung des Zeitintervalls zwischen jedem Datenschnitt ohne Filterung. Da dieses Verfahren einer Form der Glättung entspricht (Downscaling) weisen die Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte für den entsprechenden Bereich eine deutlich geringere Streuung auf.

Bei realen, zu verschiedenen an derselben Strecke aufgenommenen, Messdaten können Signalausfälle an unterschiedlichen Stellen auftreten, da die Satellitenpositionen zeitlich ständig variieren. Dies führt dazu, dass als gültig definierte Daten an unterschiedlichen Stellen auftreten können und somit nicht dieselbe Strecke repräsentieren. Dies gilt für alle drei Verfahren.

Der Einfluss der verschiedenen Verfahren auf Geschwindigkeit und Beschleunigung wird in Abbildung 23 in einem 3D-Plot verdeutlicht. Hierzu wurde eine Matrix aus Geschwindigkeitsklassen in 5 km/h-Schritten und Beschleunigungsklassen (ungeglättet) in 0,5 m/s<sup>2</sup>-Schritten gebildet, um jeden Wert der Trajektorie (zehn je Sekunde) entsprechend zuzuordnen. In Abbildung 23 werden diese relativen Klassen-Ausprägungen auf der z-Achse dargestellt. Diese sind auf 16 Prozent skaliert.

Die Teile der Trajektorie zwischen Sekunde 0-30 und 90-120 repräsentieren den Anfang und das Ende des betrachteten Intervalls, für welcher ein korrekter Signalempfang angenommen wird. Die Aufzeichnung beginnt und endet im Stillstand. Daraus resultiert das Starke Gewicht der Beschleunigungen (positiv und negativ) bei geringen Geschwindigkeiten. Die starke Streuung der Beschleunigungswerte ist auf die Verwendung einer ungefilterten 10Hz-Trajektorie zurückzuführen. Es wird deutlich, dass das Ersetzen von fehlenden Werten (Sekunde 30 bis 90) – insbesondere bei einem langen oder vielen Signalausfällen – einen starken Einfluss auf die Geschwindigkeits-Beschleunigungs-Verteilung hat. Die originale Gesamttrajektorie 0 weist viele Beschleunigungen im Bereich geringer als auch hoher Geschwindigkeit, sowie eine Verteilung der Beschleunigungen im Bereich von -1.5 bis +1.5 m/s<sup>2</sup> auf. Indes erzeugen die Ersatzwertverfahren (Trajektorie 1 und 3, Sekunde 30-90) entsprechend der Ergänzungen eine starke Erhöhung der anteiligen Beschleunigungswerte im Bereich von 0,0 bis 0,5 m/s<sup>2</sup>. Bei Verfahren 1 liegen diese entsprechend genau bei 0 km/h (Skalierung der z-Achse für diesen Fall 100%). Bei Trajektorie 2 verteilt sich diese Spitze gleichmäßig auf die Geschwindigkeitsbereiche, die zwischen Signalausfall und Wiedererlangen des Signals liegen.

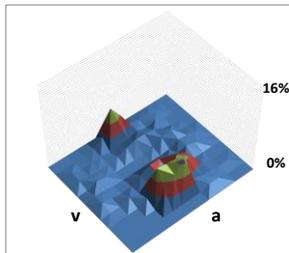
Die verschiedenen Verfahren sorgen für eine gravierende und verschiedenartige Umverteilung von Geschwindigkeit und Beschleunigung (Abbildung 23 unten: „gesamte Trajektorie“). Die Verteilung bei Trajektorie 3 ist ob der Filterung der ungültigen Werte ohne Ersatz gleich jener der Ausgangstrajektorie von Sekunde 0-30 und 90-120.



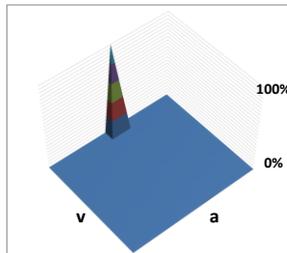
Bereich vor und nach dem künstlichen Signalausfall  
(Sekunde 0 bis 30 und 90 bis 120)

+

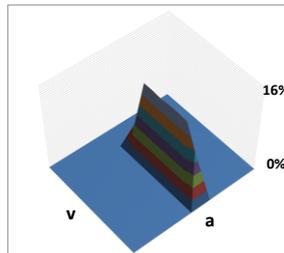
Trajektorie 0  
Originaltrajektorie



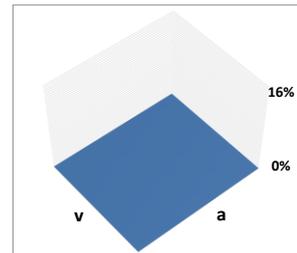
Trajektorie 1  
Werte mit Null ersetzt



Trajektorie 2  
Werte linear ersetzt

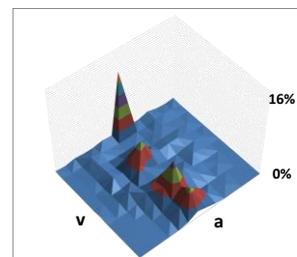
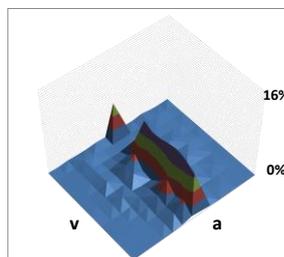
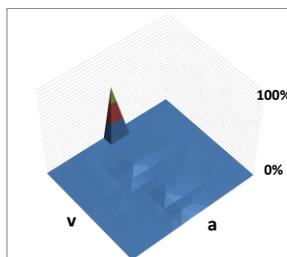
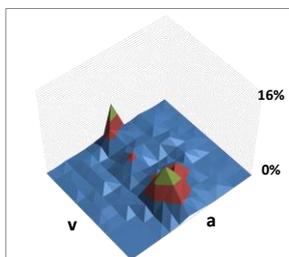


Trajektorie 3  
Werte nicht ersetzt



Sekunde 30 bis 90

=



Gesamte rajektorie

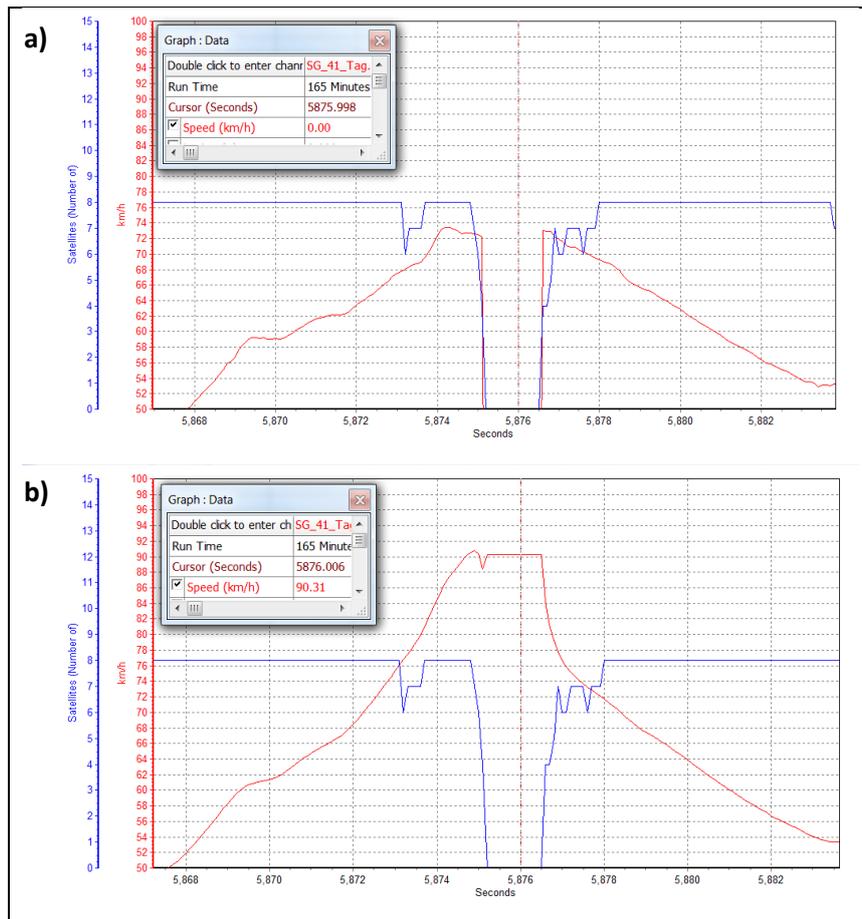
**Abbildung 23: Vergleich von verschiedenen Verfahren zur Behandlung von Datenlücken**

Eine weitere Methode ist die Glättung über Signalverluste mit Hilfe des Kalman-Filters. Dies wird im Unterabschnitt 4.4.2 betrachtet.

#### 4.4.2 Kalman-Filter bei Signalverlusten

Das System VideoVBOX (Spezifikation siehe Anhang), welches für die Erzeugung der Geschwindigkeitstrajektorien herangezogen wurde, loggt im Falle von Signalverlusten 0 km/h (Verfahren 1 aus Unterabschnitt 4.4.1) Durch die Anwendung des Kalman-Filters (vgl.

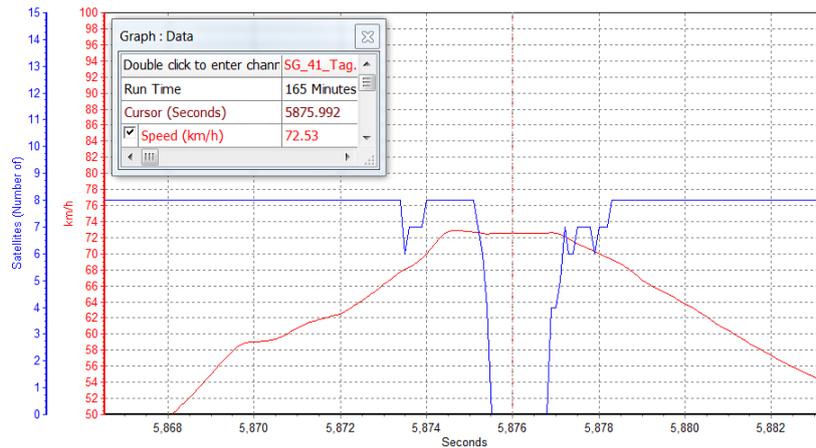
Unterabschnitte 4.3.2 und 4.3.3) kann über den Bereich eines kurzfristigen Satellitenausfalls geglättet werden. In Abbildung 24 a) ist ein einzelner Satellitenausfall (Dauer: ~1 Sekunde) dargestellt. Der angewendete Kalman-Filter unter Berücksichtigung der Positionsdaten (Abbildung 24 b) führt zu einer Überbewertung der Geschwindigkeit bei Signalausfällen (Sekunde 5875 bis Sekunde 5876,5), da auch die aufgezeichneten Positionsdaten bei einem Signalverlust fehlerhaft sind. Außerdem führt der Kalman-Filter auch vor einem Signalausfall zu erhöhten Geschwindigkeitswerten (Sekunde 5871 bis Sekunde 5875), während nach dem Signalausfall nur die gewünschte Glättung, aber keine signifikante Veränderung in der Höhe der Geschwindigkeitswerte feststellbar ist.



**Abbildung 24: Angewendeter KALMAN-Filter – Ausschnitt (VBOXTools, 2003); Original-Trajektorie (a); Trajektorie mit Kalman-Filter geglättet (Speed + Position) (b)**

Eine weitere Möglichkeit ist die temporäre lineare Ergänzung von Geschwindigkeitsdaten bei kurzen Signalverlusten und eine anschließende Kalman-Filterung ohne Einbindung der Positionsdaten. Die Glättung von Geschwindigkeitsdaten mit eben diesen als einzige Eingangsdaten schafft zufriedenstellend geglättete Trajektorien, bei welchen kurze Satellitenausfälle zufriedenstellend geglättet werden (siehe Abbildung 25).

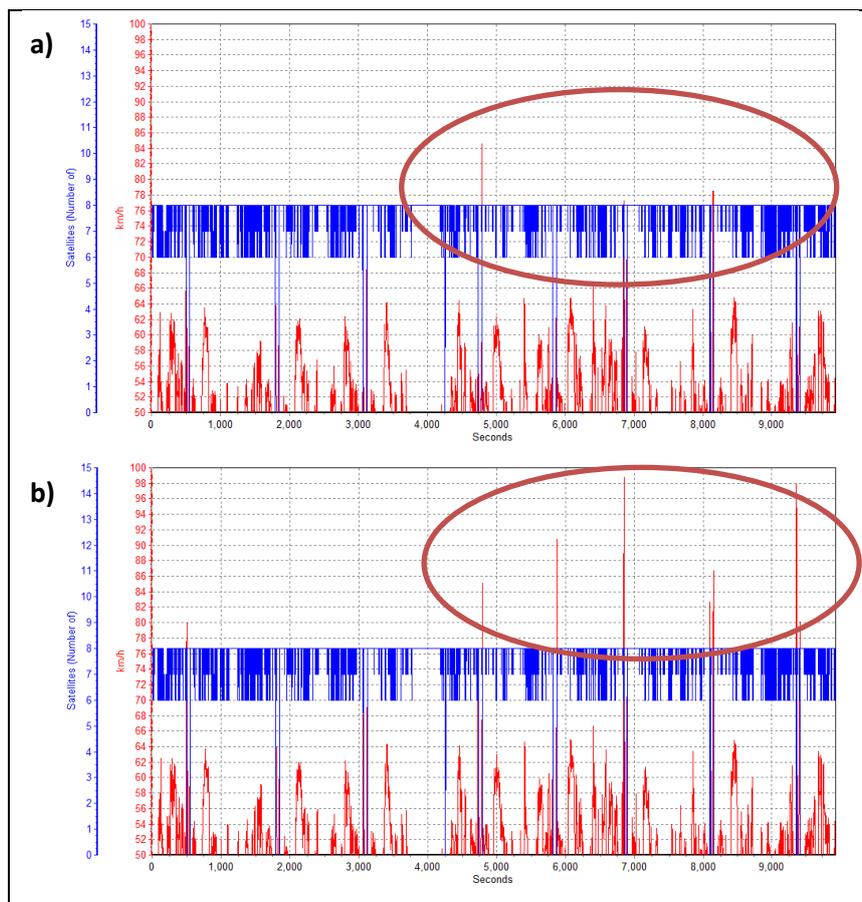
## Erfassung und Aufbereitung streckenbezogener Einzelfahrzeugdaten



**Abbildung 25: Ausschnitt einer Trajektorie, mit Kalman-Filter geglättet (Speed)**

Zusätzlich können mit dem Kalman-Filter bei Wiedererlangen eines Satellitensignals auftretende Ausreißer berücksichtigt werden.

Bei der in Abbildung 26 dargestellten Trajektorie sind diese Ausreißer gravierend. Die Signalverluste sind durch einen Einbruch der Anzahl der Satelliten gekennzeichnet (blaue Ganglinie), welche sich in der Regel zwischen sechs und acht bewegt. Alle Ausreißer der Geschwindigkeitstrajektorie (rote Ganglinie) werden durch den nicht richtig angewendeten Kalman-Filter (Abbildung 26 unten) verstärkt. Am deutlichsten treten diese Ausreißer im markierten Bereich zutage.



**Abbildung 26: Einfluss des Kalman-Filters bei einem Signalverlust – ganze Trajektorie (VBOXTools, 2003); Original-Trajektorie (a); Trajektorie mit Kalman-Filter geglättet (b)**

### 4.4.3 Zusammenfassung

Verschiedene Kenngrößen reagieren je nach ihren Eigenschaften verschieden stark auf Signalausfälle. Grundsätzlich können die aus GPS-Daten gewonnenen Kenngrößen entsprechend ihrer benötigten Datenbasis in folgende beiden Gruppen unterschieden werden:

- Mittelwerte aus Anfangs- und Endpunkt
- Kenngrößen aus gesamtem Fahrverlauf

Zu ersterer Gruppe zählen jene Kenngrößen, die bereits dann bestimmt werden können, wenn nur die Position bzw. der Zeitstempel des Trajektorienanfangs und des Trajektorienendes bekannt sind. Daraus lassen sich (bei bekanntem Streckenverlauf) die Distanz, mittlere Geschwindigkeit, Reisezeit, Verlustzeit etc. bestimmen. Wird also ein Untersuchungsgebiet so gewählt, dass an Anfang und Ende zuverlässig Satellitensignale empfangen werden können, sind dies sichere Kenngrößen. Dieselben Kenngrößen können auch über Kennzeichenerfassungssysteme generiert werden.

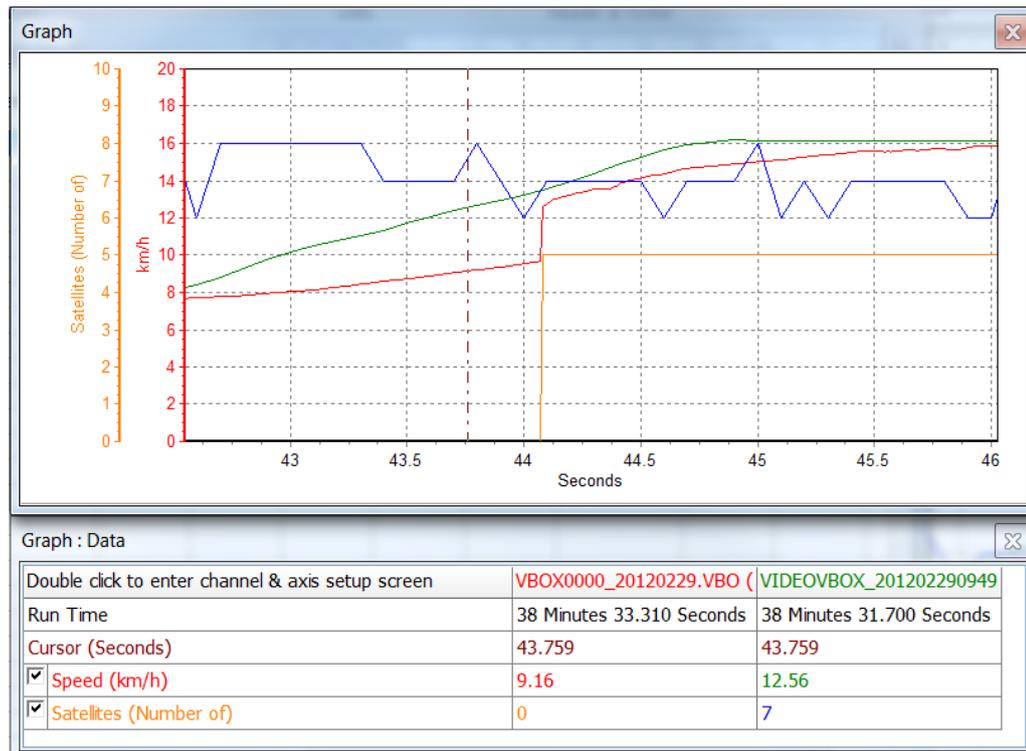
Kenngrößen, welche für ihre Berechnung die Datenpunkte aus dem gesamten Fahrverlauf benötigen (Gruppe 2), reagieren hingegen auf Signalverluste. Dabei kann keine pauschale Aussage über die Stärke der Auswirkungen getroffen werden, da hierauf sehr viele Einflussfaktoren wirken. Diese sind

#### 1. Interne Datenverarbeitung der GPS-Tracker

Unterschiedliche Geräte verwenden je nach Hard- und Softwareeigenschaften unterschiedliche Algorithmen zum Bestimmen und Validieren von Positions-, Zeit- und Geschwindigkeitsdaten. Entsprechend kann der Fall eintreten, dass ein System einen validen Datenpunkt ausgibt, ein anderes einen Signalverlust deklariert. In Abbildung 27 wird dies beispielhaft veranschaulicht: Die dargestellten Trajektorien wurden bei Messfahrten erhoben, bei welchen zwei Systeme nebeneinander auf einem Fahrzeug angebracht wurden. Für den betrachteten Zeitraum (Sekunde 42,5 bis 46) wird rot der Geschwindigkeitsverlauf des Systems VBOX (Hersteller: Racelogic, 100 Hz Aufzeichnungsrage) dargestellt, orange die zugehörige Anzahl von verfügbaren Satelliten. Dem gegenübergestellt findet sich in grün der Geschwindigkeitsverlauf des Systems VideoVBOX (Hersteller: Racelogic, Aufzeichnungsrage 10 Hz, Satellitenanzahl blau – Spezifikation siehe Anhang).

Die Ganglinie der VBOX (rot) wird erzeugt durch eine Komposition aus GPS-Daten und Beschleunigungssensor, weshalb auch ohne eine ausreichende Anzahl von Satelliten ein Geschwindigkeitsverlauf abgebildet werden kann (Bereich vor Sekunde 44). Im vorliegenden Betrachtungszeitraum tritt aber trotz des Beschleunigungssensors bei Wiedererlangen des Satellitensignals ein Sprung in der Geschwindigkeitsganglinie auf, welcher bei der Berechnung von Kenngrößen, welche sich der Beschleunigung bedienen, zu Ausreißern führt.

Weiters ist ersichtlich, dass das System der VideoVBOX durchgehenden Satellitenempfang aufweist (zwischen 6 und 8 Satelliten), die VBOX jedoch nur ab der Sekunde 44 fünf verfügbare Satelliten aufweist. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass das System VBOX andere Einstellungen z.B. für den minimalen Erhebungswinkel eines Satelliten aufweist. Doch ausschlaggebend ist die interne Datenverarbeitung der Geräte, welche für den Nutzer der Tracker nicht einsehbar sind. Der eklatante Unterschied der verfügbaren Satelliten vor Sekunde 44 (0 bei VBOX, 6-8 bei VideoVBOX) ist drauf zurückzuführen, dass bei beiden Systemen die Anzahl der verfügbaren Satelliten als Null angegeben wird, wenn der Satellitenempfang nicht ausreicht, um eine Positionierung bzw. Geschwindigkeitsmessung vorzunehmen.



**Abbildung 27: Vergleich der Geschwindigkeitsganglinie zweier GPS-Logger (VBOXTools, 2003)**

Dies führt dazu, dass bereits das verwendete Gerät zur Aufzeichnung der GPS-Daten einen nicht unwesentlichen Einfluss auf die Datenqualität nimmt.

## 2. Postprocessing

Im Postprocessing können Datenfehler, welche auf Signalverluste zurückzuführen sind, durch eine genaue Vorgehensweise minimiert werden. Beispielsweise loggen die vorliegenden Systeme eine Geschwindigkeit von 0 km/h, wenn ein Signalausfall herrscht. Bei Wiedereinsetzen des Signals wird die aus den Satellitensignalen bestimmte Geschwindigkeit weiter aufgezeichnet. Bei der Berechnung der Beschleunigung tritt nun ein Maximum genau an dieser Stelle auf, da – je nach Aufzeichnungsintervall – ein Geschwindigkeitssprung von 0 auf x km/h in sehr kurzer Zeit auftritt. Die Filterung solcher gerätespezifischer Phänomene im Postprocessing ist unumgänglich. Es gibt aber auch andere Faktoren außer der verfügbaren Satelliten, welche auf einen Signalverlust oder auf ein „schlechtes“ Signal schließen lassen. Es können z.B. neben den DOP-Faktoren (Siehe Abschnitt 4.1) unrealistische Beschleunigungs- oder Drehraten als Indikatoren zur Bewertung der Signalqualität herangezogen werden. Dabei ist zu beachten, dass beispielsweise die Gierrate (Drehung eines Winkels um die Hochachse innerhalb einer Zeit) aus den Positionsdaten ermittelt werden muss, Geschwindigkeitswerte aber unter Umständen nicht direkt aus diesen, sondern über den Doppler-Effekt ermittelt werden und somit nicht in direktem Zusammenhang stehen.

## 3. Eigenschaften der Ganglinien

Wichtige Einflussfaktoren auf die Auswirkung von Signalverlusten sind aber auch die Geschwindigkeit bei Signalausfall und die Streckenlänge der untersuchten Trajektorie. Befindet sich z.B. ein von Abschattungen betroffener Teil in einem vergleichsweise schnellen Teil der Strecke, wird selbst bei kurzem Signalausfall ein relativ großer Teil der Strecke in der Ganglinie nicht abgebildet. Ein angenommener Signalausfall von nur zwei Sekunden bei 50

km/h führt zu einer Nichtberücksichtigung von  $50/3,6*2 = 28$  Metern. Bei einem Abschnitt von 280 Metern sind dies zehn Prozent an nicht verfügbaren Daten.

Neben der Verfügbarkeit ist das Logging-Intervall, also die Aufzeichnungsrate des Messgeräts, von besonderer Bedeutung für die Ausprägung von Kenngrößen. Dies wird in Abschnitt 4.5 untersucht.

## 4.5 Einfluss des Aufzeichnungsintervalls

Das Aufzeichnungs- oder Logging-Intervall wirkt sich direkt auf den Umfang der erhobenen Datenpunkte und in weiterer Folge auf die Ausprägung von Kenngrößen aus. In diesem Teil wird der Einfluss des Logging-Intervalls auf reale Trajektorien untersucht.

### 4.5.1 Einfluss auf die Datenmenge

Um den Einfluss des Logging-Intervalls auf Kenngrößen festzustellen, wurden real erhobene Trajektorien einem „Downscaling“ unterzogen. Dies bedeutet, dass einzelne Datenpunkte von aufgezeichneten Trajektorien gelöscht wurden. Der erste aufgezeichnete Datenpunkt ist dabei auch bei den Trajektorien niedriger Frequenz der erste, folgende Datenpunkte sind je nach Logging-Frequenz gelöscht. Verwendet wurden dabei die in Kapitel 5 beschriebenen Trajektorien (266 Trajektorien). Auf diese Weise konnten aus vorhandenen 10 Hertz-Daten 5 Hertz, 1 Hertz und 0,2 Hertz-Trajektorien gewonnen werden. Für 1-Hertz-Daten werden dabei jeweils 9 von 10 Datenpunkten gelöscht, um je Sekunde einen Datenpunkt zu erhalten.

In Abbildung 28 wird diese Vorgehensweise anhand eines Abschnitts einer aufgezeichneten Trajektorie auf der Wienerstraße (Knotenpunkt 2 KP2: Knoten Wiener Straße – Shopping Nord) veranschaulicht. Bei dem gewählten Maßstab erscheinen die Datenpunkte der originalen 10Hz-Daten als durchgehende Linie und ermöglichen so die Abbildung eines durchgehenden Geschwindigkeitsverlaufs (farbliche Hinterlegung der Trajektorie je gemessener Geschwindigkeit von 0 = rot über 50 = grün bis 90 = blau). Dagegen können die Datenpunkte bei halbiertes Datenmenge (5 Hz) bereits mit freiem Auge unterschieden werden.

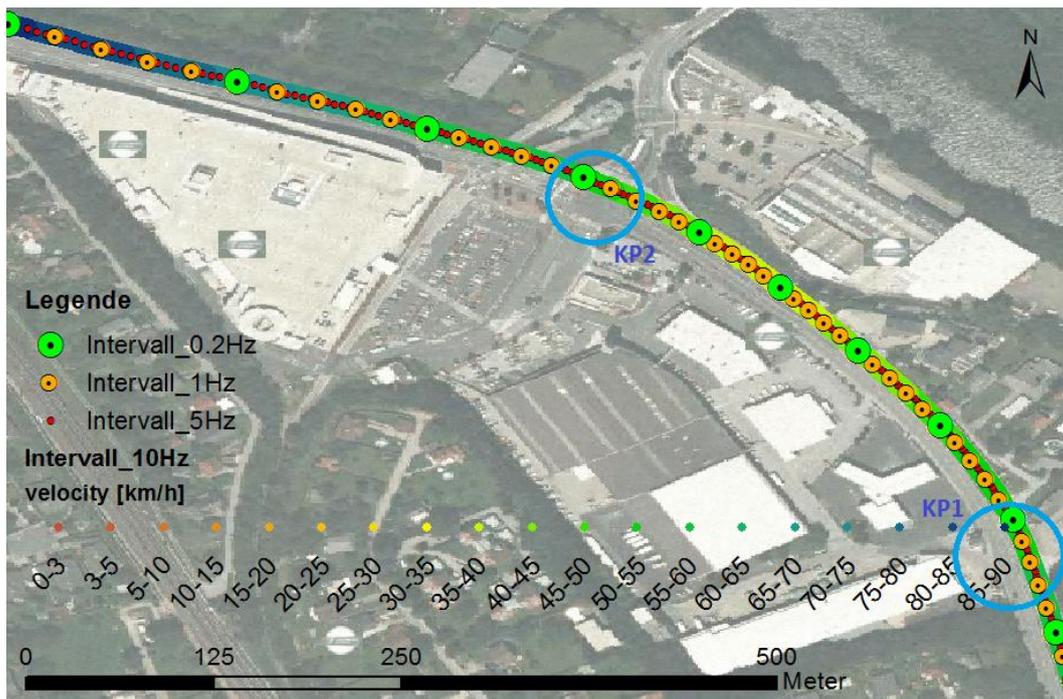


Abbildung 28: Verortung von Logging-Punkten unterschiedlicher Aufzeichnungsraten

Bei idealen Messungen werden Datenpunkte je gefahrener Geschwindigkeit in einem bestimmten Abstand gemessen. Dieser theoretische Abstand kann berechnet werden durch

$$\Delta d = \frac{v}{f} \quad [m] \quad (42)$$

mit der Geschwindigkeit  $v$  [m/s] und der Aufzeichnungsfrequenz  $f$  [Hz].

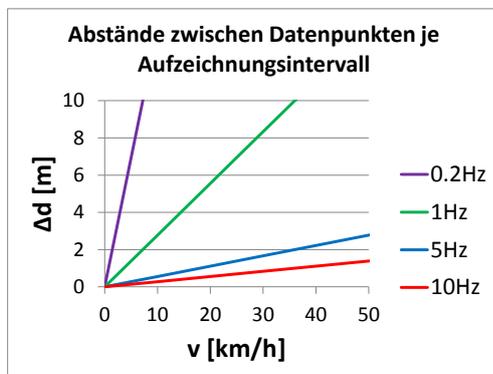


Abbildung 29: Abstand von Datenpunkten je Aufzeichnungsintervall

Die Abstände der Datenpunkte verhalten sich indirekt proportional zur Aufzeichnungsfrequenz. Sie sind für einen Überblick in Abbildung 29 und in Tabelle 8 für die (konstanten) Geschwindigkeiten 10, 30, 50 und 80 km/h für die Logging-Frequenzen 10, 5, 1 und 0,2 Hertz zusammengefasst. Im 10Hz-Modus liegen im städtischen Bereich bei mittleren Geschwindigkeiten von 30 bis 50 km/h Datenpunkte im Abstand von etwa einem Meter vor. Für den Bereich zwischen den beiden Knotenpunkten KP1 und KP2 in Abbildung 28 (Abstand ~350 m, mittlere Geschwindigkeit ~ 50 km/h) liegen im 10 Hz-Modus etwa 250 Datenpunkte vorliegend, im 1 Hz-

Modus 25 (gelb) und im 0,2 Hz-Modus 5 (grün).

Tabelle 8: Theoretischer Abstand [m] von gemessenen Datenpunkten bei verschiedenen Geschwindigkeiten

Logging-Intervall	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0,2 Hz
10 km/h	0,28	0,56	2,78	13,89
30 km/h	0,83	1,67	8,33	41,67
50 km/h	1,39	2,78	13,88	69,44
80 km/h	2,22	4,44	22,22	111,11

Daraus wird ersichtlich, dass insbesondere für kurze Abschnitte die Datenbasis bei geringeren Logging-Raten sehr gering wird. Für Untersuchungen von kurzen Abschnitten (z.B. zwischen zwei Lichtsignalanlagen) sind daher große Logging-Frequenzen nötig, um eine ausreichende Datenbasis für die Bestimmung von fahrdynamischen Kenngrößen zu erhalten, da sich die Logging-Frequenz auf berechnete mikroskopische Kenngrößen auswirkt.

#### 4.5.2 Einfluss auf ermittelte Kenngrößen

In diesem Unterabschnitt wird die Auswirkung des Logging-Intervalls für ausgewählte Kenngrößen untersucht. Hierfür wurden die 10Hz-Trajektorien jenen mit 5, 1 und 0.2 Hz gegenübergestellt. Für jede Trajektorie wurde für jeweils alle Kenngrößen der Quotient aus 10Hz- und 5Hz-Modus (bzw. 1 und 0.2 Hz) gebildet. Der Mittelwert dieses Quotienten ist ein mittlerer Umrechnungsfaktor von 5 Hz (bzw. 1 und 0.2 Hz) zu 10Hz-Daten. Durch die Standardabweichung dieser mittleren Umrechnungsfaktoren wird beschrieben, mit welcher Streuung diese behaftet sind. Da sich die Standardabweichungen je nach Ausprägung des jeweiligen Mittelwerts verhalten und so nicht für verschiedene Kenngrößen vergleichbar sind, wurde der empirische Variationskoeffizient als Quotient von Standardabweichung und Mittelwert gebildet. Ein Variationskoeffizient von 0.01 bedeutet, dass 68,3% der realen Umrechnungsfaktoren um 1% um ihren Mittelwert streuen. Hingegen bedeutet ein Variationskoeffizient von 0.15, dass 68,3% der realen Umrechnungsfaktoren um 15% über und unter dem mittleren Umrechnungsfaktor liegen können. Je höher der Variationskoeffizient, umso unsicherer ist also der Umrechnungsfaktor. Durch Bildung von Klassen des jeweiligen

Variationskoeffizienten der mittleren Umrechnungsfaktoren können diese hinsichtlich ihrer Streuung beurteilt werden.

In Tabelle 9 sind neben den mittleren ermittelten Kenngrößen die Umrechnungsfaktoren für ausgewählte Kenngrößen auf Basis der vorhandenen Messdaten ersichtlich. Ein Umrechnungsfaktor >1 bedeutet eine größere Ausprägung der Kenngrößen in einem feineren Logging-Intervall, während ein Umrechnungsfaktor <1 für eine Verringerung der Kenngrößen bei feinerem Logging steht. Die Einteilung der Variationskoeffizient-Klassen ist durch hinterlegte Farben markiert, die Klasseneinteilung in Tabelle 9 unter „Legende“ ersichtlich. Durch die Farbgebung wird deutlich, dass bei abnehmender Datengrundlage (geringeres Logging-Intervall) die Genauigkeit der Umrechnungsfaktoren abnimmt. Während eine um die Hälfte verringerte Datenmenge eine Rückrechnung für viele Kenngrößen noch im Bereich des Variationskoeffizienten von 0,01 ermöglicht (Umrechnungsfaktor 5Hz->10Hz), wird dies für den Vergleich 1Hz->10Hz nur noch für die Größen T, Dist\_sum, v1 und v2 erreicht, während für die meisten Größen im 0.2Hz-Modus nach der vorgenommenen Skalierung keine sichere Umrechnung mehr möglich ist. Auf die einzelnen aufgelisteten Kenngrößen wird in den weiteren Ausführungen eingegangen.

**Tabelle 9: Umrechnungsfaktoren der Kenngrößen je Aufzeichnungsrate**

Kenngröße	Beschreibung	Einheit	Mittelwert 10Hz-Modus	Umrechnungsfaktor			Legende Variationskoeffizient
				5Hz->10Hz	1Hz->10Hz	0.2Hz->10Hz	
T	Reisezeit	s	340.49	1.000	1.003	1.015	< 0.01
Dist_sum	Distanz	m	3577.80	1.000	1.004	1.021	< 0.02
v1	mittlere Geschwindigkeit	km/h	38.42	1.000	1.001	1.007	< 0.05
v2	mittlere Geschwindigkeit ohne Halte	km/h	44.05	1.000	1.001	1.003	< 0.1
vmax	maximale Geschwindigkeit	km/h	66.69	1.000	1.002	1.024	< 0.15
a_sd	Acceleration Noise	m/s <sup>2</sup>	0.63	1.006	1.048	1.251	> 0.15
amax	maximale Beschleunigung	m/s <sup>2</sup>	3.22	1.033	1.213	1.918	
amin	minimale Beschleunigung	m/s <sup>2</sup>	-3.06	1.025	1.167	1.774	
a_MVG	Mean Velocity Gradient	1/s	0.07	1.006	1.046	1.242	
PKE_sum	Positive Kinetische Energie (Summe)	m/s <sup>2</sup>	1347.47	2.010	10.453	62.139	
PKE_avg	Positive Kinetische Energie (Mittel)	m/s <sup>2</sup>	0.96	1.009	1.067	1.301	
RPA	Relative Positive Beschleunigung	m/s <sup>2</sup>	1.91	2.022	11.077	82.475	
t_0	Reisezeit bei freier Fahrt	s	257.60	1.000	1.004	1.021	
t_verlust	Verlustzeit	s	82.89	0.999	0.990	0.983	
cong_index	Congestion Index	-	0.41	0.999	0.986	0.962	
v_verlust	Verlustgeschwindigkeit	km/h	11.58	0.999	0.983	0.942	
a_pos_SW_ANT	Anteil positiver Beschleunigung	%	0.32	1.004	1.014	1.067	
a_neg_SW_ANT	Anteil negativer Beschleunigung	%	0.36	1.003	1.039	1.174	
v_still_SW_ANT	Anteil Stillstandszeit	%	0.14	0.999	0.996	0.982	
v_cruis_SW_ANT	Anteil Cruising-Zeit	%	0.20	0.989	0.923	0.707	
v_creep_SW_ANT	Anteil Creeping-Zeit	%	0.12	1.006	1.019	1.286	
anzHalte	Anzahl der Halte	-	2.38	1.000	0.989	1.018	
ndpos	Nulldurchgänge neg. zu pos. Beschl.	-	96.17	1.399	2.787	7.413	
ndneg	Nulldurchgänge pos. zu neg. Beschl.	-	96.49	1.398	2.774	7.515	
a_pos_SW_SUM	Positive Beschleunigung (Summe)	m/s <sup>2</sup>	656.36	2.011	10.499	63.280	
a_pos_SW_AVG	Positive Beschleunigung (Mittel)	m/s <sup>2</sup>	0.62	1.001	1.031	1.153	
a_neg_SW_SUM	Negative Beschleunigung (Summe)	m/s <sup>2</sup>	-636.61	2.011	10.529	64.407	
a_neg_SW_AVG	Negative Beschleunigung (Mittel)	m/s <sup>2</sup>	-0.52	1.002	1.010	1.073	

Die Art des Downscalings, also das sich wiederholende Filtern von einer bestimmten Anzahl an Datenpunkten, spiegelt sich in der Größe der Reisezeit T.

Sie wird aus der Differenz zwischen erstem und letztem Zeitstempel gebildet. Während der erste Zeitstempel für alle Logging-Modi I ident ist, liegt der letzte Zeitstempel bei I<10Hz vor oder ist ident mit dem letzten bei I=10Hz. Der maximale zeitliche Abstand  $\Delta t_{max}$  (siehe Formel 37) des letzten Datenpunkts einer Trajektorie mit verringerter Datenfrequenz  $I_{dec}$  [Hz] vor dem letzten Datenpunkt der originalen Trajektorie  $I_{orig}$  [Hz] beträgt

$$\Delta t_{max} = \frac{1}{I_{dec}} - \frac{1}{I_{orig}} \quad [s] \quad (43)$$

Somit ergeben sich geringfügig höhere Werte bei genauerem Logging, im Fall 1Hz->10Hz beträgt diese Vergrößerung im Mittel drei Promille. Dasselbe gilt entsprechend für die aus einzelnen Geschwindigkeitswerten errechnete gesamte zurückgelegte Distanz  $Dist\_sum$ .

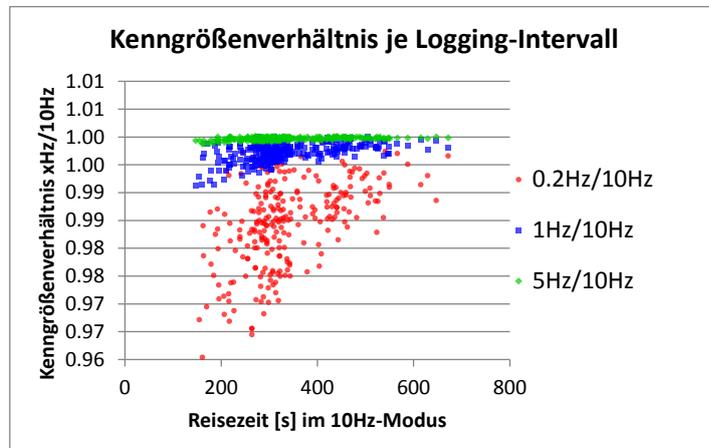


Abbildung 30: Kenngrößenverhältnis je Logging-Intervall: Reisezeit

In Abbildung 30 sind die Quotienten aus der Reisezeit bei 10 Hz und der jeweiligen Reisezeit bei geringerer Logging-Frequenz (Kehrwert des Umrechnungsfaktors) aufgetragen. Durch die Aufzeichnung von mehr Datenpunkten bei längeren Reisezeiten (bedingt durch eine längere Strecke oder geringere Durchschnittsgeschwindigkeit) nähert sich das Verhältnis der Reisezeit (10Hz-Modus zu geringerer Logging-Frequenz) bei steigender Reisezeit an 1 an, da ein einzelner (der letzte)

Datenpunkt einen geringeren Einfluss auf die gesamte Trajektorie hat. Weiters ist die Abweichung größer, je geringer das Logging-Intervall ist. Bei einer Reisezeit von 200 Sekunden sind im vorliegenden Fall bis zu 4% Abweichung (10Hz/0.2Hz) möglich (siehe Abbildung 30), bei 10Hz/1Hz maximal 0.9% Abweichung (Im Mittel 0.3%, siehe Tabelle 9).

Aus den Größen in Abbildung 30 kann weiters näherungsweise auf die Abweichung der Reisezeit bei Datenverlust von einem Datenpunkt geschlossen werden. Insbesondere kurze Trajektorien mit der Logging-Frequenz von 1Hz sollten im Bereich von bis zu 180 Sekunden bereits bei nur einem fehlerhaften Datenpunkt ausgeschlossen werden, um im Vergleich zu 10Hz-Trajektorien einen maximalen Fehler von 1% der Reisezeit zuzulassen. Es ist zu beachten, dass beim Splitten von realen Trajektorien niedrigerer Frequenz als 10Hz an fixen Punkten an beiden Enden (vgl. Unterabschnitt 5.1.4) ein doppelter maximaler Fehler im Vergleich zu obigen Daten möglich ist, bei welchen die Daten nur an einem Ende je Intervall geschnitten werden.

Im weiteren werden die Kenngrößen aus Tabelle 9 unterschieden nach mittleren, Anteils- und Summenkenngrößen und hinsichtlich ihrem Verhältnis je Logging-Intervall betrachtet.

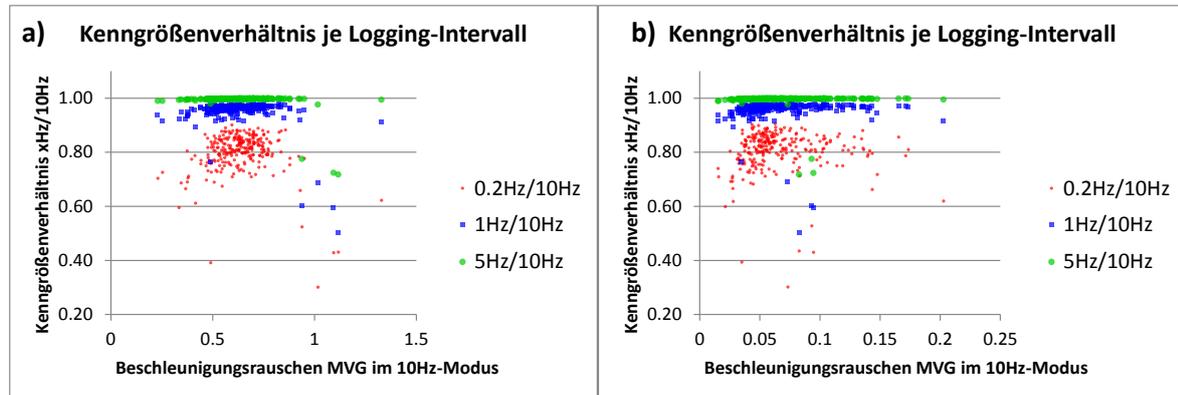
### MITTLERE KENNGRÖSSEN

Die mittlere Geschwindigkeit  $v_1$  [m/s] (bzw.  $v_2$ : mittlere Geschwindigkeit ohne Halte) wird aus den einzelnen geloggtten Geschwindigkeitswerten gebildet und ist ebenfalls bei genauerem Logging geringfügig höher. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Geschwindigkeitsspitzen sehr kurzfristig auftreten, während Minima mit einem Halt einhergehen. Da diese in der Regel nicht nur in einem Sekundenbruchteil auftreten, können Geschwindigkeitsminima im Gegensatz zu Maxima auch bei geringerer Logging-Frequenz bestimmt werden. Dass bei hochfrequentem Logging die Geschwindigkeitsspitzen ( $v_{max}$  [m/s]) genauer erfasst werden, wird durch den mittleren Umrechnungsfaktor von 1,002 (1Hz->10Hz) bzw. 1,024 (0.2Hz->10Hz) bestätigt. Dies ist auf den in Glättungseffekt durch Downscaling zurückzuführen.

Noch deutlicher wird dieser Glättungseffekt in den Beschleunigungskenngrößen (Einheit:  $m/s^2$ )  $a_{sd}$  (Standardabweichung der Beschleunigung = Acceleration Noise ACN),  $a_{max}$  (Maximale Beschleunigung),  $a_{min}$  (maximale Verzögerung) und  $a_{MVG}$  (Mean Velocity Gradient). Die Spitzen in positiver und negativer Beschleunigung werden durch das Downscaling geglättet, die

Beschleunigungsspitzen  $a_{\max}$  bzw.  $a_{\min}$  fallen im 10Hz-Modus um 21 bzw. 17% höher aus, als im 1Hz-Modus. Zudem sind diese Faktoren mit erheblichen Unsicherheiten behaftet.

Ähnliches gilt für die mittleren positiven ( $a_{\text{pos\_SW\_AVG}}$  [ $\text{m/s}^2$ ]:  $a_{\min}$  0,1  $\text{m/s}^2$ ) bzw. mittleren negativen Beschleunigungen ( $a_{\text{neg\_SW\_AVG}}$  [ $\text{m/s}^2$ ]:  $a_{\max}$  -0,1  $\text{m/s}^2$ ), welche im 1Hz-Modus im Vergleich zum 10Hz-Modus um bis zu 3 Prozent unterschätzt werden bei einem relativ geringen empirischen Variationskoeffizienten von  $<0,05$ .



**Abbildung 31: Kenngrößenverhältnis je Logging-Intervall: Beschleunigungsrauschen (a) und Mean Velocity Gradient (b)**

In Abbildung 31 sind die Umrechnungsfaktoren über den realen 10Hz-Trajektorien aufgetragen für das Beschleunigungsrauschen ACN (a) und den mittleren Geschwindigkeitsgradient MVG (b). Es ist ersichtlich, dass bei der Umrechnung 10Hz/1Hz (blau) und 10Hz/5Hz (grün) nur einige wenige Ausreißer sowohl bei ACN, als auch bei MVG für die große Streuung der Umrechnungsfaktoren verantwortlich sind. Die Kenngrößen ACN und MVG weichen in Einzelfällen im 1Hz-Modus um bis zu 50% von jenen im 10Hz-Modus ab.

Neben einer anzunehmenden mittleren Geschwindigkeit bei freier Fahrt ist die zurückgelegte (gemessene) Distanz **dist\_sum** [m] Eingangsgröße für die Bestimmung der mittleren Reisezeit bei freier Fahrt **t\_0** [s], welche wiederum in die Verlustzeit **t\_verlust** [s] und in den Congestion Index **cong\_index** eingeht. In selber Weise beeinflusst die mittlere Geschwindigkeit **v1** [m/s] die Verlustgeschwindigkeit **v\_verlust** [m/s]. Da Reisezeit, Distanz und Geschwindigkeitswerte bei höheren Logging-Intervallen geringfügig erhöht werden, gilt für die eben erwähnten Kenngrößen das Gegenteil – Sie werden bei höherfrequentem Logging verringert.

Ein auffälliges Verhalten weist die Zählung der Anzahl der Halte (**anzHalte**) auf. Während im 5Hz-Modus im Mittel gleich viele Halte gezählt werden (Umrechnungsfaktor 1,0), werden im 1Hz-Modus mehr (Faktor 1Hz->10Hz: 0,99) und im 0,2Hz-Modus weniger Halte (Faktor 0,2Hz->10Hz: 1,02) gezählt. Die Randbedingung für die Berechnung der Anzahl der Halte ist eine Maximalgeschwindigkeit von 3 km/h über eine Mindestdauer von 2 Sekunden. Im Falle von 0,2Hz (1 Datenpunkt je 5 Sekunden) liegen die Datenpunkte bereits weiter auseinander, als für die Deklaration eines Halts notwendig ist. Dennoch ist die ermittelte Anzahl von Halten fast ident.

### ANTEILSKENNGRÖSSEN

Der Glättungseffekt des Downscalings wirkt sich auch in den Anteilskenngrößen der Beschleunigung aus. So weisen die Kenngrößen anteilige positive Beschleunigung ( $a_{\text{pos\_SW\_ANT}}$  [%]:  $a_{\min}$  0,1  $\text{m/s}^2$ ,  $v_{\min}$  3 km/h), anteilige negative Beschleunigung ( $a_{\text{neg\_SW\_ANT}}$  [%]:  $a_{\max}$  -0,1  $\text{m/s}^2$ ;  $v_{\min}$  3 km/h) und Creeping-Anteil ( $v_{\text{creep\_SW\_ANT}}$  [%]: -0,1  $\text{m/s}^2 < a < 0,1 \text{ m/s}^2$ ;  $v_{\max}$  5 km/h) im 10Hz-Modus im Mittel größere Werte auf (z.B.  $a_{\text{neg\_SW\_ANT}}$ : Umrechnungsfaktor 1,039 für 1Hz->10Hz).

Dagegen werden die Werte für den Cruising-Anteil ( $v_{\text{cruis\_SW\_ANT}}$  [%]:  $-0,1 \text{ m/s}^2 < a < 0,1 \text{ m/s}^2$ ;  $v_{\text{min}} 5 \text{ km/h}$ ) und den Stillstandsanteil ( $v_{\text{still\_SW\_ANT}}$ :  $v_{\text{max}} 5 \text{ km/h}$  für minimal 2 Sekunden) bei geringeren Logging-Intervallen überschätzt, eine direkte Auswirkung von geglätteten Trajektorien.

Auffällig ist, dass der Cruising-Anteil im Vergleich 1Hz->10Hz um etwa 8 Prozent abweicht (Umrechnungsfaktor 0,92) bei einem empirischen Variationskoeffizienten von über 0,15, also bei einer starken Streuung.

### **SUMMIERTE KENNGRÖSSEN**

Summen-Kenngrößen weisen entsprechend dem Logging-Intervall entsprechend große Unterschiede auf. Während sich bei mittleren und Anteilskenngößen die Umrechnungsfaktoren (1Hz->10Hz) in etwa in einem Bereich von  $100\% \pm 10\%$  bewegen, sind die Faktoren für RPA (relative positive Beschleunigungen) 11,1 und für positive sowie negative summierte Beschleunigungen 10,5.

Die Geschwindigkeitsschwankungen nehmen bei geringerem Logging-Intervall ebenfalls ab, weshalb die Anzahl von Nulldurchgängen von negativer zu positiver Beschleunigung (ndpos) und umgekehrt (ndneg) bei 10Hz-Messungen um 2,8% höher liegt als bei 1Hz-Messungen.

### **4.5.3 Beurteilung des Einflusses des Aufzeichnungsintervalls**

Aus Einzelfahrzeugtrajektorien gewonnene Kenngrößen lassen sich bis auf reine Geschwindigkeitskenngößen nicht ohne weiteres vergleichen, wenn sie mit verschiedenen Logging-Intervallen gewonnen wurden. Dies erschwert zusätzlich Vergleiche von wissenschaftlichen Studien untereinander, bei welchen die Erhebungsmethodik (Logging-Intervall, Gerät) und Postprocessing einer genaueren Ausführung bedürfen, um die absolut ermittelten Werte vergleichbar zu machen.

Dass die selben Kenngrößen bei den selben Trajektorien nach einem Downscaling auch bei mittleren Kenngrößen zu erheblichen Änderungen (Umrechnungsfaktor) führen und die jeweilige Streuung desselben in Form des empirischen Variationskoeffizienten führen können, lassen folgenden Schluss zu: Abgesehen von der mittleren Geschwindigkeit bzw. Reisezeit (für den Bereich 10Hz bis 0,2Hz) werden Kenngrößen umso ungenauer bestimmt, je geringer das Logging-Intervall ist. Dies bedeutet, dass Kenngrößen, welche nicht nur die Anfangs- bzw. Endmesspunkte einer Trajektorie benutzen, sensibler auf andere Intervalle reagieren.

Zusätzlich ist festzustellen, dass ein konstantes Intervall in der Datenaufzeichnung für eine sinnvolle Datenanalyse vorauszusetzen ist, da sonst die in Tabelle 9 gezeigten Effekte versteckt werden. Für eine korrekte Datenbehandlung sind folglich Datenlücken von der Kenngrößenberechnung auszuschließen, da diese durch eine linearisierte Berechnung von Kenngrößen zwischen zwei zeitlich weiter auseinanderliegender Datenpunkten einen Downscaling-Effekt zur Folge hätten. Bereits in geringem Maße fehlerhafte Trajektorien sollten von den zur Kenngrößenberechnung herangezogenen Trajektorien ausgeschlossen werden.

Für die Bestimmung von Kenngrößen abgesehen von mittlerer Geschwindigkeit, der Distanz und der Reisezeit wird ein Logging-Intervall von minimal 1Hz empfohlen. Der Unterschied zu 10Hz-Daten wird als vernachlässigbar eingestuft für Kenngrößen wie die mittlere Reisegeschwindigkeit, mittlere Stillstandsanteile oder auch das Beschleunigungsrauschen.

### **4.6 Stichprobengröße bei streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten**

Die mikroskopischen Kenngrößen aus streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten gelten für je eine Fahrt eines Fahrzeugs zum betrachteten Zeitraum auf der betrachteten Strecke, und sind somit per Definition momentane Kenngrößen. Durch das Zusammenfassen von mikroskopischen Kenngrößen

können makroskopische Kenngrößen ermittelt werden, zum Beispiel die mittlere Reisezeit, die mittlere positive Beschleunigung u.Ä. Um repräsentative makroskopische Kenngrößen zu erhalten, ist eine ausreichende Datenbasis notwendig. Die erforderliche Stichprobengröße hängt von der zu untersuchenden Kenngröße, sowie von der beobachteten Netzlänge ab (BOLTZE et al., 2010). Durch die Verknüpfung von unterschiedlichen Arten der Datenerfassung kann die Stichprobe erhöht werden, zum Beispiel durch die zusätzliche Reisezeitmessung durch Kennzeichenerfassungssysteme. Für die erforderliche Stichprobengröße für die Reisezeitmessung sind Ansätze aus der Literatur bekannt, die im Folgenden ausgeführt werden.

Nach SCHNABEL&LOHSE (2011) kann die erforderliche Stichprobe durch ein statistisches Verfahren abhängig von der gewünschten statistischen Sicherheit und einem Genauigkeitsfaktor  $k$  bestimmt werden. Dieser ist abhängig von der Verteilung der Messgrößen (Normalverteilung, eingipflige Verteilung, unbekannte Verteilung). Für normalverteilte Kenngrößen bei einer sehr großen Grundgesamtheit  $N \rightarrow \infty$  liegt der erforderliche Stichprobenumfang bei Vorgabe eines zulässigen relativen Fehlers  $d_r$  bei

$$n = \frac{k^2 \cdot V^2}{d_r^2} \quad [m] \quad (44)$$

mit dem Genauigkeitsfaktor  $k$ , dem Variationskoeffizienten  $V = \frac{\sigma}{\mu}$  und dem relativen Stichprobenfehler  $d_r$  [%].

Dabei wird darauf hingewiesen, dass Mittelwert  $\sigma$  und Standardabweichung  $\mu$  der Gleichung zumeist unbekannt ist.

BRILON&SCHNABEL (2003) stellen auf dieser Basis fest, dass sich mit 6 bis 10 Messfahrten auf Basis der Reisezeitmessungen ein relativ genaues Bild der Verkehrsverhältnisse zeichnen lässt. Stärker streuende Geschwindigkeiten in der Spitzenverkehrszeit führen jedoch zu größeren benötigten Stichproben. In AMONES (BOLTZE et al., 2010) werden auf der Basis von umfangreichen innerstädtischen Messungen der Reisezeiten für geschichtete Messungen (nach Untersuchungsgebiet, Tageszeit und Steuerungsverfahren) Mindeststichprobengrößen nach der Stichprobenschätzung von SCHNABEL&LOHSE (2011) empfohlen (siehe Tabelle 10). Dabei wird berücksichtigt, dass Messfahrzeuge keine zufällige Stichprobe ziehen, sondern sich in bestimmten zeitlichen Intervallen bewegen, was sich günstig auf die erforderliche Stichprobe auswirkt. Günstig wirkt sich weiters aus, dass die Reisezeit der Grundgesamtheit nicht willkürlich schwanken, sondern sich aufgrund der Pulkbildung kontinuierlich über die Zeit ändern.

**Tabelle 10: Empfehlung der erforderlichen Stichprobengröße (BOLTZE et al., 2010)**

Variationskoeffizient $V$		<0,18	<0,24	>=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

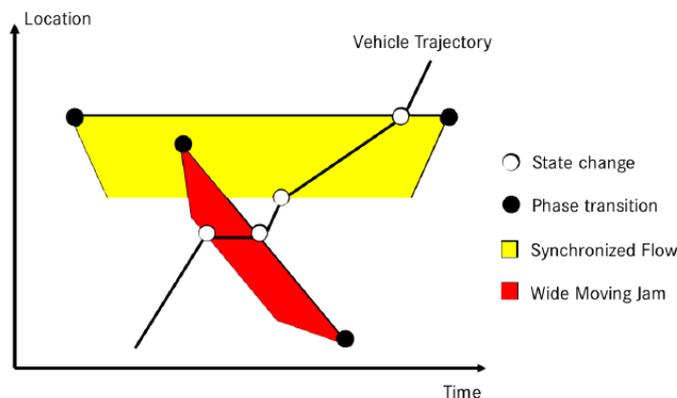
Da der Variationskoeffizient der Grundgesamtheit (siehe Tabelle 10) und der Verteilungstyp nicht bekannt sind, soll die Abschätzung der erforderlichen Stichprobengröße basierend auf lokalem Expertenwissen erfolgen.

QUIROGA (1998) stellen ein Tabellenwerk für die Mindestanzahl von Messfahrten zur Verfügung, welches an das obigen Verfahren (Formel 39) angelehnt ist. Eingangsgrößen sind dabei die

gemessenen Reisezeitdifferenzen, der absolute erlaubte Stichprobenfehler, sowie das gewählte Konfidenzintervall.

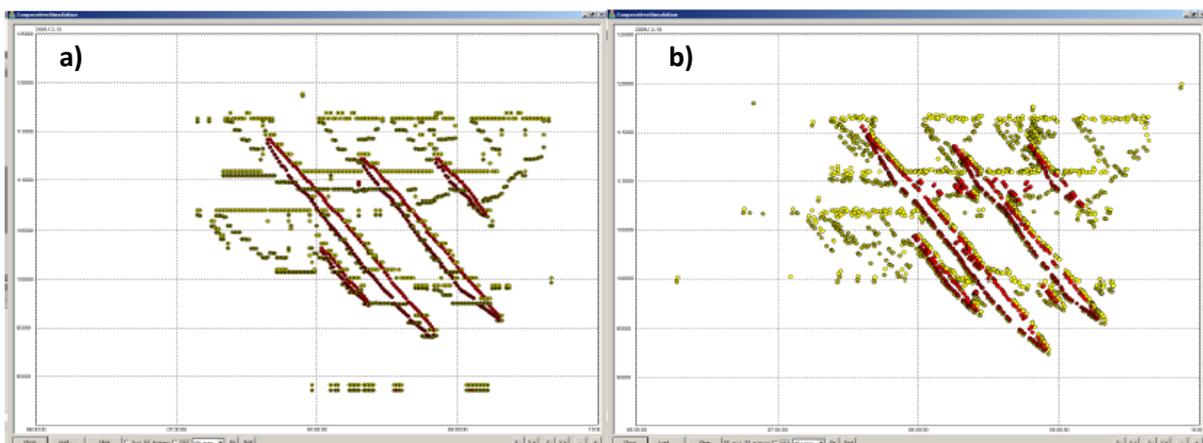
Weitere Forschung ist nötig, um eine benötigte Stichprobengröße für weitere Kenngrößen wie den Acceleration Noise zu ermitteln. Auf empirischem Wege ist denkbar, eine Flotte von Messfahrzeugen (beispielsweise die Daten aus TomTom-Navigationsgeräten, deren neuere Generation mit 1Hz Logging-Frequenz arbeiten) heranzuziehen, und zufällig gezogene Stichproben aus diesem Sample auf ihre Aussagekraft hin zu prüfen.

Es gibt auch Anwendungen, in welchen eine erforderliche Stichprobengröße angegeben werden kann. Dies gilt für spezielle Anwendungen, in welchen nicht einzelne Fahrzeuge die Daten erheben, sondern Floating Car Daten (FCD) von mehreren Fahrzeugen verwenden. Das folgende Beispiel soll diesen Sachverhalt veranschaulichen.



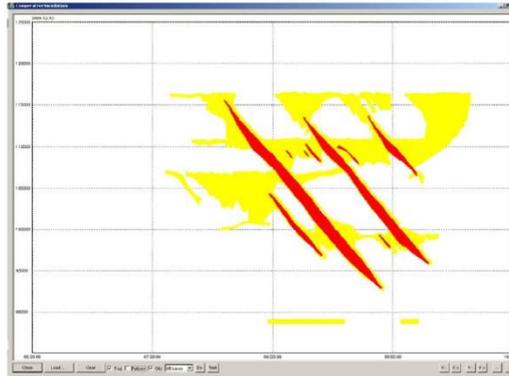
**Abbildung 32: Fahrzeugtrajektorie während der drei Phasen des Verkehrsflusses (REHBORN et al., 2012)**

Rehborn et al. (2012) treffen die Aussagen, dass bereits bei einer Durchdringungsrate hinsichtlich GPS-Daten von 2% der Fahrzeuge die Zustände aus der Drei-Phasen-Theorie (KERNER, 2004, vgl. Abbildung 32) feststellbar sind. Dabei nehmen einzelne, den Stau durchfahrende Fahrzeuge niedrigere Geschwindigkeiten als die Wunschgeschwindigkeit an. Je nach Verkehrszustand ist die Steigung aus der Zeit-Ort Trajektorie („Vehicle Trajectory“) geringer.



**Abbildung 33: Phasenänderung im ASDA/FOTO-Modell aus Schleifendetektoren (a) und Einzelfahrzeugdaten (b) (REHBORN et al., 2012)**

Aus stationären Schleifendetektoren gewonnene Daten (Abstand: 1 Kilometer) werden im ASDA/FOTO-Modell die Übergänge von „free flow“ zu „synchronized flow“ und zu „wide moving jams“, sowie in die entgegengesetzte Richtung kenntlichgemacht. Die selbe Untersuchung wurde auf die Einzelfahrzeugdaten (2%) angewendet (Abbildung 33).



**Abbildung 34: ASDA/FOTO-Modell: Stau-Rekonstruktion aus Schleifendetektoren und FCD (REHBORN et al., 2012)**

Die beiden Datenquellen gematcht ergeben ein klares Bild der unterschiedlichen Phasen (Abbildung 34). Ab einer Durchdringungsrate von 2% FCD sind aber alleine diese ausreichend, um die Phasen des Verkehrsflusses nach KERNER (2004) zu identifizieren.

#### 4.7 Zusammenfassung

Die Qualität von Geschwindigkeitssignalen kann bei Verwendung von Logging-Daten von herkömmlichen Messgeräten nicht ohne weiteres beurteilt werden. Die Geschwindigkeitswerte werden in Berechnungsverfahren aus den empfangenen Satellitensignalen bestimmt. Die entsprechenden Verfahren, die Genauigkeit der Empfangsgeräte (Antenne) und die Integrierung von möglichen Zusatzinformationen sind geräte- bzw. herstellerabhängig. Einige Hersteller ermöglichen das Loggen von erweiterten Satelliteninformationen, welche Parameter der Positionsgenauigkeit (DOP) mit einbeziehen, welche in Verbindung mit der Anzahl der verfügbaren Satellitenanzahl und möglichen weiteren Qualitätsparametern eine Beurteilung der Positionierung zulassen.

Eine Glättung der Trajektorien ist nötig, um das Rauschen der Geschwindigkeitsdaten zu verringern, da sich dieses exponentiell auf Beschleunigungstrajektorien auswirkt. Es gibt verschiedene Glättungstechniken, von denen der Kalman-Filter auf dem Gebiet der Navigation bevorzugt wird, da er bei sich nicht abrupt verändernden Kenngrößen gute Ergebnisse liefert und Extrema zufriedenstellend glätten kann. Weiters haben die Wahl des Messgerätes, sowie die Logging-Frequenz und das Post-Processing, sowie das Verfahren zur Ermittlung der Beschleunigung Einfluss auf die Eingangsdaten von Geschwindigkeit und Beschleunigung für die weitere Datenverarbeitung. Eine etwaige nur teilweise Ausscheidung von kompromittierten Daten beeinflusst daraus errechnete mikroskopische Kenngrößen. Außerdem können bedingt durch Abschattungen Bereiche in Tunnel oder unter Brücken von GPS-Geräten per se nicht erfasst werden, womit selbiges für die Analyse des Verkehrsflusses gilt. Ersatzweise können für bekannte Bereiche mit Signalverlusten Beginn- und Endpunkte festgelegt werden, um mit Kenntnis von Distanz und Zeitstempel z.B. die mittlere Geschwindigkeit oder Reisezeit zu ermitteln. Um einen Vergleich von fahrdynamischen Kenngrößen zu gewährleisten, sind für die Datenaufnahme dieselben Geräte (GPS-Tracker, Motorisierung) mit gleichbleibender Logging-Frequenz und mit denselben Einstellungen zu verwenden, das Postprocessing ist ident durchzuführen. Dies kann durch automatisiertes Postprocessing gewährleistet werden. Trotz allem werden GPS-Daten durch Abstandsmessung zu sich bewegenden Satelliten gewonnen, welche die Erde umkreisen. Eine theoretisch idente Messung (selbe Geschwindigkeit, selbe Strecke, keine Abschattungen) kann also zu einem anderen Zeitpunkt wegen der veränderten Position der Satelliten und atmosphärischer Störungen geringfügige Abweichungen aufweisen, welche nicht verhindert werden können.

## 5 Empirische Erhebung streckenbezogener Einzelfahrzeugdaten

Die in den vorhergehenden Kapiteln angeführten Erfahrungen aus Literatur und eigener Forschung werden in diesem und dem folgenden Kapitel benutzt, um eine Verkehrsflussanalyse an innerstädtischen Strecken durchzuführen. Ziel ist es, verschiedene Strecken hinsichtlich fahrdynamischer Kenngrößen zu analysieren. Als Vergleichsgröße dienen Zählwerte aus Schleifendetektoren, welche im Zuge eines Forschungsprojektes aufbereitet wurden. Es wurde eine Methodik für das Splitting und Postprocessing, sowie die Berechnung von fahrdynamischen Kenngrößen und automatisierten Auswertungen entwickelt, um eine nachvollziehbare Datenbearbeitung zu gewährleisten und um für weitere Forschungsaufgaben eine solide Bearbeitungsgrundlage zur Verfügung zu stellen. Für Untersuchungen des Verhaltens von Kenngrößen (siehe auch Abschnitt 5.3 und Unterabschnitt 4.5.2) und um weitere Anwendungsmöglichkeiten zu eröffnen, wurden alle Kenngrößen aus Kapitel 3 in verschiedenen Ausführungen implementiert. Die Kenngrößen wurden nach ihrer Berechnung entsprechend verschiedener Randbedingungen gruppiert und analysiert. Dabei lag das Augenmerk darauf, Veränderungen in den Ausprägungen festzustellen und ihre Ursachen zu ergründen.

In diesem Kapitel werden die angewandte Vorgehensweise der Datenaufnahme und der Datenbearbeitung dokumentiert. In Abbildung 35 werden die Abläufe in einem einfachen Flussdiagramm veranschaulicht. Dabei wird für den jeweiligen Schritt die verwendete Software bzw. Skript, die Aufgabe des Schritts, sowie der Datenoutput dokumentiert (siehe „Legende“). Die erhobenen Daten wurden zunächst mit der Software VBOXTools (2003) einer visuellen Prüfung unterzogen, anschließend mit einem geeigneten Kalman-Filter geglättet und entsprechend der gewählten Untersuchungsgebiete in zwei Schritten geschnitten. Nach einer neuerlichen Sichtprüfung werden die Daten mit dem Statistikprogramm R-Project in verschiedenen Schritten weiterverarbeitet. In einem ersten Schritt werden die geschnittenen Trajektorien in \*.csv-Dateien (Comma-separated values) konvertiert und die Zeitinformation in numerische Größen umgewandelt, um für Vektorrechnung kompatible Daten zu erhalten. Nach einer neuerlichen Prüfung und manueller Sortierung der Daten hinsichtlich Untersuchungsgebiet und Signalprogramm werden die Daten einer Filterung hinsichtlich fehlerhafter Datenreihen untersucht, um anschließend mit fehlerfreien Werten fahrdynamische mikroskopische Kenngrößen zu berechnen). Alternativ können die einzelnen Trajektorien aufbereitet werden, um Zeit-Weg-Trajektorien zu generieren. Die mikroskopischen Kenngrößen einzelner Trajektorien werden entsprechend der gewünschten Betrachtung von Zeiträumen und Untersuchungsgebieten zusammengefasst, um in einzelnen Auswertemodulen makroskopische Kenngrößen je mikroskopischer Kenngröße zu erzeugen. Dabei werden Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Standardabweichung, sowie 1. und 3. Quartil sowie der Median bestimmt. Durch die Analyse der Daten der Signalausfälle und der Distanz werden die Daten neuerlich überprüft.

# Empirische Erhebung streckenbezogener Einzelfahrzeugdaten

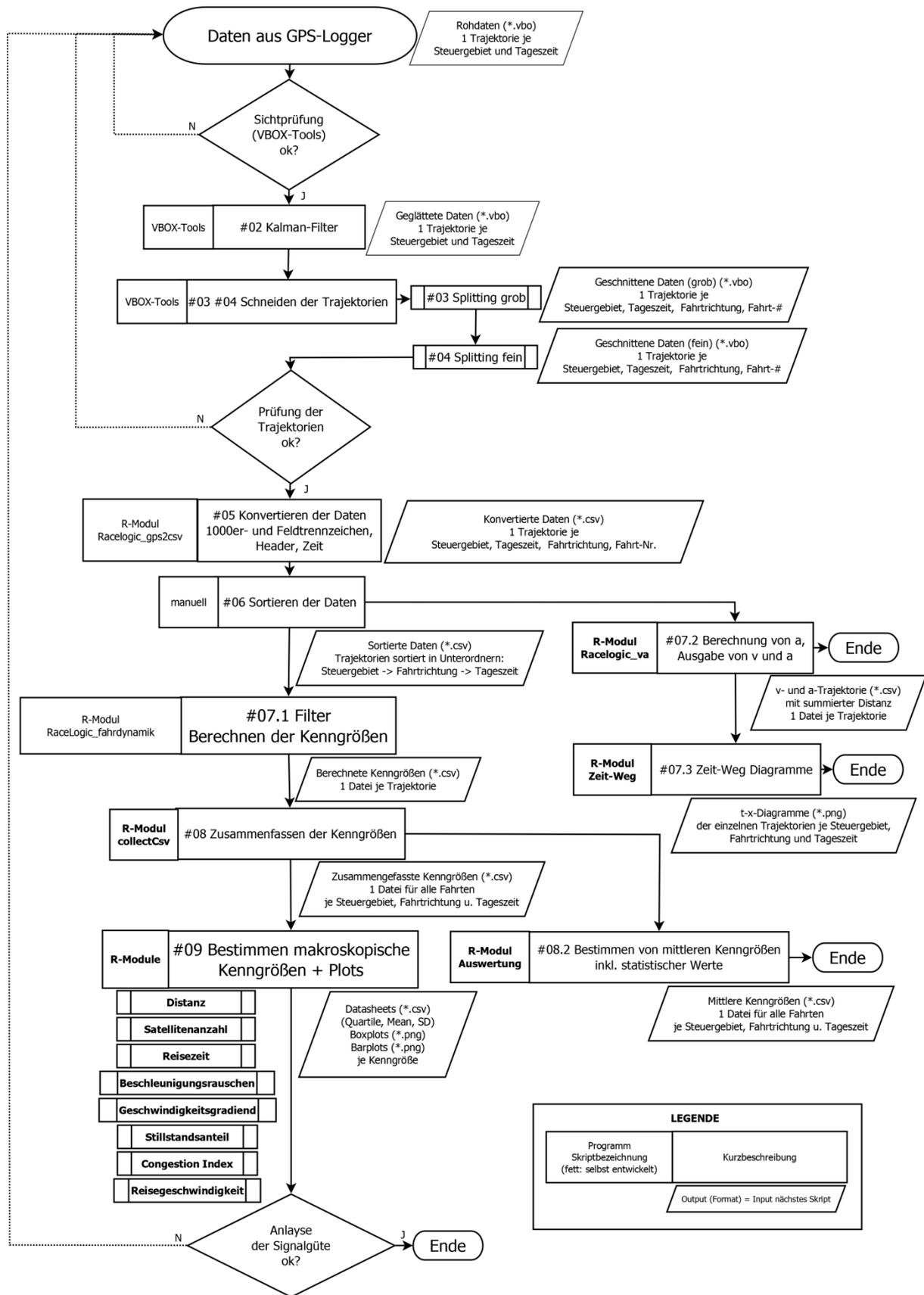


Abbildung 35: Skripte und Ablauf des Realdatenpostprocessings

## 5.1 Datenaufnahme und Untersuchungsgebiet

Um vergleichbare Daten für die Anwendung der in Kapitel 3 festgehaltenen Kenngrößen zu gewinnen, wurden Messfahrten im Grazer Stadtgebiet (siehe Abbildung 36) durchgeführt. Die Datenaufnahme der GPS-Trajektorien erfolgte mit der VideoVBOX Pro von Racelogic, einem GPS-Empfangssystem, welches Fahrten mit Videokameras dokumentieren kann. Die Aufzeichnungsrate beträgt konstant 10Hz, die Genauigkeit wird vom Hersteller im Mittel über vier Abtastungen mit 0,2 km/h angegeben (siehe Anhang). Das System besteht aus einer Empfangseinheit (Antenne), welche mittig am Dach einer Limousine angebracht wurde, und einer Logging-Einheit, welche die Rohdaten u. A. in Geschwindigkeits- und Zeitinformationen umwandelt. Zusätzlich können die Fahrten mit Videokameras dokumentiert werden.

In Abbildung 36 sind die untersuchten Streckenzüge (Untersuchungsgebiete) im Stadtgebiet von Graz in einer Luftaufnahme ersichtlich. Für die Visualisierung wurden die Streckenzüge nicht manuell markiert, sie sind vielmehr durch Geo-Koordinaten von einzelnen Messfahrten definiert. Durch die große Anzahl von Datenpunkten (10 Punkte je Sekunde) erscheinen diese als Linie. Die Trajektorien befinden sich nicht im historischen Kern der Stadt (Altstadt, rote Dächer erkenntlich), sondern in den städtischen Gebieten südlich des Zentrums (SG\_70) und westlich der Mur (SG\_30 im Norden, SG\_41 im Süden), welche das Stadtgebiet von Norden nach Süden teilt.

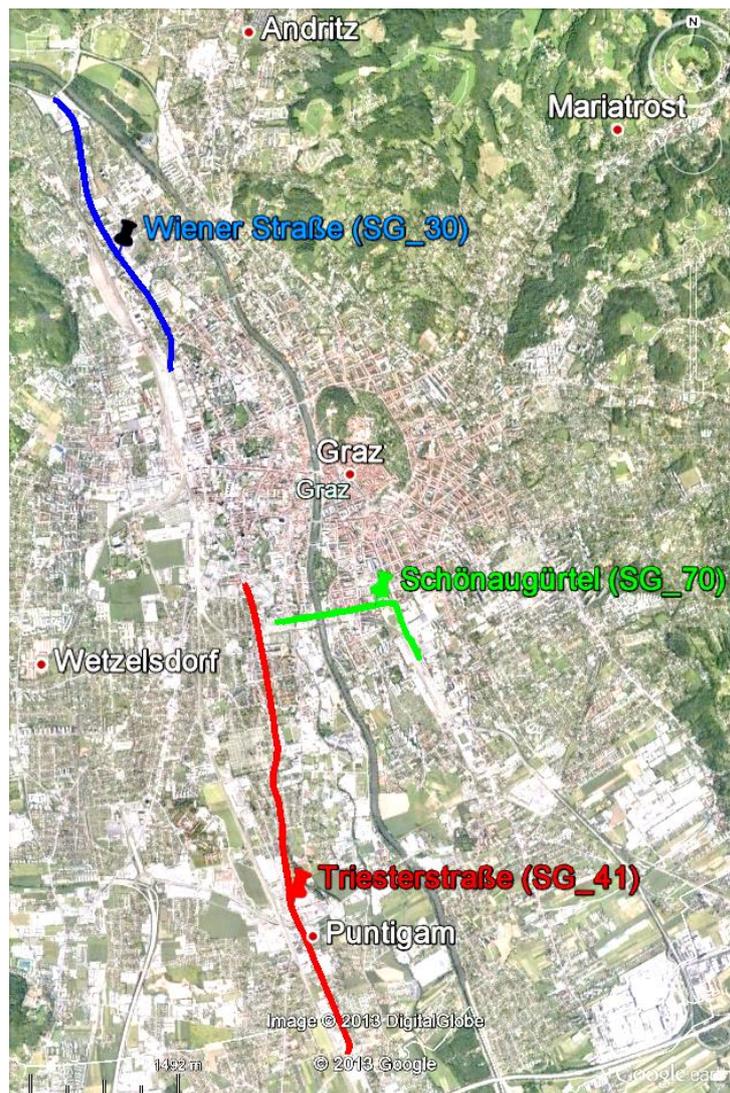


Abbildung 36: Untersuchungsgebiet im Stadtgebiet von Graz (Google Earth)

Die Messfahrten erfolgten an drei aufeinanderfolgenden Werktagen (Dienstag, 17.1.2012, Mittwoch, 18.1.2012 und Donnerstag, 19.1.2012). Es wurden insgesamt Trajektorien von 185 Einzelfahrten aufgezeichnet (siehe Tabelle 11: Messung 1). Aufgenommen wurden drei verschiedene Streckenzüge im Grazer Stadtgebiet, welche je ein Steuergebiet von Lichtsignalanlagen bilden. Durch die koordinierte Steuerung in den Streckenzügen sollte die Streuung der Messdaten reduziert werden, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Für jeden dieser Streckenzüge wurden beide Fahrtrichtungen aufgezeichnet. Es wurden je Steuergebiet, Steuerprogramm und Fahrtrichtung bis zu 8 Trajektorien aufgezeichnet. Nach der erwarteten Fahrtdauer je Steuergebiet und Steuerprogramm wurden 8 gültige Messfahrten als Ziel angestrebt. Bei Erreichen dieser Maßgabe wurde die jeweilige Messreihe beendet. Die Vorgabe von 8 durchzuführenden Messfahrten fußt auf der Feststellung von BRILON&SCHNABEL (2003), dass mit 6 bis 10 Messfahrten die Verkehrsverhältnisse relativ genau abgebildet werden können, wenn sich die untersuchten Strecken auf Hauptverkehrsstraße befinden, welche in beiden Fahrtrichtungen je zwei Fahrstreifen aufweisen. Weiters befinden sich die Teststrecken in mäßig bebautem Stadtgebiet von Graz, auf welchen auf Grund verkehrsrechtlicher Maßnahmen Behinderungshalte auf der freien Strecke kaum auftreten und der Haupteinfluss auf die Qualität des Verkehrsablaufs von den Halte- bzw. Wartezeiten ausgeht.

Für das Testgebiet Wienerstraße (siehe Tabelle 11: Messung 2) wurden an einem weiteren Werktag (22.11.2012) nach der Umstellung von Signalprogrammen weitere Messfahrten durchgeführt, um vergleichbare Daten für das Testgebiet Wienerstraße zu erhalten (siehe Tabelle 11: Messung 2). Die Fahrten wurden von denselben beiden Testfahrern durchgeführt, die Startzeiten der Befahrung eines Steuergebiets wurden entsprechend der Startzeiten der ersten Messung gewählt. Bei der zweiten Messung wurden 81 Trajektorien erhoben, gemeinsam mit Messung 1 wird ein Sample von 266 Trajektorien erreicht.

### **Fahrverhalten**

Der Fahrzeuglenker wurde angehalten, dem Verkehrsfluss zu folgen („Mitschwimmen“), um so das Verkehrsgeschehen an den Streckenzügen abzubilden. Der Einfluss der Motorisierung wurde keiner näheren Untersuchung unterzogen.

### **Wetter- und Umfeldbedingungen**

Während der Messfahrten fanden keine außerordentlichen Wetterereignisse statt. Außerordentliche Einflüsse wie Unfälle oder Baustellen konnten ebenfalls nicht beobachtet werden. Die Angaben der Testfahrer konnten durch visuelle Überprüfungen des Videomaterials bestätigt werden.

### **Vergleichsgrößen**

Es wurde die Verkehrsstärke mit lokalen Detektoren erhoben. Zählwerte waren in 15-Minuten-Intervallen verfügbar. Je Untersuchungsgebiet war eine unterschiedliche Anzahl von Detektoren verfügbar. Die Messwerte wurden gemittelt, um so die mittlere Streckenbelastung (Kfz/15 min) zu erhalten.

### **Durchdringungsgrad**

Die in Tabelle 11 aufgeführten Verkehrsmengen beziehen sich auf den Zeitraum, in welchem ein Streckenzug befahren wurde. Beginn eine Messfahrt in einer Richtung etwa um 16:05 und endete um 17:38 Uhr, so wurden die Verkehrsmengen von 16:00 bis 17:45 addiert. Der Durchdringungsgrad wurde bestimmt aus dem Verhältnis der Fahrten je Fahrtrichtung zur Verkehrsmenge. Er beträgt je nach Untersuchungsgebiet und Signalprogramm zwischen 0,3 und 1,0 Prozent (vgl. Tabelle 11).

Tabelle 11: Protokoll Messfahrten Graz

Untersuchungsgebiet Kurzbezeichnung Datum	Steuer- pro- gramm	Uhrzeit Daten-aufn. Ortszeit	Signal- programm- zeiten	Fahrt- richtung	Anzahl Trajekt.	Q [Kfz]	Durchdrin- gungsgrad [%]
<b>MESSUNG 1</b> Wiener Straße SG_30 17.01.2012	Morgen	06:00 – 07:47	06:00 – 09:00	Nord	8	1229	0.7
		Süd	8	2209	0.4		
	Tag	09:00 – 10:40	09:00 – 14:30	Nord	7	1187	0.6
		Süd	8	1640	0.5		
	Abend	16:00 – 17:41	14:30 – 19:00	Nord	8	2390	0.3
		Süd	8	1993	0.4		
Nacht	19:00 – 20:36	19:00 – 22:00	Nord	8	1057	0.8	
Süd	8	813	1.0				
<b>MESSUNG 2</b> Wiener Straße SG_30_2 22.11.2012	Morgen	06:00 – 08:15	06:00 – 09:00	Nord	10	1820	0.5
		Süd	10	2996	0.3		
	Tag	09:00 – 11:08	09:00 – 14:30	Nord	11	1845	0.6
		Süd	11	2032	0.5		
	Abend	16:00 – 18:23	14:30 – 19:00	Nord	10	3238	0.3
		Süd	10	2684	0.4		
Nacht	19:00 – 20:48	19:00 – 22:00	Nord	9	1137	0.8	
Süd	10	1065	0.9				
<b>MESSUNG 1</b> Triester Straße SG_41 18.01.2012	Morgen	06:30 – 08:21	06:30 – 09:00	Nord	5	1872	0.3
		Süd	5	1129	0.3		
	Tag	09:30 – 12:18	09:00 – 14:30	Nord	8	1672	0.5
		Süd	8	2006	0.4		
	Abend	14:30 – 17:17	14:30 – 19:00	Nord	8	2260	0.4
		Süd	8	2760	0.3		
Nacht	19:00 – 21:41	19:00 – 22:00	Nord	8	890	0.9	
Süd	8	966	0.8				
<b>MESSUNG 1</b> Schönaugürtel SG_70 19.01.2012	Morgen	06:30 – 08:21	06:30 – 08:30	Nord	8	2574	0.3
		Süd	8	1939	0.4		
	Tag	09:00 – 10:39	08:30 – 15:30	Nord	8	1955	0.4
		Süd	8	1575	0.5		
	Abend	16:30 – 18:29	15:30 – 19:00	Nord	8	2656	0.3
		Süd	8	2538	0.3		
Nacht	19:00 – 20:25	19:00 – 22:00	Nord	8	1019	0.8	
Süd	8	1135	0.7				

Bei den Vergleichsmessfahrten (Messung 2, Wiener Straße) wurden geringfügig mehr Trajektorien aufgezeichnet als in den ersten, um die Repräsentativität zu erhöhen. Ein höherer Durchdringungsgrad wird dadurch freilich nicht erreicht, da die Messfahrten auf derselben Strecke mit einem Fahrzeug durchgeführt wurden.

Als Untersuchungsgebiet für fahrdynamische Analysen wurden aufgrund ihrer verkehrlichen Bedeutung für eine Stadt Streckenzüge mit einem hohen Verkehrsaufkommen gewählt. Es wurden Streckenzüge mit ähnlichen Charakteristiken ausgewählt (zweistreifige Richtungsfahrbahn je Fahrtrichtung, großteils anbaufrei, Knotenpunkte signalisiert). Von der ähnlichen Charakteristik dieser Straßen wurde erwartet, dass die fahrdynamischen Kenngrößen vergleichbare Werte aufweisen.

Nach einer Voruntersuchung (siehe Abschnitt 6.1) wurden die Start- und Endpunkte der Streckenzüge genau definiert. Die Längen und Anzahl von Verkehrslichtsignalanlagen (VLSA) und Druckknopfanlagen in der folgenden Auflistung der Streckenzüge beziehen sich auf die nach der Voruntersuchung geschnittenen Trajektorien. Es ist zu beachten, dass in Fahrtrichtung die jeweils erste Lichtsignalanlage nicht berücksichtigt wurde, also unmittelbar danach geschnitten wurde. Eine maßstabgetreue Ansicht der Untersuchungsgebiete mit den VLSAs findet sich im Anhang.

**Tabelle 12: Untersuchungsgebiete**

Signalgruppe	SG_30		SG_41 + SG_42		SG_70	
Bezeichnung	Wiener Straße		Triester Straße		Schönaugürtel	
<b>Fahrtrichtung</b>	Nord	. Süd	Nord	Süd	Nord	Süd
<b>Kategorie nach Verkehrsbelastung</b>	radial stadt- auswärts	radial stadt- einwärts	radial stadt- einwärts	radial stadt- auswärts	tangential	tangential
<b>Länge</b>	2699 m	3058 m	4954 m	4998 m	1823 m	1807 m
<b>Anzahl signalisierte Knotenpunkte</b>	7	9	18	18	8	8
<b>Verkehrslichtsignalanlagen</b>	7	8	13	14	6	6
<b>Druckknopfanlagen</b>	0	1	5	4	2	2
<b>Knotenpunkte/km</b>	2.6	2.9	3.6	3.6	4.4	4.4
<b>Mittlerer Abstand Knotenpunkte</b>	386 m	340 m	275 m	278 m	228 m	226 m
<b>Angenommene Geschwindigkeit bei freier Strecke vfr</b>	50 km/h	50 km/h	50 km/h	50 km/h	50 km/h	50 km/h
<b>Besonderheiten</b>	Strecke in Fahrtrichtung Nord verkürzt, da erste Signalanlage (Druckknopfanlage) nicht koordiniert)		Strecke ist aus zwei hintereinanderliegenden Steuergebieten zusammengesetzt (Kurzbezeichnung SG_41)		Keine gerade Streckenführung Fahrtrichtung bezogen auf Zielpunkt im Vergleich zu Startpunkt	

### 5.1.1 Visuelle Datenprüfung

Die GPS-Daten wurden einer Sichtprüfung unterzogen, um globale Ausreißer bzw. Unstimmigkeiten zu sichten. Dabei wurde für den Geschwindigkeitsverlauf (vgl. Abbildung 37 a) eine fast fehlerfreie Datenaufzeichnung festgestellt. Im Verlauf der Satellitenabdeckung sind nur kurze und sehr wenige Satellitenausfälle erkennbar, an welchen die Geschwindigkeiten negative Ausreißer ausweisen, da das System an diesen Stellen die Geschwindigkeit zu Null setzt. Bei den verwendeten 10Hz-Daten sind auch deutlich die Schaltvorgänge während der Beschleunigungsvorgänge zu erkennen, bei denen die Geschwindigkeit für kurze Zeit annähernd unverändert bleibt. Die Sichtprüfung ergibt, dass bei Stillstand des Fahrzeugs (Prüfung mit Video) ein Drift der Positionsdaten möglich ist.

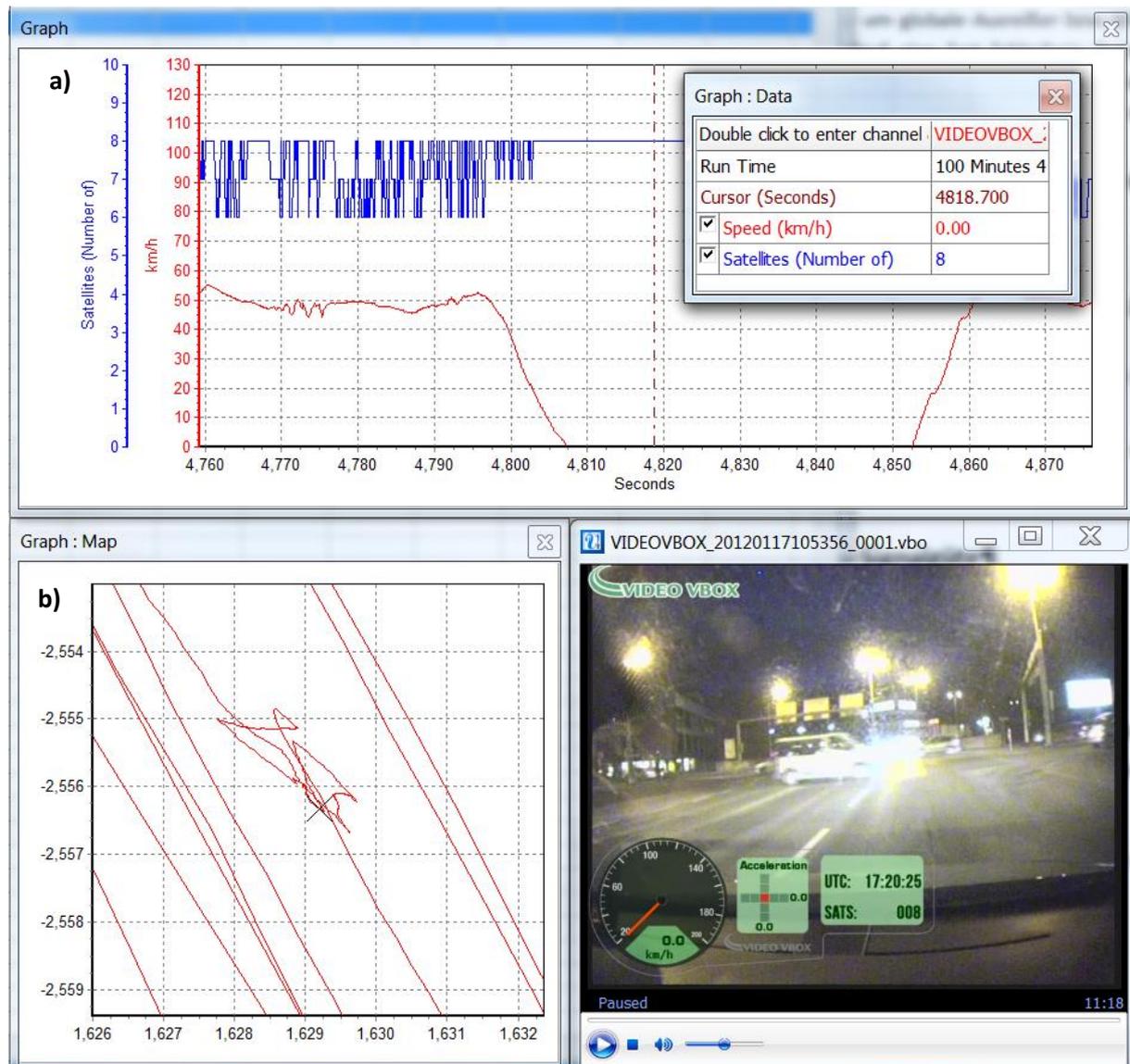


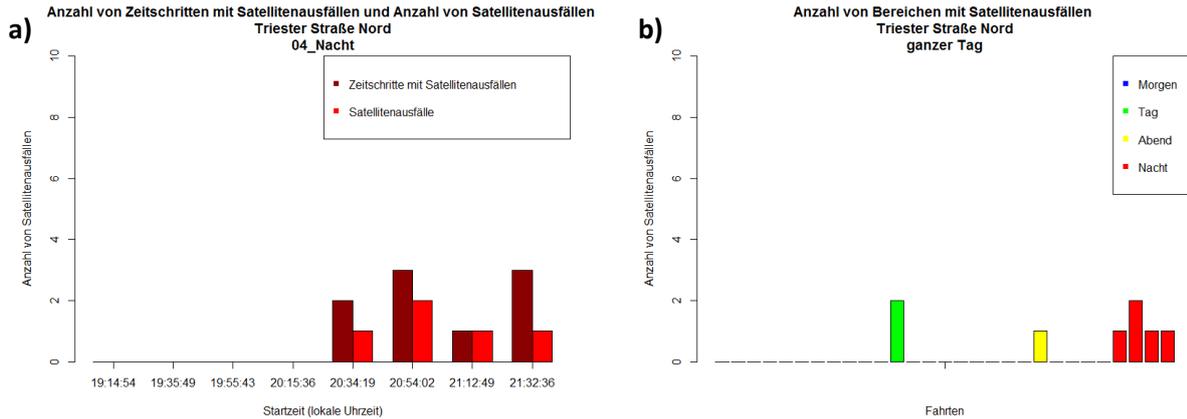
Abbildung 37: Drift der Positionsdaten bei Stillstand (VBOXTools, 2003)

In Abbildung 37 (b) ist ein solcher Drift erkennbar. Die Geschwindigkeit wird jedoch korrekt als 0 geloggt (Abbildung 37 a: rote Geschwindigkeitsganglinie), wie von der Videoaufzeichnung durch den Halt an einer Lichtsignalanlage belegt wird.

### 5.1.2 Untersuchung der Signalverluste

Für alle Trajektorien wurde die Anzahl der Signalverluste (Anzahl verfügbarer Satelliten) bestimmt. Da das verwendete System keine Bewertung hinsichtlich Dilution of Precision (DOP) ermöglicht, wurde die maximal in einer Trajektorie aufgetretene Anzahl von Signalverlusten als Qualitätskriterium herangezogen.

Aus allen 266 Trajektorien wurde das Verhältnis von Signalverlusten zu gesamter Fahrzeit gebildet. Im Mittel treten Signalverluste bei 0,01% der Daten auf und es wurde eine maximale Signalausfallszeit von 0,27% festgestellt. Dies ist neben einem guten Satellitenempfang auf vierstreifigen Straßen und einer mittleren Bebauungshöhe von 4 Stockwerken auf das kurze Logging-Intervall (0,1 Sekunden) bei sehr kurzen Signalausfällen (<0,1 Sekunden) zurückzuführen.

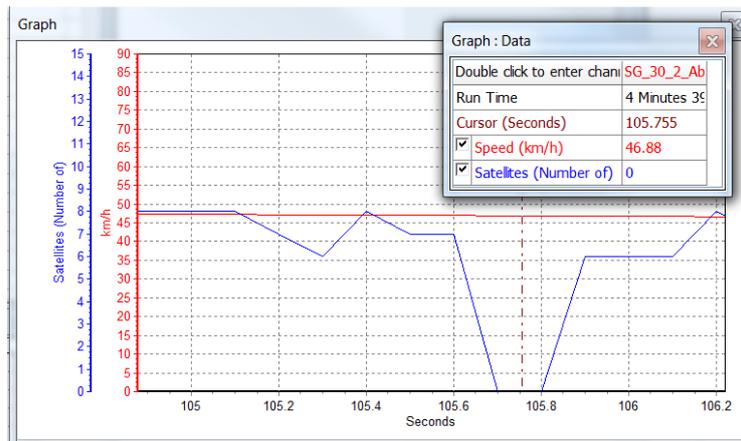


**Abbildung 38: Signalverluste Triester Straße, Signalprogramm Nacht**

Die Anzahl an Satellitenausfällen (durchgehender Signalverlust) ist noch geringer. Am Beispiel der Signalverluste auf der Triester Straße in Fahrtrichtung Nord (Abbildung 38 a) wird ersichtlich, dass nur eine geringe Anzahl von Datenpunkten (dunkelrote Balken links: Anzahl betroffener Datenpunkte) betroffen sind (in diesem Falle bis zu drei), diese aber zumeist auf einen einzigen durchgehenden Signalverlust zurückzuführen sind (hellrote Balken links: Anzahl durchgehender Signalverluste). In Abbildung 38 (b) ist die Anzahl von durchgehenden Signalverlusten je Trajektorie ablesbar. Insgesamt waren in diesem Fall 6 Trajektorien geringfügig fehlerhaft und konnten durch eine Glättung ausgeglichen werden (siehe Unterabschnitt 5.1.3).

### 5.1.3 Glättung der Geschwindigkeitsprofile

Für die Glättung wurde der Kalman-Filter der Software Racelogic VBOXTools (2003) verwendet, dessen Einfluss bereits in den Unterabschnitten 4.3.3 und 4.4.2 untersucht wurde. Als Eingangsgröße wurde die Geschwindigkeit (nicht die Position) verwendet und eine mittlere Glättungsintensität eingestellt. Ob der geringen Signalverluste wurden die Daten ungefiltert geglättet. Eine stichprobenhafte visuelle Kontrolle ergab, dass die Geschwindigkeitstrajektorien, welche beim verwendeten System bei Signalverlust zu 0 gesetzt werden, bei kurzfristigen Signalausfällen zufriedenstellend geglättet wurden (vgl. Abbildung 39: Signalverlust bei Sekunde 105,7).



**Abbildung 39: Geglättete Geschwindigkeitsganglinie bei kurzfristigem Signalausfall (VBOXTools, 2003)**

Die Sichtprüfung nach der Glättung ergab, dass keine Ausreißer der Geschwindigkeitsganglinie nach einem Signalausfall auftraten. Nach erfolgter Glättung der Trajektorien wurden diese entsprechend der Untersuchungsgebiete zugeschnitten.

### 5.1.4 Splitten der Trajektorien

Um die Trajektorien aufzunehmen, fuhr das Testfahrzeug über die Strecke, kehrte um, nahm die entgegengesetzte Fahrtrichtung auf, kehrte wieder um und wiederholte diesen Vorgang bis zum Abschluss der Datenaufnahme des Untersuchungsgebiets für das jeweilige Signalprogramm (siehe Tabelle 11). Die aufgezeichnete Trajektorie beinhaltet also acht Fahrten im Untersuchungsgebiet in beiden Fahrtrichtungen. Um die Daten der einzelnen Trajektorien vergleichen zu können, ist es nötig, die Daten zu splitten. Hierzu wurde die Software VBOXTools (2003) herangezogen. Es ist darin möglich, die Position von Trennlinien festzulegen, um so die Trajektorien zu teilen. Dabei werden Trennlinien lotrecht zur Fahrtrichtung über den Querschnitt gelegt. Dies führt bei nebeneinanderliegenden Richtungsfahrbahnen zu einem Schnitt auf gleicher Höhe.

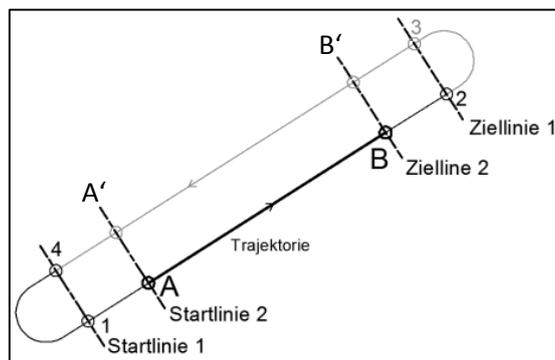


Abbildung 40: Splitten von Trajektorien

Da nur je eine Start- und Ziellinie festgelegt werden kann und dadurch die Fahrtrichtung bestimmt wird, muss die Teilung der gesamten Trajektorie (in der Regel acht Fahrten in beide Richtungen je Testgebiet und Untersuchungszeitraum) getrennt nach Fahrtrichtung erfolgen. In Abbildung 40 wird dieser Vorgang veranschaulicht.

#### 1. Splitten je Fahrtrichtung

Die Software unterscheidet bei der Überfahrt einer Trennlinie nicht nach Fahrtrichtungen, sondern loggt die je erste Überfahrt über die Start- bzw. Ziellinie. Da diese Linien jeweils eine Markierung lotrecht zur Fahrtrichtung darstellen, wird nicht der tatsächliche Startpunkt A, sondern bereits der zuvor in der Gegenrichtung überfahrene äquivalente Punkt A' der Startlinie geloggt. Daher wird im ersten Schritt eine Trajektorie erstellt, welche die gewünschte Trajektorie (zwischen A und B) genau einmal enthält. Hierzu wird von Startlinie 1 bis Ziellinie 1 geschnitten. Für den ersten Umlauf liegt die resultierende Trajektorie zwischen den Punkten 1 und 2, für die restlichen Umläufe zwischen den Punkten 4 und 2.

#### 2. Ausschneiden der endgültigen Trajektorie

Durch Festlegen einer neuen Start- und Ziellinie zwischen den Punkten 1 und 2 kann nun für die in Schritt 1 erzeugten Trajektorien eindeutig je eine Trajektorie zwischen den Punkten A und B ausgeschnitten werden.

Durch den entstehenden Drift bei Stillstand von Fahrzeugen bzw. bei fehlerhaften Positionssignalen kommt es zu mehreren fiktiven Überfahrten von Teilungslinien. Um eine eindeutige Zuordnung zu erhalten ist es daher nötig, die gesplitteten Dateien zu prüfen und Trennlinien so zu definieren, dass mehrfache fiktive Überfahrten für alle Daten ausgeschlossen werden können. Dies wird begünstigt durch die Positionierung von

Teilungslinien an Stellen mit höherer Geschwindigkeit und an Stellen, an denen keine Abschattungen zu erwarten sind.

### 3. Trajektorien in Gegenrichtung

Durch die Anwendung der Punkte 1 und 2 für die Gegenrichtung können die entsprechenden Trajektorien zwischen A' und B' extrahiert werden.

## 5.2 Berechnung und Überprüfung der Kenngrößen

Mit Daten aus den im Postprocessing aufbereiteten Messdaten werden mit Hilfe eines in R programmierten Moduls trajektorienspezifische Kenngrößen ermittelt. Dieser Ablauf ist in vier Schritte aufgeteilt, in einem fünften Schritt werden die Daten neuerlich überprüft

### 1. Einlesen der Daten

Die Trajektorien werden als Datenmatrix eingelesen. Einzelne Vektoren können aus dieser Datenmatrix ausgelesen werden. Für die Kenngrößenberechnung werden Zeit- und Geschwindigkeitsinformationen, sowie als Qualitätsinformation die Satellitenanzahl benötigt (Tabelle 13).

**Tabelle 13: Variable aus den Messdaten**

Beschreibung	Variable	Einheit
Zeitinformation als fortlaufende Zahl	t	sec
Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t /3,6	v	m/s
Anzahl verfügbarer Satelliten zum Zeitpunkt t	sats	-

### 2. Bestimmen von Differenzkenngrößen

Für die Zeitinformation t und die Geschwindigkeitsinformation v, sowie die quadrierte Geschwindigkeit  $v^2$  werden Differenzen von jeweils zeitlich aufeinanderfolgenden Datenpunkten gebildet, welche für die Bestimmung von verschiedenen Kenngrößen benötigt werden (z.B. für die Ermittlung der Beschleunigung aus der Geschwindigkeitsdifferenz). Stellt man die Vektoren aus den Differenzen jenen aus den Eingangsdaten (Tabelle 13) gegenüber, so werden die Differenzkenngrößen dem je ersten Wert der jeweiligen Differenzbildung zugeordnet. Der je letzte Wert der Grundkenngrößen t, v und sats wird entfernt. Somit kann jeder Grundgröße eine Differenzgröße zugeordnet werden und vektorielle Rechenoperationen durchgeführt werden. Auf diese Art und Weise wird ein Beschleunigungswert aus der Differenz von zwei Geschwindigkeitswerten dem je ersten Geschwindigkeitswert zugeordnet.

### 3. Filter

Es können Filter für die Kontrolle der zulässigen Aufzeichnungsintervalle (vgl. Abschnitt 4.5) und für zu geringe Satellitenverfügbarkeit (vgl. Abschnitt 4.6) aktiviert werden. Weiters besteht die Möglichkeit der Implementierung weiterer Filter. Wird eine Filterbedingung erfüllt, wird der entsprechende Zeitstempel durch „NA“ ersetzt. In weiterer Folge werden alle zugehörigen Daten (Geschwindigkeit, Zeitdifferenz, Geschwindigkeitsdifferenz, Differenz aufeinanderfolgender quadrierter Geschwindigkeiten) ebenso ungültig erklärt und können so in weiteren Berechnungen unberücksichtigt bleiben. Es werden jeweils zwei zugehörige Differenzwerte (z.B. der Geschwindigkeit) gefiltert, damit ein Signalausfall konsequent zur Filterung von so vielen Beschleunigungswerten wie hintereinanderliegenden Geschwindigkeitswerten plus 1 führt. Für die folgende Berechnung der Kenngrößen wurden gefilterte Werte verwendet. Manche Teile von Kenngrößen werden dabei in Zwischenberechnungen oder Unterfunktionen bestimmt.

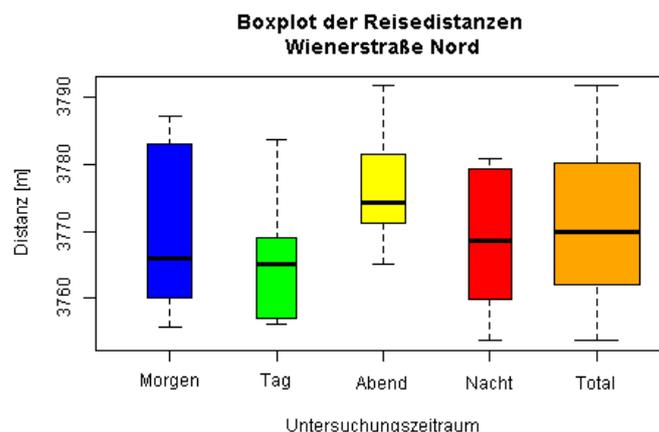
#### 4. Kenngroßenberechnungen

Mit dieser aufbereiteten Datenbasis werden die fahrdynamischen Kenngrößen nach Kapitel 3 und Variationen davon berechnet. Der Schwellwert für die Identifikation eines Stillstands wurde auf 3 km/h gesetzt, da die Glättung mittels Kalman-Filter im Falle von realem Stillstand sich dem Wert 0 nur annähert und da bei dieser Größe visuell beobachtete Halte eindeutig identifiziert werden konnten.

#### 5. Prüfung der Kenngrößen

Die Daten wurden im Postprocessing bereits auf die Satellitensignalverfügbarkeit geprüft. Dabei erfolgte auch eine Sichtprüfung der Geschwindigkeitsganglinien, welche durch den Vergleich mit Videoinformationen als realistisch deklariert werden konnten. Bei der Überprüfung der berechneten Kenngrößen wurden vereinzelt unrealistische maximale Beschleunigungen erkannt. Durch eine weitere Sichtprüfung der betreffenden Trajektorien wurden vereinzelt Ausreißer in der Geschwindigkeitsganglinie erkannt, welche erst nach der Kalman-Filterung auftraten, jedoch durch keinen sichtbaren Grund erfolgten. Die betroffenen 5 Trajektorien in den Untersuchungsgebieten Triester Straße und Schönaugürtel wurden aus dem Datensatz entfernt.

Eine weitere Datenvalidierung ist durch einen Längenvergleich möglich. Die gesammelten Geschwindigkeits- und Zeitinformationen können in die zurückgelegte Distanz umgerechnet werden. Diese Distanz sollte für die Trajektorien nur in sehr geringem Maße voneinander abweichen. Geringfügige Abweichungen sind neben der Ungenauigkeit der Geschwindigkeitsdaten durch unterschiedliche Wahl des Fahrstreifens möglich und können daher auch nicht ausgeschlossen werden. Diese Abweichungen der berechneten Reisedistanzen wurden in Form von Boxplots für jedes Untersuchungsgebiet und jeden Untersuchungszeitraum visualisiert entsprechend Abbildung 41 (siehe Anhang: Boxplots Reisedistanzen). Darin werden der Median, erstes und drittes Perzentil (Unter- bzw. Obergrenze des farbigen Bereichs) sowie Minimal- und Maximalwerte abgebildet.



**Abbildung 41: Boxplot der Reisedistanzen Wienerstraße, Fahrtrichtung Nord (Messung 1)**

Es ist ersichtlich, dass die (aus den Geschwindigkeiten bei äquidistanten Zeitschritten errechneten) Distanzen ohne erkennbares Muster variieren. Einzig die Distanzen auf der Triester Straße in Fahrtrichtung Süd weisen bei etwa gleichbleibender Streuung über den Tag sich verkürzende Distanzen auf, jedoch konnte für diese Beobachtung keine Ursache gefunden werden. Daher wurden für die Bewertung der Reisedistanzen verschiedene Kenngrößen generiert (siehe Tabelle 14). Die relative Abweichung  $d_{REL}$  ist der Quotient aus

der Differenz von maximaler und minimaler Distanz  $d_{Diff}=d_{MAX}-d_{MIN}$  und der minimalen Distanz  $d_{MIN}$ . Diese relative Abweichung beträgt zwischen 1,00% (Untersuchungsgebiet Wienerstraße, Fahrtrichtung Nord) und 3,20% (Untersuchungsgebiet Schönaugürtel Süd).

**Tabelle 14: Kennwerte für die gemessenen Distanzen je Untersuchungsgebiet und Fahrtrichtung (Werte vor Einschränkung des Testgebiets, siehe Unterabschnitt 6.1.2)**

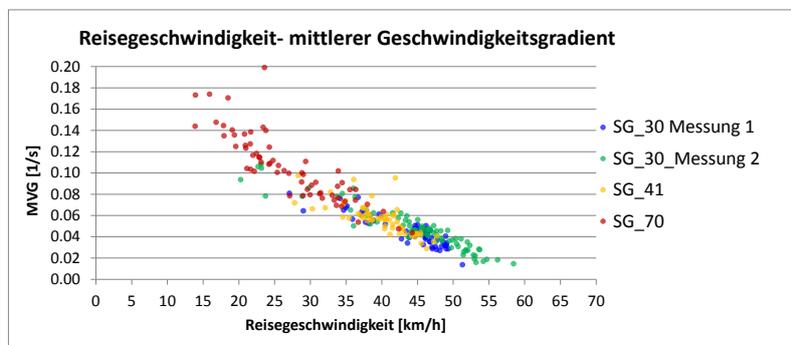
Untersuchungsgebiet	#Fahrten	d_MAX [m]	d_MIN [m]	d_Diff [m]	d_REL	d_AVG [m]	d_SD [m]
Schönaugürtel Nord	31	1826	1800	26	1.42%	1813	6.6
Schönaugürtel Sued	32	1830	1771	59	3.20%	1809	11.9
Triester Straße Nord	29	5049	4983	65	1.29%	5021	16.4
Triester Straße Sued	29	5093	5008	85	1.67%	5051	20.5
Wiener Straße Nord	32	3792	3754	38	1.00%	3770	10.7
Wiener Straße Sued	32	3806	3749	58	1.52%	3781	16.1

Die maximale relative Abweichung von etwa 3%, sowie die höchste Standardabweichung der Reisedistanzen von 20.5 Metern bei 5051 Metern mittlerer Distanz lässt auf einen validen Datensatz schließen. Nach erfolgter Berechnung und Überprüfung der Kenngrößen ist es nötig, eine sinnvolle Auswahl an Kenngrößen für die genauere Datenanalyse zu treffen. Da Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Kenngrößen auf der Hand liegen, werden diese im nächsten Abschnitt behandelt.

### 5.3 Abhängigkeiten zwischen fahrdynamischen Kenngrößen

Für viele der in Kapitel 3 aufgeführte Kenngrößen ergeben sich Abhängigkeiten. In diesem Abschnitt werden einige aus der Literatur bekannte Abhängigkeiten aufgeführt und mit Messdaten (Erhebung siehe Kapitel 5) aus der eigenen Datenerhebung visualisiert. Die verschiedenfarbigen Datenreihen beziehen sich auf verschiedene Untersuchungsgebiete, welche jeweils in einem Verkehrslichtsignalanlagen-Steuerungsgebiet (SG) liegen.

D'ESTE et al. (1999) stellen in ihren Untersuchungen für städtischen Berufsverkehr in der morgendlichen Spitzenstunde große Abhängigkeiten unter den Kenngrößen Reisezeit, Durchschnittsgeschwindigkeit, Congestion Index, Fahrzeit ohne Stillstand, Geschwindigkeitsgradient und anteilige Haltedauer an der Reisezeit fest. und empfehlen, nur eine dieser sechs Kenngrößen zu bestimmen. Das Beschleunigungsrauschen wird als unabhängige Kenngröße erkannt.



**Abbildung 42: Vergleich Reisegeschwindigkeit - Mean Velocity Gradient**

Da der Mean Velocity Gradient eine Verbindung zwischen dem Beschleunigungsrauschen und der mittleren Reisegeschwindigkeit herstellt, scheint dies jedoch ein sehr guter Parameter für die Verkehrsflussanalyse zu sein. Eine Untersuchung der Abhängigkeit von MVG und

Reisegeschwindigkeit (mittlere Geschwindigkeit je Trajektorie) bestätigt aber die Abhängigkeit dieser Kenngrößen im innerstädtischen Verkehr (vgl. Abbildung 42). Daher ist es ausreichend, die Reisegeschwindigkeit als Kenngröße heranzuziehen.

Es ist auch eine Abhängigkeit der Stillstandszeiten vom Congestion Index gegeben, welche mit steigendem Anteil der Stillstandszeiten steigt (vgl. Abbildung 43). So konnte für das Untersuchungsgebiet Schönaugürtel (SG\_70), welches die größten Unterschiede in den Reisezeiten aufweist, eine Funktion mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,83 (Trendbestimmung in Excel 2010) gefunden werden. Da aber der Anteil der Stillstandszeiten für den innerstädtischen Verkehrsfluss von großer Bedeutung ist (Wartezeit vor Lichtsignalanlagen), werden die beiden Kenngrößen neben dem im großen Maße unabhängigen Acceleration Noise als Kenngrößen für die folgende Verkehrsflussanalyse herangezogen.

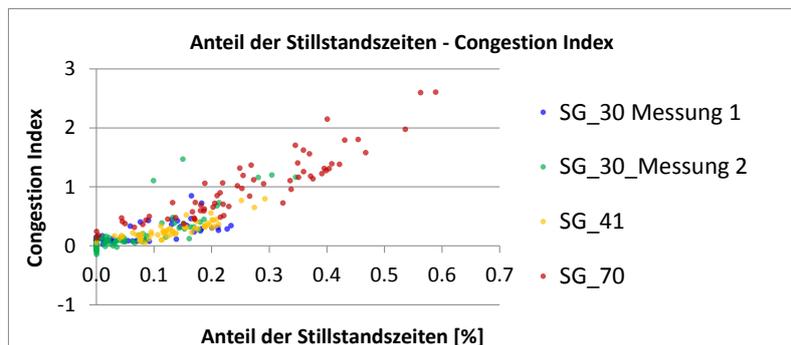


Abbildung 43: Vergleich Anteil der Stillstandszeiten - Congestion Index

Die Anteile von verschiedenen Fahrmodi wie Stillstand, Creeping oder Cruising sind voneinander abhängig, weil sich ein Fahrzeug nur in einem dieser Modi befinden kann. In Abbildung 44 sind die Ausprägungen der Kenngrößen Stillstandsanteil ( $v_{\text{still\_SW\_ANT}}$ ), Anteil Creeping ( $v_{\text{creep\_SW\_ANT}}$ ) und Anteil Cruising ( $v_{\text{cruis\_SW\_ANT}}$ ) zur mittleren Reisegeschwindigkeit aufgetragen. Dabei wurden alle Trajektorien aus der ersten Messreihe der Verkehrsflussanalyse (siehe Abschnitt 5.3) berücksichtigt. Durch geeignete logarithmische bzw. Exponentialfunktionen können via Trendbestimmung in Excel 2010 für die vorliegende Datenbasis Abhängigkeiten mit einem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  zwischen 0,74 und 0,82 festgestellt werden.

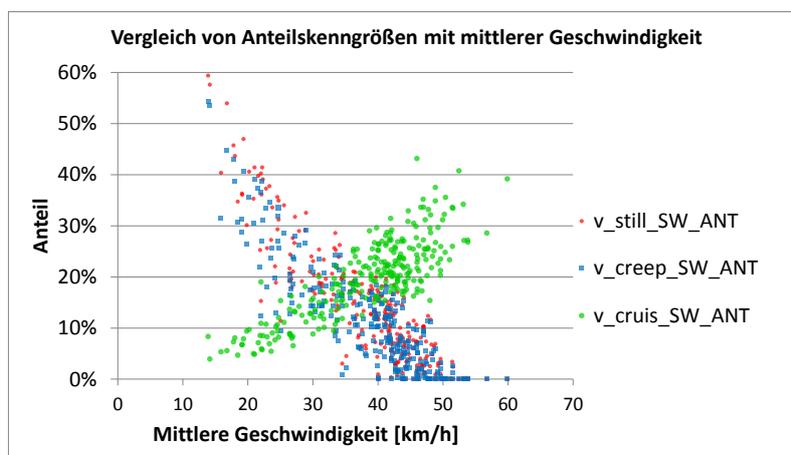
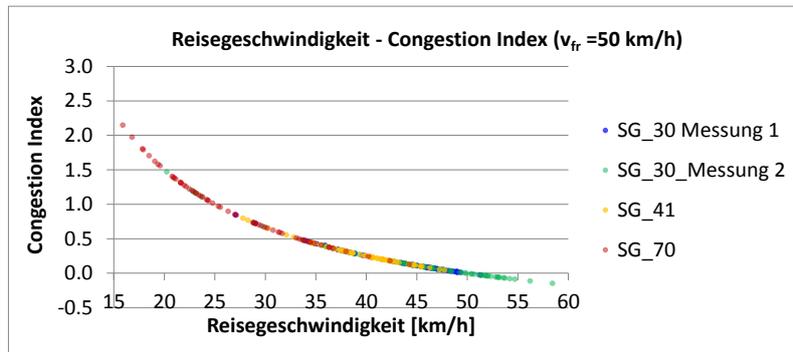


Abbildung 44: Abhängigkeit Anteilskenngrößen und mittlere Geschwindigkeit

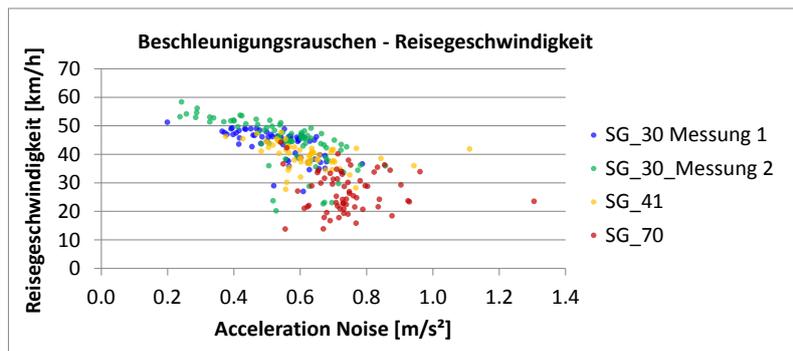
Die Stillstands- und Creeping-Anteile verringern sich in ähnlichem Maße bei steigender Geschwindigkeit, während die Cruising-Anteile bei höherer Geschwindigkeit (und somit geringerer Reisezeit) steigen. Der Congestion Index ist bewertet je nach Wahl der Geschwindigkeit bei freier Fahrt ( $v_{fr}$ ) die tatsächliche Reisegeschwindigkeit (vgl. Abbildung 45). Daher eignet sich diese

Kenngröße zum Vergleich zwischen verschiedenen Testgebieten nur bei genauer Kalibrierung von  $v_{fr}$ . Für die Wahl desselben  $v_{fr}$  für verschiedene Untersuchungsgebiete ergibt die Geschwindigkeits-Congestion-Index-Kurve denselben Verlauf.



**Abbildung 45: Vergleich Mittlere Reisegeschwindigkeit - Congestion Index**

Nach D'ESTE et al. (1999) ist das Beschleunigungsrauschen ein von der Reisegeschwindigkeit unabhängiger Parameter, welcher mit sich verschlechternder Verkehrsqualität steigt. Dabei steigt auch die Verteilung des Beschleunigungsrauschens (vgl. KO et al., 2010). Dieser Zusammenhang wird durch die vorliegenden Daten bestätigt (vgl. Abbildung 46).



**Abbildung 46: Vergleich Beschleunigungsrauschen - Reisegeschwindigkeit**

## 5.4 Kenngrößenauswahl für die Datenanalyse

Ob der Vielzahl an generierbaren Kenngrößen ist es nötig, für die Datenanalyse eine sinnvolle Auswahl zu treffen. Dabei sollen Abhängigkeiten vermieden werden (Abschnitt 5.3).

Einen guten Anhaltspunkt für die Kenngrößenauswahl gibt KRAMPE (2007). Demnach lassen sich für einen Streckenabschnitt prinzipiell vier verschiedene Kenngrößen mit den jeweiligen Streuungsmaßen ableiten. Diese sind (vgl. auch Kapitel 3)

1. Die mittlere Reisezeit [min]
2. Die mittlere Reisegeschwindigkeit [km/h]
3. Die Haltezeit [s]
4. Die Zeitverluste [min]

Demnach errechnen sich die ersten beiden Kenngrößen (Mittlere Fahrzeit und mittlere momentane Reisegeschwindigkeit) aus dem Mittelwert aller Messfahrten. Die Haltezeit wird für je ein Fahrzeug erfasst und ist die Summe der Stillstandszeiten auf einer Lichtsignalanlage oder im Stop&Go-Verkehr. Zeitverluste als Maß für die Bewegungsgüte eines Fahrzeugs im Verkehrsablauf werden durch die

Differenz der tatsächlichen mittleren Reisegeschwindigkeit auf einem Abschnitt zu einer Vergleichsgeschwindigkeit ermittelt.

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Ermittlung von Kenngrößen, welche den gesamten Verkehr, also mehrere Fahrzeuge, repräsentieren. Daher werden die mittleren ermittelten Haltezeiten und die mittleren ermittelten Zeitverluste herangezogen. Für die Analyse mehrerer verschiedener Streckenzüge ist eine weitere Anforderung, dass die Kenngrößen unabhängig von der Streckenlänge ermittelt werden. Aufgrund der obigen Anforderungen wurden folgende Kenngrößen für die weitere Betrachtung gewählt:

- die Reisegeschwindigkeit, da diese den Zeitbedarf der im Verkehr befindlichen Fahrzeuge erfasst und somit einen direkten Indikator der Verkehrseffizienz darstellt. Äquivalent zur Reisegeschwindigkeit kann auch die Kenngröße der Reisezeit verwendet werden, jedoch kann die Reisegeschwindigkeit unabhängig von der zurückgelegten Strecke betrachtet werden und daher auch vergleichend für verschiedene Strecken eingesetzt werden;
- das Beschleunigungsrauschen, da dieses von anderen Kenngrößen unabhängig ist und in dieser Arbeit einer genaueren Untersuchung unterzogen werden soll;
- der Anteil der Stillstandszeit (auch bezeichnet als Stillstandsanteil), da dieser eine Aussage über den anteilmäßigen Aufenthalt im ruhenden Verkehr ermöglicht. Im Gegensatz zur Anzahl der Halte beinhaltet diese Kenngröße auch die Wartezeit vor Lichtsignalanlagen. Weiters ist sie im Gegensatz zur Haltezeit streckenunabhängig;
- der Congestion Index, da dieser eine vergleichbare Bewertung der Verlustzeit im Vergleich zur idealen Durchfahrtszeit ermöglicht. Dies ist insofern hilfreich, als dass koordinierten Lichtsignalsteuerungen eine Koordinierungsgeschwindigkeit zugrunde liegt, bei welcher eine Durchfahrt ohne Halte ermöglicht werden soll. Wird diese Geschwindigkeit als Freifahrtsgeschwindigkeit für den Congestion Index herangezogen, kann er zur Analyse der koordinierten Signalsteuerung herangezogen werden. Im Gegensatz zu Zeitverlusten ist der Congestion Index streckenunabhängig.

**Tabelle 15: Ausgewählte Kenngrößen und Berechnungsweise in R (vereinfacht)**

Kenngröße	Einheit	Kenngröße je Fahrzeug	mittlere Kenngr.
Reisegeschwindigkeit	km/h	$v_{\text{mean}} \leftarrow \text{mean}(v)$ $v$ [km/h]	$V_{\text{mean}} \leftarrow \text{mean}(v_{\text{mean}})$
Beschleunigungsrauschen	m/s <sup>2</sup>	$a_{\text{sd}} \leftarrow \text{sd}(a)$ $a$ [m/s]	$A_{\text{sd,mean}} \leftarrow \text{mean}(a_{\text{sd}})$
Anteil der Stillstandszeit (Idling Mode)	%	$\text{ratio}_{v \leq 3} \leftarrow T_{v \leq 3} / T$ $T$ [s]: Reisezeit $T_{v \leq 3}$ [s]: Reisezeit mit $v \leq 3$ km/h	$\text{RATIO}_{v \leq 3, \text{mean}} \leftarrow \text{mean}(\text{ratio}_{v \leq 3})$
Congestion Index	-	$ci \leftarrow (T - T_0) / T_0$ $T$ [s]: Reisezeit $T_0$ [s]: theor. Reisezeit bei 50 km/h	$CI_{\text{mean}} \leftarrow \text{mean}(ci)$

In Tabelle 15 werden die für die weiteren Analysen herangezogenen Kenngrößen aufgelistet. Dabei wird unterschieden zwischen den Kenngrößen je Fahrzeug und den mittleren Kenngrößen für die Betrachtung eines Fahrzeugkollektivs. Für Analysen an einem einzelnen Streckenzug werden in den folgenden Kapiteln jedoch vereinzelt auch streckenabhängige Parameter verwendet, da sich diese durch eine hohe Verständlichkeit auszeichnen. Weiters werden vereinfacht die Berechnungsweisen

in der Statistiksoftware R dargestellt. Die zugrundeliegenden Werte sind jeweils die Geschwindigkeits- ( $v$ ) bzw. Beschleunigungswerte ( $a$ ) je konstanter Zeiteinheit, bzw. die daraus berechnete Reisezeit ( $T$ ).

## 6 Auswertung der realen streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten

In diesem Kapitel werden die Ausprägungen und Abhängigkeiten von ermittelten Kenngrößen auf Basis der empirisch erhobenen Einzelfahrzeugdaten (siehe Kapitel 5) untersucht. Die Analyse beschränkt sich auf folgende Kenngrößen aus streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten:

- die mittlere Reisegeschwindigkeit bzw. Reisezeit,
- das Beschleunigungsrauschen,
- den zeitlichen Anteil von Stillstandszeiten („Stillstandsanteil“),
- den Congestion Index, sowie
- als Vergleichsgröße die Verkehrsstärke.

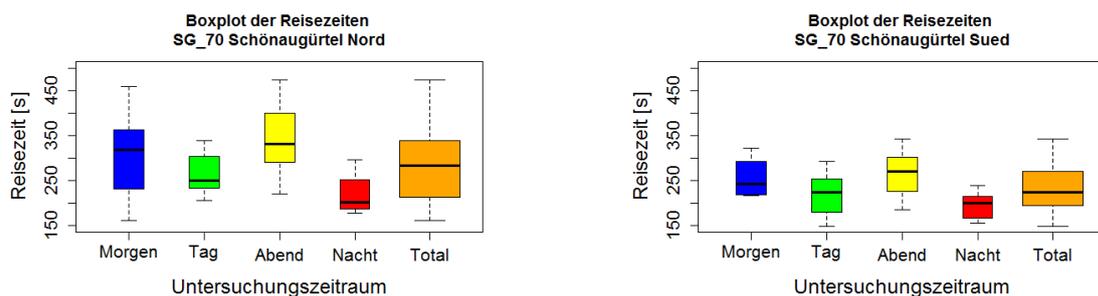
### 6.1 Voruntersuchung

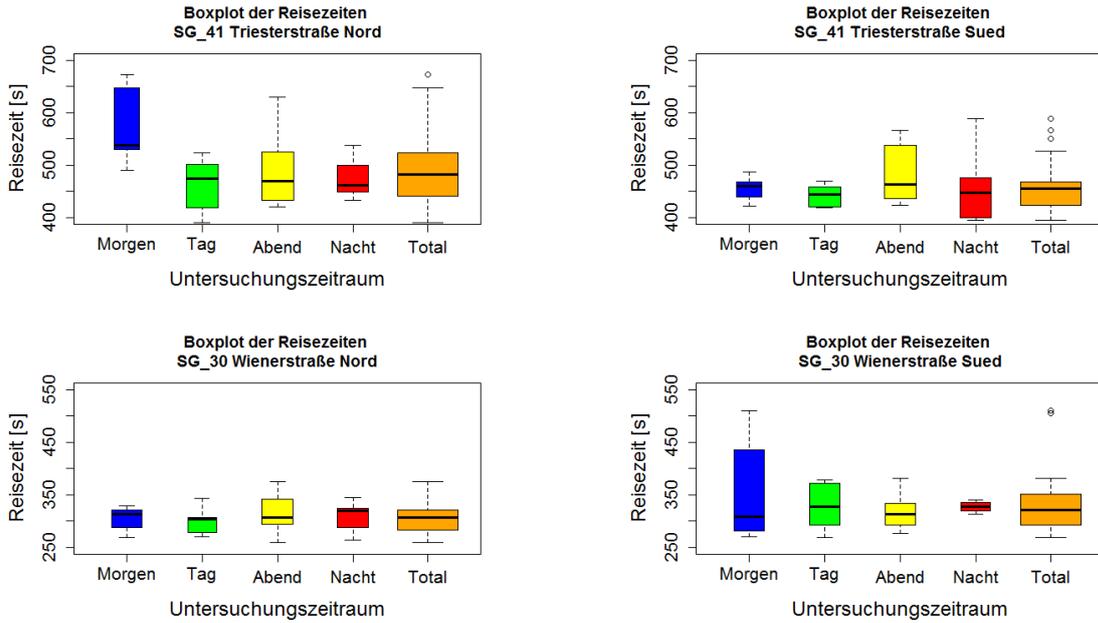
In einer Voruntersuchung wurden die Trajektorien aus der ersten Messreihe im Jänner 2012 (siehe Abschnitt 5.1) einer ersten Analyse hinsichtlich Reisezeiten, Verkehrsbelastungen und Verteilungen von Geschwindigkeit und Beschleunigung unterzogen. Hierfür wurden die Trajektorien für beide Fahrtrichtungen eines Streckenzuges an derselben Stelle vor der ersten bzw. nach der letzten Lichtsignalanlage geschnitten und aus den aufgezeichneten Messfahrten längstmögliche Trajektorien generiert.

#### 6.1.1 Reisezeiten und Verkehrsbelastung

In Abbildung 47 sind die Reisezeiten in Form von Boxplots aufgetragen, so dass Minima und Maxima, Median (schwarze horizontale Linie) und 25- bzw. 75-Prozent-Perzentile (farbiger Bereich) erkennbar sind. Dieser Vergleich ermöglicht eine Übersicht über die aufgezeichneten Trajektorien und gibt bereits einen Hinweis auf die großen Unterschiede der einzelnen Messfahrten, welche zu den unterschiedlichen Signalprogrammzeiten „Morgen“, „Tag“, „Abend“ und „Nacht“ (vgl. Tabelle 11) für beide Fahrtrichtungen (jeweils „Nord“ und „Süd“) erhoben wurden).

Die Reisezeiten der einzelnen Fahrten je Untersuchungszeitraum unterscheiden sich bisweilen stark, was durch einen großen Bereich zwischen unterem und oberem Quartil bzw. durch große Unterschiede zwischen Maximal- und Minimalwerten ersichtlich wird. An den Maximalwerten kann die Funktion der betrachteten Streckenzüge erkannt werden: Die Hauptverkehrsader Wiener Straße befindet sich im Norden des Zentrums und bedingt durch die radiale Ausrichtung weisen die Reisezeiten am Morgen in südlicher Fahrtrichtung die höchste Reisezeit auf – Es ist dort das höchste Verkehrsaufkommen des Tages zu erwarten (siehe Abschnitt 6.2). Die Triester Straße ist sozusagen der südliche Gegenpart, in der Morgenspitze sind die Reisezeiten am längsten. Der axiale Schönaugürtel erfährt morgens wie abends dieselben Spitzen.



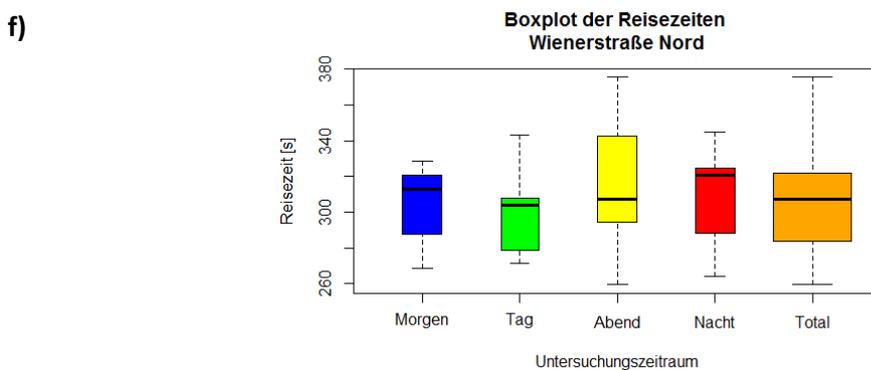
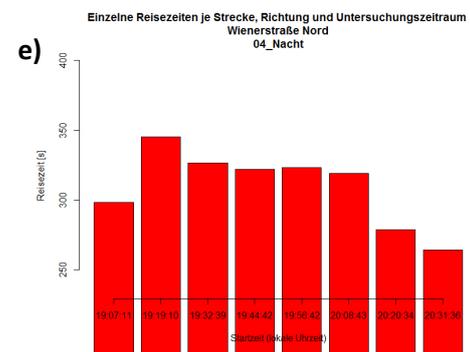
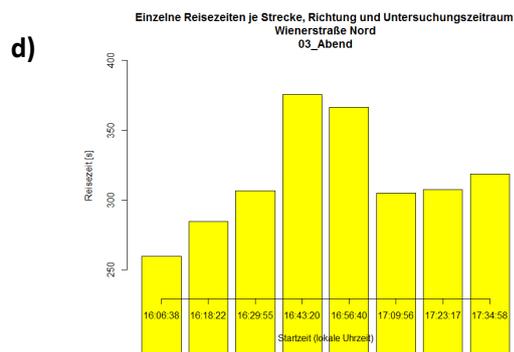
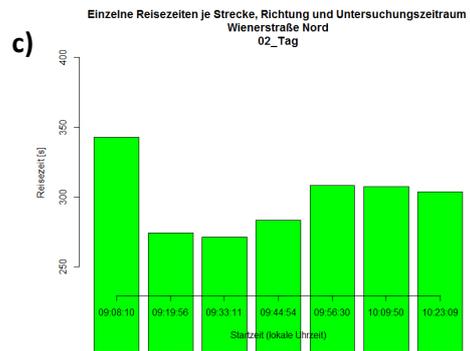
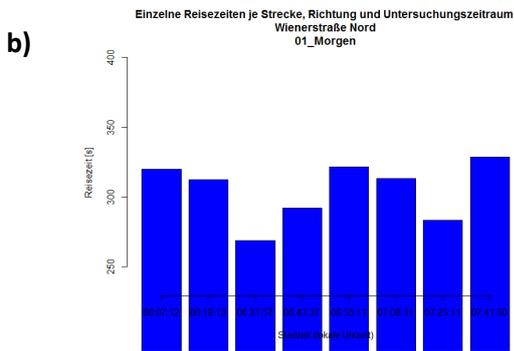
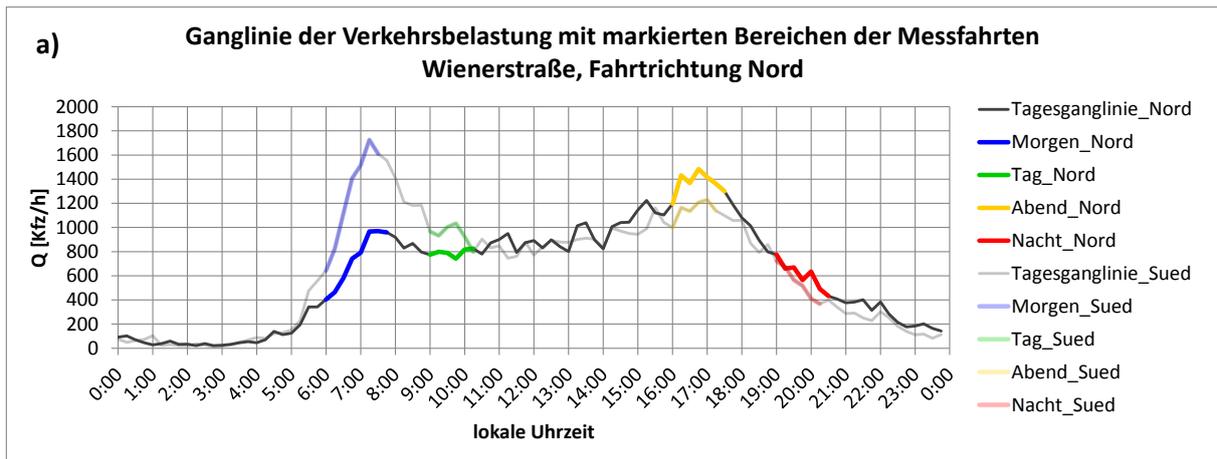


**Abbildung 47: Voruntersuchung: Boxplot Reisezeiten**

In einem qualitativen Vergleich der Boxplots der Reisezeiten mit den Verkehrsbelastungen soll der Grund für die teils sehr hohe Streuung der Reisezeiten gefunden werden.

In Abbildung 48 werden für das Untersuchungsgebiet Wienerstraße (Fahrtrichtung Nord) die Verkehrsstärken den Reisezeiten gegenübergestellt. Zuoberst (Abbildung a) findet sich eine Ganglinie der Verkehrsbelastung für den betrachteten Streckenabschnitt am betrachteten Tag von 00:00 bis 24:00 Uhr (vertikale Achse). Die Zählwerte stammen aus Induktionsschleifen und liegen in einem 15-Minuten-Intervall vor (Verkehrsstärke  $Q$  [km/h) – horizontale Achse). Es wurden die Werte aus allen auf der Strecke befindlichen Detektoren herangezogen und gemittelt. Die Zeiträume, in welchen kontinuierlich hintereinander Messfahrten durchgeführt wurden, sind je Tageszeit bzw. Signalprogramm farblich hinterlegt. Außerdem ist der Streckenabschnitt in Gegenrichtung ebenfalls in abgeschwächter Form dargestellt, um eine Interpretation des Straßenzuges zuzulassen. Entsprechend wird auf diese Art auch veranschaulicht, dass im betrachteten Zeitraum ein Streckenzug in einer Richtung befahren wurde, im Anschluss in Gegenrichtung usw. Das heißt, dass je Streckenzug nur in der Hälfte der angegebenen Zeit auf einer Richtung eines Streckenzuges Messfahrten vorgenommen wurden. In den Abbildungen b), c), d) und e) finden sich die erhobenen Reisezeiten, farblich unterschieden je Signalprogramm, in welchem sie erhoben wurden (analog zur Abbildung der Ganglinien), um einen Vergleich zwischen den erhobenen Daten je Tageszeit bzw. Signalprogramm zu ermöglichen. Abbildung f) stellt den Boxplot der Reisezeiten dar, welcher per se eine Zusammenfassung der Abbildungen der Reisezeiten darstellt. Abgebildet sind (farblich unterschieden je Signalprogramm) der Median als durchgezogener vertikaler Balken, das 25. Perzentil und das dritte Quartil als untere bzw. obere Begrenzung des farbigen Bereichs, sowie die Maximal- und Minimalwerte der Trajektorien im Untersuchungszeitraum.

# Auswertung der realen streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten

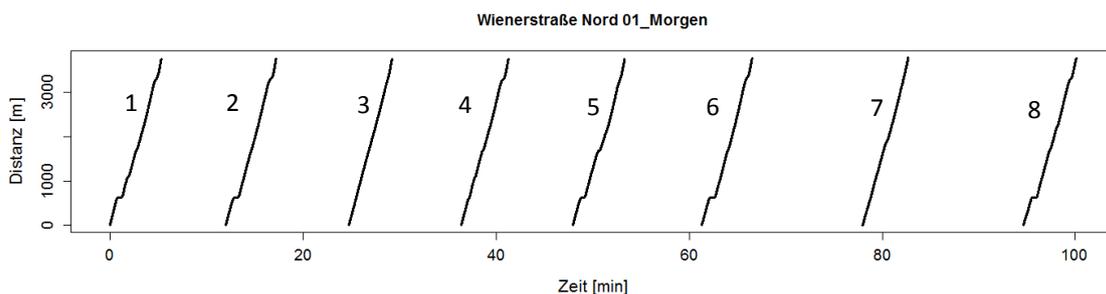


**Abbildung 48: Verkehrsbelastungen und Reisezeiten Wienerstraße, Fahrtrichtung Nord**

Bei den vorliegenden Auswertungen des untersuchten Bereichs der Wienerstraße, Fahrtrichtung Nord, wird die Spitzenbelastung von etwa 300 bis 375 Kfz/15min zwischen 16:00 Uhr und 17:45 Uhr erreicht, was sich mit dem Beobachtungszeitraum durch die Messfahrten deckt (16:00 bis 17:30 Uhr, gelbe Markierung). Dies ist die einzige Spitzenbelastung des Tages in dieser Fahrtrichtung. Die Morgenspitze (blau, abgeschwächte Darstellung) wird in entgegengesetzter Richtung erreicht, bei gleichzeitig geringerer Belastung im o.g. Zeitraum. Daran lässt sich ablesen, dass es sich um eine

axiale Arterie handelt, auf welcher am Morgen Pendler vorwiegend in die Stadt gelangen und diese am Abend wieder verlassen. Im vorliegenden Fall wird also die Fahrtrichtung Stadtauswärts betrachtet. Die Auswertung der Reisezeiten zeigt, dass in der Spitzenstunde sowohl die kürzeste, als auch die maximale Reisezeit erreicht wird (selbe Maxima und Minima bei den Boxplots für „Abend“ und „Total“). Ebenso ist ersichtlich, dass der untersuchte Bereich am Morgen einen Bereich von ansteigender Verkehrsbelastung erfasst. Dies spiegelt sich in den Reisezeiten nicht wieder. Der Vergleich der Boxplots der Reisezeiten lässt für alle drei Quartile keinen Schluss auf die Verkehrsstärke zu. Zu erwartende niedrigere Reisezeiten beim geringsten Verkehrsaufkommen („Abend“) treten nicht auf, sie sind trotz geringerer Verkehrsbelastung wie zu den Signalprogrammzeiten „Morgen“ und „Tag“ höher.

Um die Ursachen für diese Streuung zu ermitteln, wurden Weg-Zeit-Diagramme für alle durchgeführten Messfahrten je Signalprogramm angefertigt (siehe Abbildung 49: Untersuchungsgebiet Wiener Straße, Fahrtrichtung Nord, Signalprogramm „Morgen“, Messung 1). Dabei sind die zurückgelegten Distanzen auf der untersuchten Strecke in der Fahrtrichtung Nord auf der vertikalen Achse, die Zeit beginnend bei 0 (Minuten) auf der horizontalen Achse aufgetragen. Ein Halt ist also durch einen vertikalen Bruch in den Verläufen gekennzeichnet, ein nahezu gerader Verlauf lässt auf konstante Fahrt schließen. In diesen Weg-Zeit-Trajektorien findet sich die Begründung für die wechselnden Reisezeiten: Für den Zeitraum „Morgen“ weist die dritte Trajektorie einen sehr geraden Verlauf auf – sie hat auch die kürzeste Reisezeit (vgl. Abbildung 48 b). Das heißt, das Testfahrzeug musste bei dieser Fahrt kein einziges Mal halten und konnte die Strecke bei nahezu identer Geschwindigkeit durchfahren. Die siebte Trajektorie weist eine geringe Abweichung vom idealen Verlauf ab, ebenso die vierte. Dies entspricht ihrer Reihung nach der Reisezeit – sie weisen jedoch keinen Halt auf. Halte ergeben sich in den Trajektorien 1, 2, 5, 6 und 8 (Distanz < 1000 m), wobei sich ihr sehr ähnlicher Verlauf in ähnlichen Reisezeiten spiegelt. Offensichtlich hat auf dieser Trajektorie von annähernd vier Kilometern Länge ein jeder nötiger Halt eine große Auswirkung auf die Reisezeit. Da ein Halt an der ersten Lichtsignalanlage eines koordinierten Streckenzugs auf die zufällige Ankunftszeit und nicht auf die Koordinierung der Lichtsignalanlage zurückzuführen ist, ist diese von der Untersuchung auszuschließen.



**Abbildung 49: Zeit-Weg-Diagramm Wienerstraße, Fahrtrichtung Nord (Messung 1)**

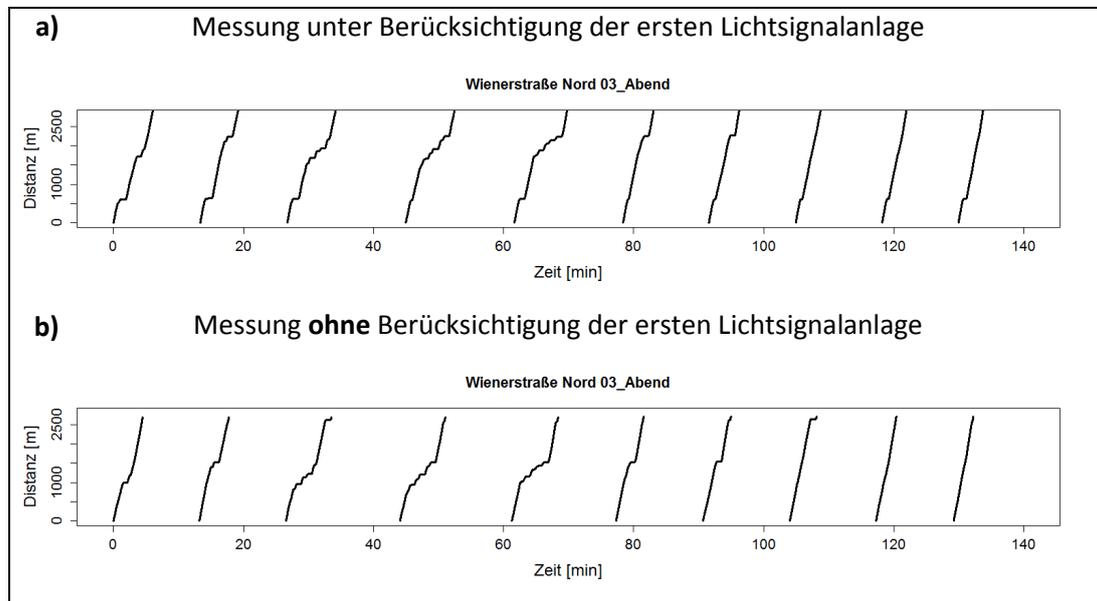
Da die Ursache für einen Teil der Streuung der Messergebnisse in der ungünstigen Wahl der Anfangs- und Endpunkte der Trajektorien gefunden werden konnte, werden diese in Unterabschnitt 6.1.2 in einem weiteren Postprocessing neu definiert.

### 6.1.2 Einschränkung des Testgebiets

Die untersuchten Strecken dieser Arbeit beziehen sich auf über Verkehrsrechner der Stadt Graz koordinierte Steuergebiete. Während der Datenanalyse wurde erkannt, dass die genaue Auswahl der zu untersuchenden Strecke einen entscheidenden Einfluss auf die Kenngrößen hat. Daher werden in

dieser Arbeit zusammengehörige Steuergebiete zu verschiedenen Zeiträumen (jeweils vier Steuerprogramme je Steuergebiet) untersucht.

Da die jeweils erste Lichtsignalanlage eines koordinierten Steuergebietes von einem Testfahrzeug „zufällig“ angefahren wird, kann hier ein zusätzlicher Halt auftreten. Je nach der durchschnittlichen Anzahl der Halte, welche im Idealfall bei der Schaltung einer „Grünen Welle“ Null beträgt, hat ein weiterer, zufälliger Halt zu Beginn der Strecke große Auswirkungen auch auf andere Kenngrößen.



**Abbildung 50: Auswirkung der Berücksichtigung der ersten Lichtsignalanlage eines Steuergebietes (Messung 2)**

In Abbildung 50 wird diese Auswirkung ersichtlich. Während Darstellung a) einen Zeit-Weg-Plot aller getätigten Fahrten auf dem Steuergebiet Wienerstraße Nord darstellt (Steuerprogramm Abend, Messung 2), bei welchem ein gewisser Bereich vor der ersten Lichtsignalanlage und ein Bereich nach der letzten Lichtsignalanlage mit berücksichtigt werden, bleiben eben diese Bereiche in Plot b) unberücksichtigt. Es wird deutlich, dass damit die (zufälligen) Halte an der ersten Lichtsignalanlage abgeschnitten und somit ein systematischer Fehler in der Analyse vermieden werden kann. Daher wurde für alle Steuergebiete folgende Konvention festgelegt:

1. Beginn des Untersuchungsgebietes nach der ersten Lichtsignalanlage beim Verlassen des Knotenpunkts
2. Ende des Untersuchungsgebietes nach der letzten Lichtsignalanlage beim Verlassen des Knotenpunkts.

In Abbildung 51 wird diese Konvention veranschaulicht. Dargestellt ist der nördlichste Knoten des Untersuchungsgebiets Wiener Straße, welcher für die Fahrtrichtung Nord das Ende, für die Fahrtrichtung Süd den Anfang des Steuergebiets darstellt. Für die Fahrtrichtung Nord ist die „Finish Line“ (orange) erkennbar, welche in Fahrtrichtung im Beschleunigungsbereich nach dem Knotenpunkt liegt. Der dargestellte Knotenpunkt wird also in der Analyse berücksichtigt. Die „Start“-Linie (grün) für die Fahrtrichtung Süd liegt in Fahrtrichtung ebenfalls nach dem Knotenpunkt. Daher wird dieser Knotenpunkt für die Fahrtrichtung Süd nicht berücksichtigt.



**Abbildung 51: Splitten des Steuergebiets  
Wienerstraße, nördliche Begrenzung**

Entsprechend dieser Konvention wurden die Untersuchungsgebiete eingeschränkt. Im folgenden Abschnitt werden die Streckenzüge hinsichtlich ihrer fahrdynamischen Kenngrößen analysiert.

## 6.2 Analyse einzelner Streckenzüge

Um eine Übersicht über die Ausprägungen von Beschleunigungsrauschen, Anteil der Halte (bzw. „Stillstandsanteile“ oder auch „Idling Mode“), Congestion Index und mittlerer Reisegeschwindigkeit zu erhalten, wurde für jedes Untersuchungsgebiet ein Datenblatt erstellt. Darin abgebildet sind jeweils die Boxplots dieser Größen mit den zugehörigen Datensätzen (Minimum, Maximum, Quartile, arithmetisches Mittel und Standardabweichung), welche vergleichbare makroskopische Kenngrößen darstellen. Dadurch wird ein qualitativer Vergleich der Kenngrößen in einem Streckenzug für jedes Signalprogramm ermöglicht. Zusätzlich werden die einzelnen Reisezeiten und die Ganglinie der Verkehrsbelastung mit den markierten zeitlichen Abschnitten abgebildet, in welchen die Messfahrten durchgeführt wurden. Zugleich wird die jeweils mittlere Kenngröße (z.B. mittleres Beschleunigungsrauschen) plus Standardabweichung je Signalprogramm ermittelt, um so aus den mikroskopischen Kenngrößen (aus einer Einzelfahrzeugtrajektorie) vergleichbare makroskopische Kenngrößen für die verschiedenen Signalprogramme je Untersuchungszeitraum zu schaffen. Die Datenblätter für alle drei Untersuchungsgebiete in beiden Fahrtrichtungen finden sich in Anhang A. Im folgenden Unterabschnitt 6.2.1 wird der Streckenzug Wiener Straße anhand des Datenblatts detailliert analysiert, im anschließenden Unterabschnitt 6.2.2 werden die weiteren Untersuchungsgebiete untersucht.

### 6.2.1 Exemplarische Detailanalyse Wiener Straße

Das Untersuchungsgebiet Wiener Straße (SG\_30) in Fahrtrichtung Nord zeichnet sich bedingt durch die radiale Funktion im Norden von Graz eine Verkehrsspitze im Abendprogramm von bis zu knapp 155 Kfz/h aus (siehe Abbildung 52). Im Untersuchungszeitraum des Morgenprogramms steigt die Verkehrsnachfrage von etwa 400 auf fast 1000 Kfz/h. Im Signalprogramm „Tag“ bleibt die Verkehrsnachfrage relativ konstant zwischen 800 und 1000 Kfz/h, wobei im Untersuchungszeitraum die Verkehrsstärke bei 800 Kfz/h stagniert. Im Nachtprogramm ab 19:00 sinkt die Verkehrsnachfrage rapide, im Untersuchungszeitraum von 800 auf 400 Kfz/h. Konsequenterweise weist ob der radialen Funktion die Fahrtrichtung Süd eine Verkehrsspitze am Morgen auf (etwa 1700), wobei im

Untersuchungszeitraum innerhalb von 75 Minuten ein Anstieg von 600 Kfz/h auf den fast dreifachen Wert verzeichnet wird. Der Verlauf im Signalprogramm Tag verläuft ähnlich der Gegenrichtung zwischen 800 und 1000 Kfz/h, die Verkehrsnachfrage im Abendprogramm liegt bei maximal 1200 Kfz/h. Der Abfall der Verkehrsnachfrage im Nachtprogramm weist wie das Tag-Programm eine große Ähnlichkeit zur Gegenrichtung auf.

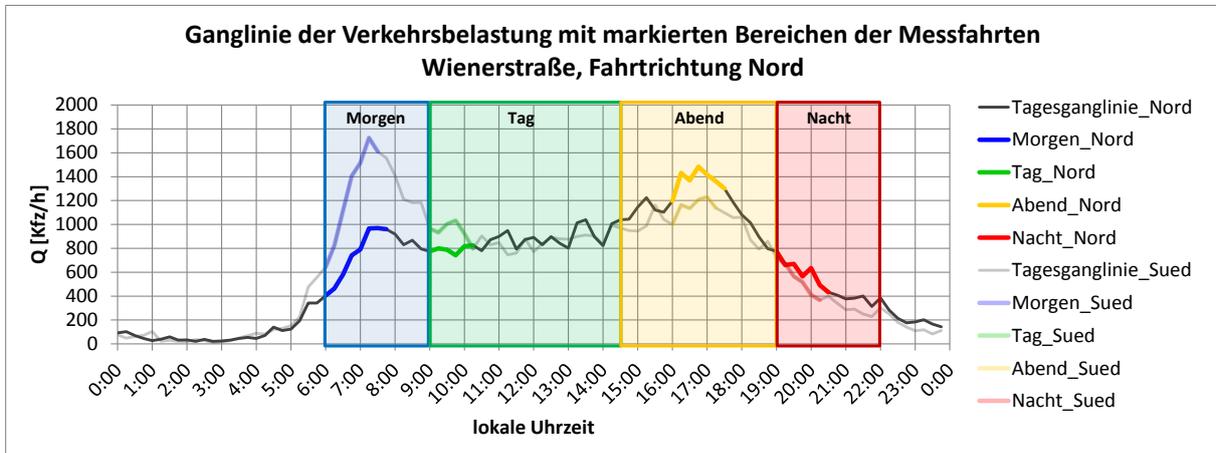


Abbildung 52: Verkehrsbelastung Wiener Straße, Fahrtrichtung Nord, Messung 1

Die Reisezeiten (Abbildung 53) verlaufen abgesehen von zwei Spitzen im Abendprogramm (gelb) und einer im Nachtprogramm (rot) gleichmäßig im Bereich von etwa 180 bis 220 Sekunden. Die wenigen Spitzen der Reisezeit zur Spitzenbelastung (Abend) und die gleichmäßigen Reisezeiten aller Trajektorien lassen darauf schließen, dass die Spitzen durch einzelne Halte an Lichtsignalanlagen hervorgerufen werden.

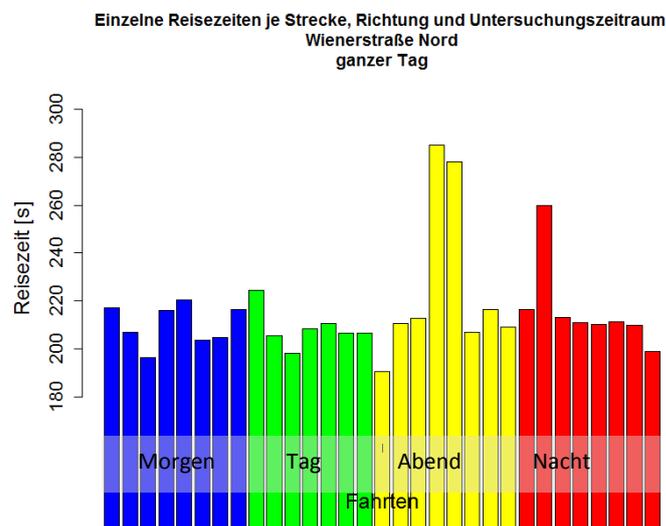
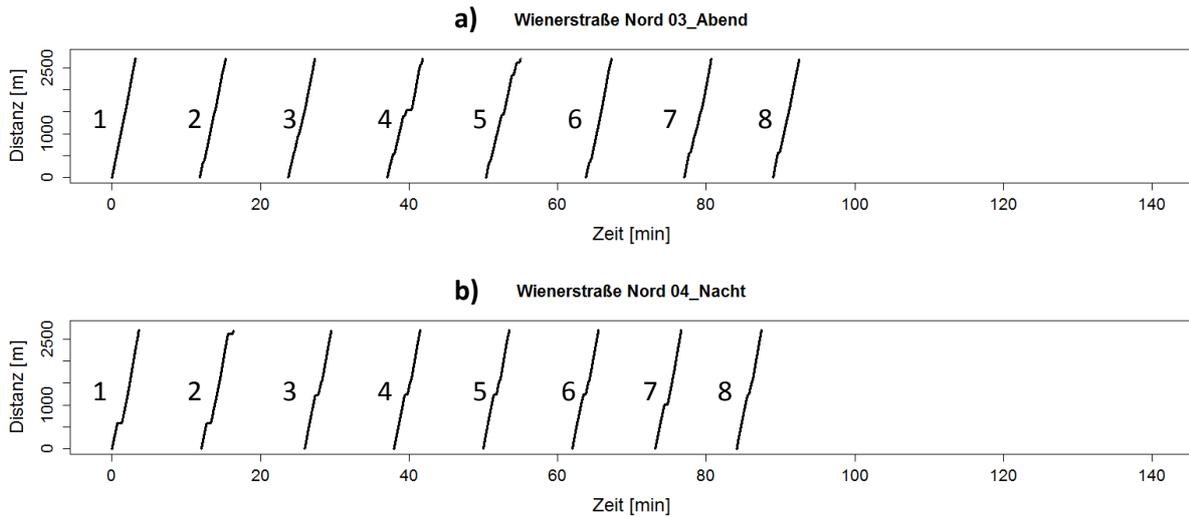


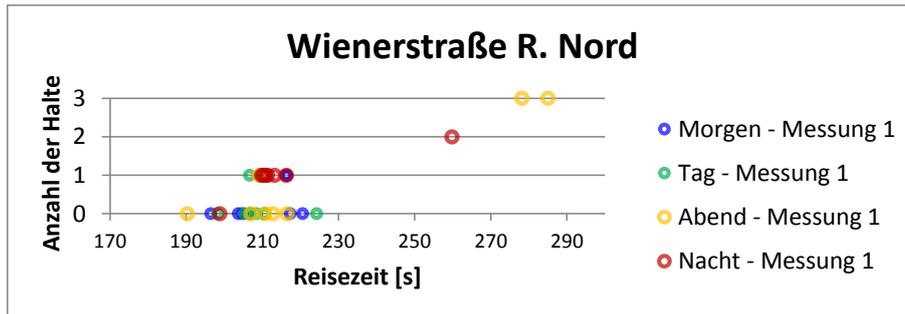
Abbildung 53: Reisezeiten Wiener Straße, Fahrtrichtung Nord, Messung 1

Die Zeit-Weg-Diagramme in Abbildung 54 (Beginn der jeweiligen Messreihe jeweils bei 0 Sekunden) offenbaren jedoch die Existenz von weiteren Halten (insbesondere im Nachtprogramm), welche sich nicht im selben Ausmaß auf die Reisezeit auswirken. So ist im Nachtprogramm (b) bei jeder Trajektorie ein Halt erkennbar, jedoch nur ein zweiter Halt in Trajektorie zwei führt zu einer deutlich längeren Reisezeit (vgl. Abbildung 53). Zum Vergleich: Die Trajektorien 2, 3, 6 und 7 aus dem Abendprogramm (Abbildung 54 a) weisen keinen ersichtlichen Halt auf, die Reisezeiten bewegen sich aber auf dem Niveau der Trajektorien 1, 3, 4, 5, 6 und 7 des Nachtprogramms (b).



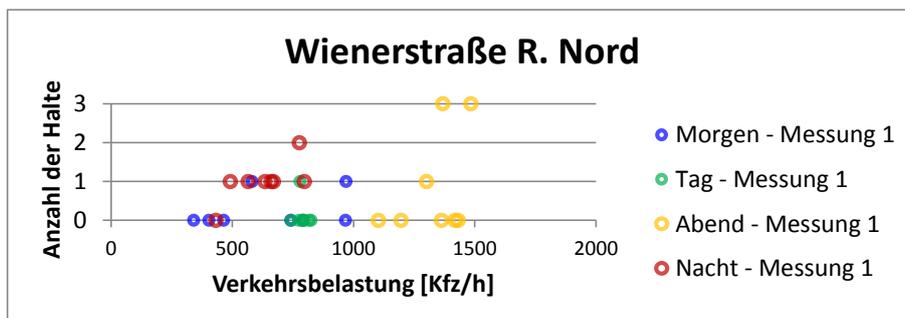
**Abbildung 54: Zeit-Weg-Diagramm Wiener Straße Nord: Abend- (a) und Nachtprogramm (b)**

Da in den Zeit-Weg-Diagrammen nur zeitlich längere Halte mit freiem Auge erkennbar sind, wird die tatsächliche Anzahl der Halte in Abbildung 55 mit der Reisezeit in Relation gesetzt. Die Ergebnisse aus der qualitativen Analyse der Zeit-Weg-Trajektorien wird darin bestätigt: Für das Untersuchungsgebiet Wiener Straße, Fahrtrichtung Nord, ist ab einer Anzahl von zwei Halten ein deutlicher Anstieg der Reisezeit festzustellen.



**Abbildung 55: Reisezeit - Anzahl der Halte (Wiener Straße, Fahrtrichtung Nord)**

Die Erhöhung der Anzahl der Halte lässt auf einen schlechteren Verkehrsfluss schließen. Aus Abbildung 56 geht jedoch hervor, dass die Anzahl der Halte nicht zwangsläufig auf eine höhere Verkehrsstärke schließen lässt. Bei allen auftretenden Maxima (Anzahl der Halte) existieren auch Fahrten ohne Halte für eine sehr ähnliche Verkehrsbelastung in jedem Signalprogramm. Weiters lässt die Verkehrssteuerung eine haltfreie Durchfahrt auch zur Zeit der Spitzenbelastung im Abendprogramm zu.

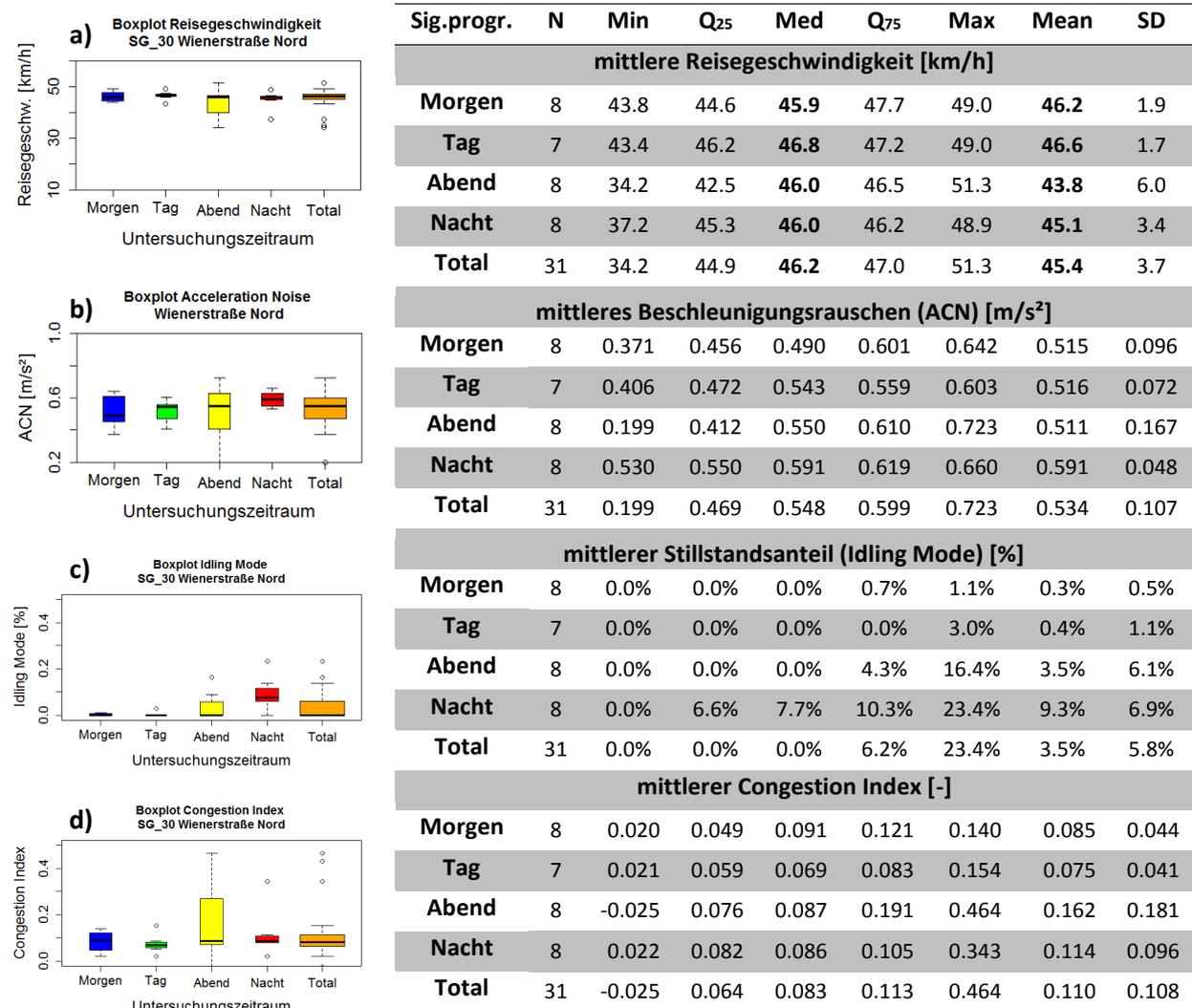


**Abbildung 56: Verkehrsbelastung - Anzahl der Halte (Wiener Straße, Fahrtrichtung Nord)**

## Auswertung der realen streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten

Eine höhere Anzahl an Halten und die damit verbundene Reisezeitverlängerung hängt nach obigen Erkenntnissen somit maßgeblich von den Signalplänen ab, also den Grünzeiten und der Koordinierung der Lichtsignalanlagen auf einem Streckenzug. Daher werden nachfolgend die in Abschnitt 5.4 ausgewählten Kenngrößen jeweils für ihr Signalprogramm analysiert. Hierzu wird das Datenblatt des Untersuchungsgebiets Wienerstraße, Fahrtrichtung Nord, herangezogen (Tabelle 16). Für Angaben hinsichtlich der Verkehrsbelastung wird die Tagesganglinie aus Abbildung 52 herangezogen.

**Tabelle 16: Datenblatt Wiener Straße (SG\_30), Fahrtrichtung Nord, Messung 1**



Aus den Boxplots und den dazugehörigen berechneten Kenngrößen wird ersichtlich, dass für das Untersuchungsgebiet die Kenngröße der mittleren Reisegeschwindigkeit (a) die Mediane bei etwa 46 km/h über den ganzen Tag fast ident sind. Die oben beschriebenen beiden signifikant höheren Reisezeiten im Abendprogramm manifestieren sich jedoch in einem geringeren Mittelwert und einer höheren Standardabweichung als zu den anderen Tageszeiten. Es fällt auf, dass sowohl die geringste als auch die höchste mittlere Reisegeschwindigkeit im Abendprogramm erreicht werden. Der untersuchte Streckenzug ermöglicht also zu jeder Tageszeit und entsprechend bei allen auftretenden Verkehrsstärken vergleichsweise konstante mittlere Reisegeschwindigkeiten. Der Congestion Index (d) weist ähnliche Ausprägungen auf, da er den Reisezeitverlust im Vergleich zur Reisezeit bei freiem Verkehrsfluss angibt.

Die verschiedenen Signalprogramme wirken sich auf das Beschleunigungsrauschen (b) jedoch nicht ausgleichend aus. Der Mittelwert für alle Fahrten liegt bei  $0,53 \text{ m/s}^2$ . Den Untersuchungen von HERMAN et al. (1959) ist dies ein Wert für „normale“ Straßen bei Geschwindigkeiten von etwa 35 mph (56 km/h). Der Median des ACN liegt je nach Tageszeit bzw. Signalprogramm zwischen  $0,49$  und  $0,59 \text{ m/s}^2$  und auch 1. und 3. Quartil unterscheiden sich nur geringfügig. Einzig das Abendprogramm mit den erwähnten beiden Ausreißern in den Reisezeiten, weist eine deutlich höhere Streuung der Werte um den Mittelwert auf (Mittelwert  $0,511$ ; Standardabweichung  $0,167$ ). Es ist auffällig, dass im Abendprogramm sowohl das minimale, als auch das maximale Beschleunigungsrauschen auftreten (Perzentile 0:  $0,199$ ; Perzentile 100:  $0,723$ ). Diese Streuung zur höchstbelasteten Zeit ist auf den instabilen Verkehrszustand zurückzuführen, der bei hohen Belastungen im gebundenen Verkehr auftritt und zu inkonstanten Geschwindigkeiten führt.

Der Stillstandsanteil (Idling Mode) erreicht ein Maximum im niedrig belasteten Nacht-Programm mit  $23,4\%$ , während im stark belasteten Abend-Programm nur maximal  $16,4\%$  Stillstandszeit auftreten. Ein ähnliches Verhältnis ist bei dem dritten Quartil ( $23,4$  bzw.  $16,4 \%$ ) zu beobachten. Dies lässt den Schluss zu, dass das Abendprogramm nicht auf die Wunschgeschwindigkeit der Fahrzeuge angepasst ist. Da aber im schwach belasteten Zustand ein „Mitschwimmen“ aufgrund mangelnder Fahrzeuge am Streckenzug nicht unbedingt gewährleistet sein muss, kann diese Ausprägung möglicherweise auch auf das individuelle Fahrverhalten des Fahrzeuglenkers zurückzuführen sein. Ein verstärkender Effekt tritt dadurch auf, dass bei geringerem Verkehrsaufkommen bei freier Fahrt höhere Geschwindigkeiten erreicht werden können, Halte in der zeitlichen Relation dadurch jedoch länger ausfallen können. Hingegen liegt der Median im Morgen- und Tag-Programm bei  $0,3$  bzw.  $0,4\%$ , was auf eine sehr gute Koordination der grünen Welle auf diesem Streckenzug zu dieser Zeit schließen lässt.

### **Zusammenfassung**

Eine erhöhte Verkehrsbelastung im betrachteten Steuerungsgebiet wirkt sich vor Allem auf die Streuung der betrachteten Kenngrößen aus. Die Haltezeit bzw. deren Anteil wirkt sich im wenig belasteten Bereich (Nacht-Programm) nicht auf die anderen betrachteten Kenngrößen aus, im hoch belasteten Bereich (Abend-Programm) treten aber bei erhöhter Haltezeit ebenfalls hohe Streuungen des Beschleunigungsrauschens auf. Die erhöhten Werte des Beschleunigungsrauschens im wenig belasteten Nachtprogramm bei gleichzeitig erhöhtem Anteil der Stillstandszeiten lässt auf eine erhöhte Geschwindigkeit bei freierem Verkehrsfluss schließen, welche zu einer höheren mittleren Reisegeschwindigkeit als die für die Koordinierung der Grünen Welle veranschlagte führt. Dadurch kommt es zu längeren Stillstandszeiten bei mehreren Halten und dadurch zu mehr Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen aus dem bzw. zum Stillstand. Dieser Effekt ist unter Umständen zu einem Teil auch auf die geringere Länge eines Pulks bei geringerer Verkehrsbelastung zurückzuführen.

Durch die aufgezeichneten Geo-Koordinaten können die einzelnen Datenpunkte mit Geoinformationssystemen (GIS) verortet werden. In Abbildung 57 ist eine solche Verortung für zwei exemplarische Trajektorien abgebildet. Dabei wurde eine Trajektorie (Abbildung 57 a) bei geringem Verkehrsaufkommen, die zweite (Abbildung 57 b) bei hohem Verkehrsaufkommen ausgewählt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Verzögerungsvorgänge größere Werte (rote Bereiche) annehmen, und mehr Halte (punktförmige Markierungen) auftreten.

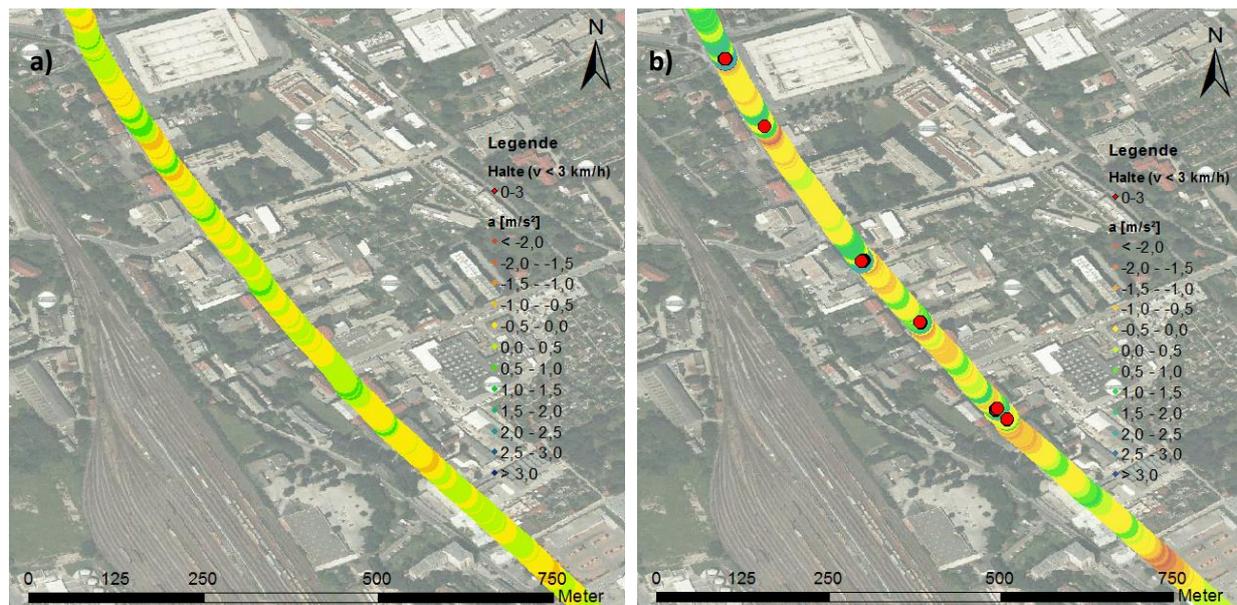


Abbildung 57: Beschleunigungsverlauf im innerstädtischen Gebiet (Fahrrichtung Nord); geringe (a) und hohe (b) Verkehrsbelastung (ArcGIS)

## 6.2.2 Analyse der weiteren Untersuchungsgebiete

In diesem Unterabschnitt werden die Datenblätter (Anhang A) der weiteren Untersuchungsgebiete analysiert.

### 1. Wiener Straße, Fahrrichtung Süd

Für die Reisegeschwindigkeiten ist in diesem Untersuchungsgebiet ein Paradoxon zu beobachten. Im am stärksten belasteten Untersuchungszeitraum (Morgen) tritt der höchste Median, bei der geringsten Belastung (Nacht) der geringste Median auf. Der Effekt im Morgenprogramm ist durch die anfangs geringe Verkehrsnachfrage von 600 Kfz/h zu erklären, welche rasch auf über 1700 Kfz/h steigt. Während die ersten 5 Trajektorien noch sehr schnelle mittlere Reisegeschwindigkeiten mit bis zu 49,3 km/h erreichen, sinkt diese während der letzten 3 Fahrten auf 27,0 km/h. Hingegen wird im Nachprogramm die schnellste Fahrt mit durchschnittlich 46,1 km/h absolviert, die langsamste mit 38,1 km/h. Dies führt dazu, dass im Nachprogramm geringere mittlere Werte auftreten, was sowohl für den Median als auch für den Mittelwert gilt. Entsprechend ist auch eine geringere Streuung um den Mittelwert zu beobachten. Da auch Tag- und Abendprogramm in Median und Mittelwert höhere mittlere Reisegeschwindigkeiten aufweisen, kann auf eine schlechtere Koordinierung im Nachprogramm geschlossen werden. Diese Annahme wird durch höhere Werte des Beschleunigungsrauschens und vor Allem der Stillstandsanteile bestätigt werden. Durch eine unzureichende Koordinierung verbringen die Fahrer im Nachprogramm 18% im Stillstand (Tagesmittel 9%) und weisen die Fahrzeuge ein auffälligeres Beschleunigungs- und Bremsverhalten auf, welches durch ein höheres Beschleunigungsrauschen gekennzeichnet ist ( $0,60 \text{ m/s}^2$  bei einem Tagesmittel von  $0,54 \text{ m/s}^2$ ). Die höchste Streuung des Beschleunigungsrauschens tritt hingegen im Tagesprogramm auf bei einer Verkehrsnachfrage von 800 bis 1000 Kfz/h. Bei dieser im Vergleich zu den anderen Untersuchungszeiträumen mittleren Verkehrsnachfrage weisen die Fahrten also sehr unterschiedliche Verläufe auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mehr Fahrzeuge in die Koordinierung fallen als im Nachprogramm (ersichtlich aus den einzelnen Reisezeiten),

jedoch auch einige Fahrten vergleichsweise niedrige mittlere Reisegeschwindigkeiten von bis zu nur 35,1 km/h aufweisen.

2. Triester Straße, Fahrtrichtung Nord

Die Triester Straße besitzt wie die Wiener Straße eine radiale Funktion, jedoch im Süden von Graz. Dadurch erklärt sich die Spitze der Verkehrsnachfrage im Morgenprogramm in Fahrtrichtung Nord (bis zu etwa 1300 Kfz/h) mit den geringsten mittleren Reisegeschwindigkeiten (Median und Mittelwert). Die Stillstandsanteile sind am Morgen deutlich am Höchsten (Mittelwert von 23%, Tagesmittel von 16%) bei gleichzeitig geringer Streuung. Auch das Beschleunigungsrauschen weist im Morgenprogramm die höchsten Werte auf. Im Abendprogramm mit der zweithöchsten Verkehrsbelastung zwischen 800 und 1000 Kfz/h wird im Mittel (Median, sowie Mittelwert) das geringste Beschleunigungsrauschen gemessen (jeweils 0,58), im Mittel tritt aber der zweithöchste Stillstandsanteil nach dem Morgenprogramm auf.

3. Triester Straße, Fahrtrichtung Süd

Die Spitzenbelastung von etwa 1200 Kfz/h wird im Abendprogramm erreicht, das Nachtprogramm weist die geringsten Verkehrsstärken auf (<600 Kfz/h). Die mittleren Reisegeschwindigkeiten sind dennoch sehr konstant, der Mittelwert des Abendprogramms (38,5 km/h) liegt nur um 2 km/h unter dem Tagesmittel und weist im Vergleich zur umgekehrten Fahrtrichtung (Nord) eine geringere Streuung auf. Dies ist auf die schwächer ausgeprägte Verkehrsspitze (geringere Schwankung je Zeit und geringeres Maximum) zurückzuführen. Jedoch kann im Morgenprogramm ein deutlich erhöhtes Beschleunigungsrauschen (Median 0,72 bzw. Mittelwert 0,71) bei gleichzeitig niedriger Verkehrsbelastung (zwischen 400 und 800 Kfz/h) festgestellt werden, im Nachtprogramm bei noch geringerer Verkehrsbelastung hingegen ein deutlich geringeres (0,56 bzw. 0,54).

4. Schönaugürtel, Fahrtrichtung Nord

Die radiale Funktion und Zentrumsnähe des Schönaugürtels spiegelt sich in der Verkehrsnachfrage, welche ähnliche Spitzen am Morgen und am Abend aufweist (Maxima zwischen 1500 und 1600 Kfz/h) und welche zwischen diesen Spitzen nicht unter 1000 Kfz/h sinkt. Hingegen ist das Verkehrsaufkommen nach 19:00 Uhr (Abendprogramm) deutlich geringer (<800 Kfz/h), hier treten auch die höchsten mittleren Reisegeschwindigkeiten auf. Auffällig ist hingegen die geringe mittlere Geschwindigkeit im Abendprogramm (Median 18,5, Mittelwert 19,5) und das auch vergleichsweise geringe Maximum von 29 km/h, welche deutlich unter den Werten der Morgenspitze liegen. In diesem Fall liegt die Vermutung nahe, dass der anschließende Streckenzug stark belastet ist. Tatsächlich endet die Koordinierung vor dem Streckenzug der Triester Straße, welche wie in (2.) und (3.) erwähnt zu dieser Tageszeit keine Auffälligkeiten hinsichtlich der mittleren Reisegeschwindigkeit aufweisen. Sehr wahrscheinlich ist also eine Auswirkung dieses Streckenzugs auf das Untersuchungsgebiet des Schönaugürtels. Auffallend sind auch die hohen Stillstandsanteile, welche am Abend den höchsten Mittelwert erreichen (41%, Tagesmittel 31%), wobei sie auch im Nachtprogramm im Vergleich zu obigen Streckenzügen einen hohen Mittelwert von 21% annehmen. Die Mittelwerte des Beschleunigungsrauschens weichen hingegen nur geringfügig von dem im Vergleich zu vorigen Streckenzügen sehr hohen Tagesmittel von 0,71 m/s<sup>2</sup> ab.

### 5. Schönaugürtel, Fahrtrichtung Süd

In diesem Untersuchungsgebiet sind die Mittelwerte der mittleren Reisegeschwindigkeit umgekehrt entsprechend der Verkehrsnachfrage verteilt: Der geringste Mittelwert (23,6 km/h) wird zur Zeit der höchsten Belastung erreicht (Abendprogramm), etwas schneller fließt der Verkehr am Morgen (26,9 km/h), im Signalprogramm Tag wird ein Wert von 30,4 km/h erreicht und am Abend bei der geringsten Belastung werden im Mittel 34,4 km/h gemessen. Passend dazu sind die Mittelwerte der Stillstandsanteile so wie die Belastungen verteilt, entsprechend auch der Congestion Index. Das Beschleunigungsrauschen folgt diesem Trend zwar nicht, aber wie in der Gegenrichtung weisen die Mittelwerte auch in diesem Fall verhältnismäßig hohe Werte über 0,70 m/s<sup>2</sup> auf.

#### Zusammenfassung

Hohe Verkehrsbelastungen an der Kapazitätsgrenze führen nach dem Fundamentaldiagramm zu Verkehrszusammenbrüchen. Diese können zwar am innerstädtischen Verkehrsnetz aufgrund der inhomogenen Querschnitte (viele Knotenpunkte) und Einflüsse (Lichtsignalprogramme) nicht ident erhoben werden, doch das Erreichen der Kapazität spiegelt sich in der geringeren Reisegeschwindigkeit und also der Reisezeit bzw. im Congestion Index, welcher die Reisezeitverlängerung je nach ihrer Ausprägung bewertet.

Da teilweise in niedrig belasteten Zeiträumen ein vergleichsweise hohes Beschleunigungsrauschen auftritt, obwohl die mittlere Reisegeschwindigkeit und die Stillstandsanteile keine Auffälligkeiten aufweisen, eröffnet sich die Frage, ob und wie stark das Beschleunigungsrauschen vom Fahrverhalten des Testfahrers beeinflusst werden kann und wird. Dieser Fragestellung wird jedoch in dieser Arbeit nicht weiter aufgegriffen und bedarf daher weiterer Forschung.

Aus den unterschiedlichen Datensätzen je Untersuchungsgebiet ist jedoch der **Einfluss der Infrastruktur** zu beobachten. Die beiden Fahrtrichtungen weisen je Untersuchungsgebiet ähnliche Charakteristika auf (Knotenpunktdichte, Bebauung, tägliche Verkehrsmenge, Bebauung). Selbiges gilt für die Tagesmittel des Beschleunigungsrauschens, welche je Fahrtrichtung um maximal 0,03 m/s<sup>2</sup> voneinander abweichen (siehe Tabelle 17). Hingegen führt eine höhere Knotenpunktdichte zu einem höheren, je Untersuchungsgebiet charakteristischen Beschleunigungsrauschen.

**Tabelle 17: Tagesmittel des Beschleunigungsrauschens je Untersuchungsgebiet**

Untersuchungsgebiet	Wiener Straße		Triester Straße		Schönaugürtel	
	Nord	Süd	Nord	Süd	Nord	Süd
<b>Fahrtrichtung</b>						
<b>Beschl.rauschen [m/s<sup>2</sup>]</b>	<b>0.53</b>	<b>0.54</b>	<b>0.61</b>	<b>0.61</b>	<b>0.71</b>	<b>0.74</b>
<b>Knotenpunktdichte [KP/km]</b>	2.6	2.9	3.6	3.6	4.4	4.4

Der Schönaugürtel weist bei der höchsten Knotenpunktdichte das höchste Beschleunigungsrauschen auf (Mittel: 0,73 m/s<sup>2</sup>), die Wiener Straße bei der geringsten Knotenpunktdichte 0,54 m/s<sup>2</sup>. In der Mitte hinsichtlich Knotenpunktdichte und Beschleunigungsrauschen liegt die Triester Straße mit 0,61 m/s<sup>2</sup>.

### 6.3 Vergleichsanalyse am Untersuchungsgebiet Wiener Straße

An der Wiener Straße wurden zwischen den beiden Messreihen (1. Messreihe: April 2012, 2. Messreihe: November 2012) Maßnahmen in der Lichtsignalsteuerung gesetzt, mit dem Ziel, den Verkehrsfluss auf dem Streckenzug zu verbessern. Diese Messfahrten werden in diesem Abschnitt vergleichend ausgewertet. Hierzu wurden die Mittelwerte von Messung 1 und Messung 2 der Verkehrsbelastungen und fahrdynamischen Kenngrößen für die jeweils untersuchten Zeiträume, unterschieden nach Signalprogrammen, je Messreihe und Signalprogramm gegenübergestellt, sowie die absolute und relative Veränderung der Kenngrößen von Messung 1 zu Messung 2 ermittelt (siehe Anhang B).

#### Untersuchungsgebiet Wiener Straße, Fahrtrichtung Süd

Die Ganglinien der Verkehrsbelastung zeigen für beide Messreihen sehr ähnliche Verläufe in den untersuchten Zeiträumen (Abbildung 58). Die Verkehrsmengen liegen während der zweiten Messungen um 4,5% bis 10,9% über jenen der ersten (siehe „Verkehrsbelastung“ in Tabelle 18).

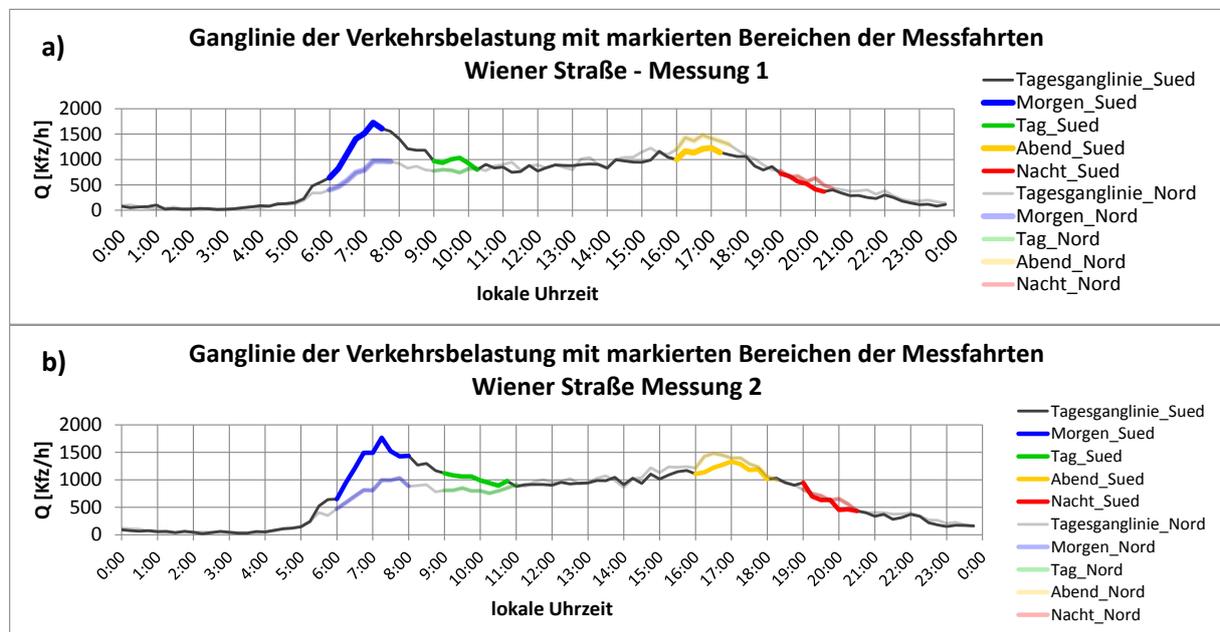


Abbildung 58: Ganglinie der Verkehrsbelastung Wiener Straße: Messung 1 (a) und Messung 2 (b)

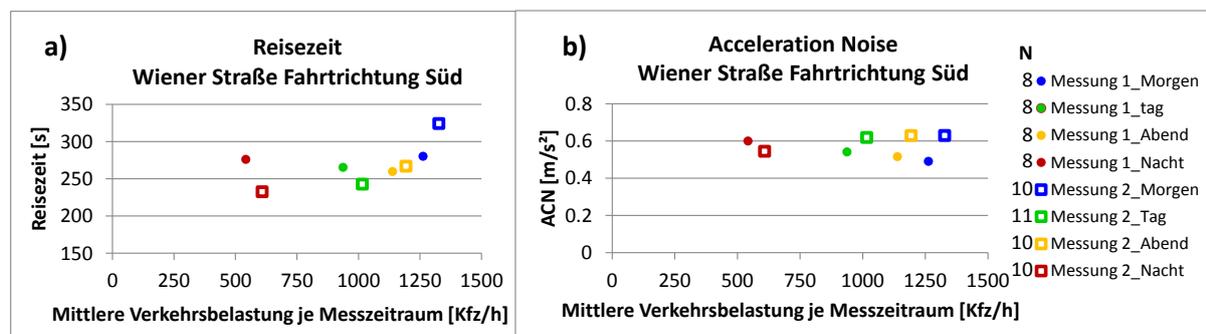
Hingegen ergeben sich für die Kenngrößen deutliche Unterschiede. Etwa sinkt die mittlere Reisegeschwindigkeit im Morgenprogramm um über 10% bei einem Verkehrszuwachs von 4,9%. Dies ist aber auch darauf zurückzuführen, dass die Daten über einen geringfügig höheren Zeitraum aufgenommen wurden und der hoch belastete Zeitraum bei etwa 1500 Kfz/h länger observiert wurde (siehe „Morgen\_Sued“ in Abbildung 58 b). So konnten für eine bessere Repräsentativität je Untersuchungsgebiet und Zeitraum zwei weitere Messfahrten durchgeführt werden. In den gemessenen Fahrten während des Morgenprogramms wurde in der zweiten Messreihe ein deutlicher Anstieg der Stillstandsanteile um 62,9% ausgehend von 6% Stillstandsanteil verzeichnet und auch das Beschleunigungsrauschen steigt um 28,4%. Für das Tagesprogramm konnte trotz Zuwachs der Verkehrsstärke um 7,7% eine Erhöhung der mittleren Reisegeschwindigkeit um 7,5% gemessen werden, was unter diesem Gesichtspunkt einer Effizienzsteigerung entspricht. Die Stillstandsanteile konnten dabei um 30,1% reduziert werden, allerdings ist ein auffälligeres Beschleunigungsverhalten (+14,3% Beschleunigungsrauschen) festzustellen. Im Abendprogramm, der zweiten Tagesspitze hinsichtlich der Verkehrsnachfrage, führt ein geringer Verkehrszuwachs um 4,5% mit einem Rückgang von 2,8% zu keiner deutlichen Veränderung der mittleren Reisegeschwindigkeit.

Auch der Stillstandsanteil steigt eher moderat um 9,2%. Deutlich hingegen ist der Zuwachs des Beschleunigungsrauschens um 22,2%.

**Tabelle 18: Mittelwerte der Kenngrößen aus stationärer und mobiler Messdatenerhebung (Messung 1) und prozentuelle Veränderung (Messung 2): Untersuchungsgebiet Wiener Straße, Fahrtrichtung Süd**

Signalprogr	Verkehrsbelastung		Reisegeschwindigkeit		Beschleunigungsrauschen		Stillstandsanteil	
	[Kfz/h]		[km/h]		[m/s <sup>2</sup> ]		[%]	
<b>Morgen</b>	1262	+4.9%	41.4	-10.4%	0,49	+28.4%	6,0	+62.9%
<b>Tag</b>	937	+7.7%	42.5	+7.5%	0,54	+14.3%	6,12	-30.1%
<b>Abend</b>	1139	+4.5%	42.8	-2.8%	0,52	+22.2%	4,55	+9.2%
<b>Nacht</b>	542	+10.9%	40.0	+19.0%	0,60	-9.1%	18,1	-83.5%

Signifikante Verbesserungen für den Verkehrsfluss konnten aber im Nachtprogramm gemessen werden. Bei einem Zuwachs von 10,9% der Verkehrsnachfrage konnte die sehr bescheidene mittlere Reisegeschwindigkeit von 40,0 km/h um 19,0% angehoben werden, bei einem mittleren Rückgang des Stillstandsanteils von 83,5% von dem ursprünglich sehr hohen Anteil von 18,9%. Und auch das Beschleunigungsrauschen erreicht bei einem Rückgang von 9,1% ein deutlich geringeres Niveau.



**Abbildung 59: Mittelwerte der Reisezeiten (a) und des Beschleunigungsrauschens (b): Wiener Straße, Fahrtrichtung Süd, Messungen 1 und 2**

Zusammenfassend sind in Abbildung 59 (a) die Mittelwerte der Reisezeiten abgebildet. Diese Kenngröße ist ein Äquivalent zur mittleren Reisegeschwindigkeit und für diese Betrachtung sinnvoll, da die Werte auf ein und demselben Streckenzug verglichen werden. Deutlich wird ersichtlich, dass in Messung 2 die Reisezeiten entsprechend der Verkehrslage steigen. Die in Messung zwei steigende Verkehrsbelastung im Zeitraum der höchsten Belastung (Morgen) führt zu einem starken Anstieg der Reisezeiten. Der vergleichsweise hohe Wert am Tag und in der Nacht aus Messung zwei sinkt deutlich. Der ersichtliche Zusammenhang zwischen Verkehrsbelastung und Reisezeit ist ein Hinweis auf die höhere Repräsentativität der Messreihe 2 (siehe Stichprobenanzahl N in Abbildung 59 (b)). Hier ist auch der Anstieg der Beschleunigungsrauschens (ACN) für die Untersuchungszeiträume Morgen, Tag und Nacht auf über 0,6 m/s<sup>2</sup> ersichtlich.

#### Untersuchungsgebiet Wiener Straße, Fahrtrichtung Nord

In Fahrtrichtung Nord wird in Messung 2 zur Zeit der Spitzenbelastung im Abendprogramm eine geringere mittlere Verkehrsbelastung (Abbildung 59 a) gemessen, dennoch steigt die Reisezeit von etwa 220 auf knapp unter 300 Sekunden. Auch das Beschleunigungsrauschen (Abbildung 59 b) steigt geringfügig, was gemeinsam auf einen schlechteren Verkehrsfluss schließen lässt. Die Reisezeiten bei mittleren Belastungen im Tag- und Abendprogramm bleiben annähernd gleich, für das Nachtprogramm ist wie in der Gegenrichtung eine Verbesserung ersichtlich. Für das Nachtprogramm

ist ebenfalls ein deutlicher Rückgang des Beschleunigungsrauschens um 38% ersichtlich (vgl. Anhang B).

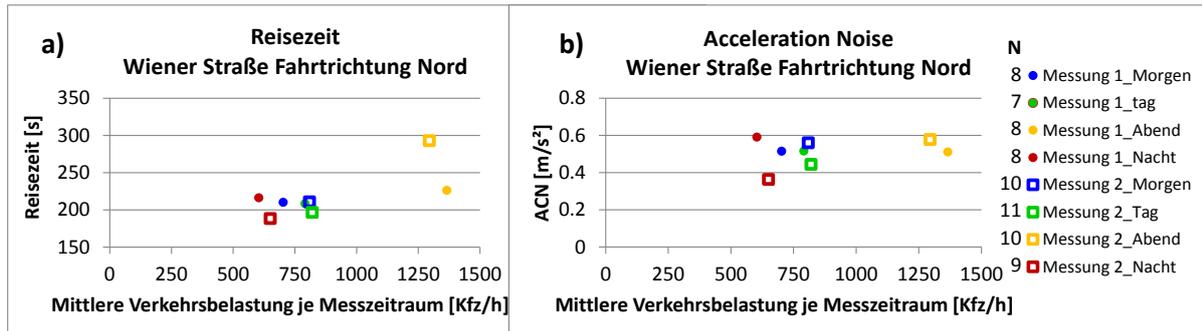


Abbildung 60: Mittelwerte der Reisezeiten (a) und des Beschleunigungsrauschens (b): Wiener Straße, Fahrtrichtung Nord, Messungen 1 und 2

## 6.4 Analyse von Geschwindigkeitsprofilen

Die einzelnen, aus jeweils einer Trajektorie gewonnenen mikroskopischen Kenngrößen Reisezeit  $T$  [s] und Beschleunigungsrauschen  $ACN$  [m/s<sup>2</sup>] werden in diesem Abschnitt einer Untersuchung ihrer zugrundeliegenden Geschwindigkeitsprofile unterzogen, um Schlüsse auf den Grund von Ausprägungen dieser ziehen zu können. Hierzu wurden die Geschwindigkeitstrajektorien mit den maximalen und minimalen Ausprägungen hinsichtlich Beschleunigungsrauschen und Reisezeit über die Reisedistanz aufgetragen, um einen Vergleich zu ermöglichen. Diese Auswertungen wurden für die Zeit die Spitzenbelastungen am Untersuchungsgebiet Wiener Straße und Schönaugürtel vorgenommen, da in dieser Zeit die höchsten Werte hinsichtlich Reisezeit und Beschleunigungsrauschen auftreten. Zusätzlich wurde das Nachtprogramm der Wiener Straße (Fahrtrichtung Süd) untersucht, da für dieses Signalprogramm auffällige Werte des Beschleunigungsrauschens festgestellt wurden.

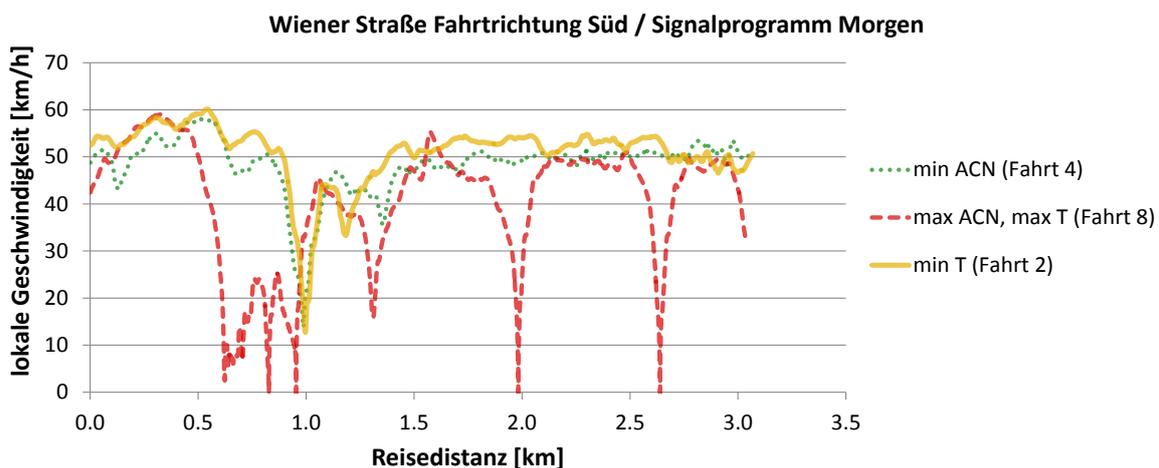


Abbildung 61: Geschwindigkeitsprofile Wiener Straße Süd, Signalprogramm Morgen

In Abbildung 61 sind verschiedene Geschwindigkeitsprofile des Untersuchungsgebiets Wiener Straße (Fahrtrichtung Süd, Morgenprogramm) abgebildet. Das Profil mit der kürzesten Reisezeit (min  $T$ , Fahrt 2) hat fast durchgängig höhere Ausprägungen, als jene mit dem minimalen Beschleunigungsrauschen (min  $ACN$ , Fahrt 4), wobei der Geschwindigkeitseinbruch bei km 1,0 ident ist. Das lässt darauf schließen, dass sich der Pulk, in welchem sich das Fahrzeug bewegt, bei Fahrt 2 schneller ist als bei Fahrt 4, und gleichzeitig geringere Beschleunigungs- und Bremsvorgänge

aufweist. Die maximale Reisezeit und das maximale Beschleunigungsrauschen treten in derselben Fahrt auf (8), welche durch viele Halte bzw. Geschwindigkeitseinbrüche charakterisiert wird.

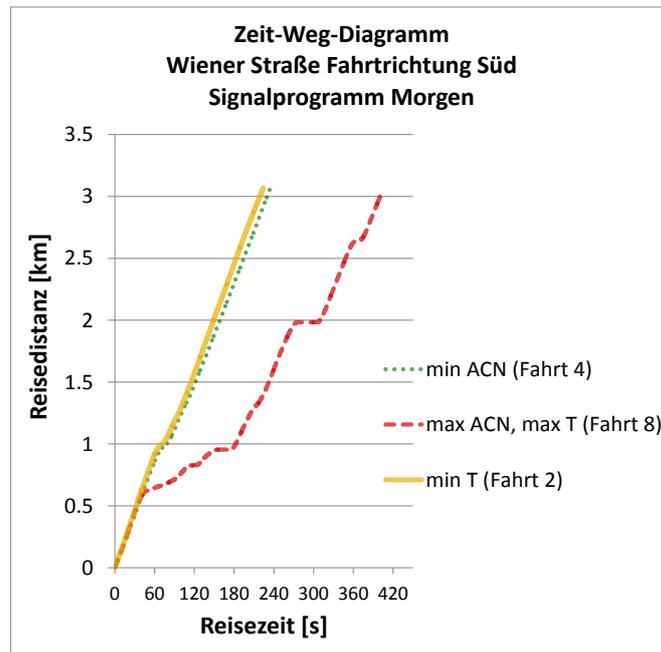


Abbildung 62: Zeit-Weg-Diagramm Wiener Straße Süd, Signalprogramm Morgen

Deutlich wird dieses Verhältnis im Zeit-Weg-Diagramm (Abbildung 62), in welchem die stark verlängerte Reisezeit der Fahrt 8 bedingt durch die vielen, bisweilen langen Halte (vgl. horizontaler Verlauf Fahrt 8 bei km 2). Es wird auch ersichtlich, dass der Stop-And-Go-Verkehr zwischen km 0,6 und 1,0 (Abbildung 61, Fahrt 8) mit stark schwankenden Geschwindigkeiten im Bereich zwischen 0 und 25 km/h zu einer flachen Kurve im Zeit-Weg-Diagramm (Abbildung 62) führt.

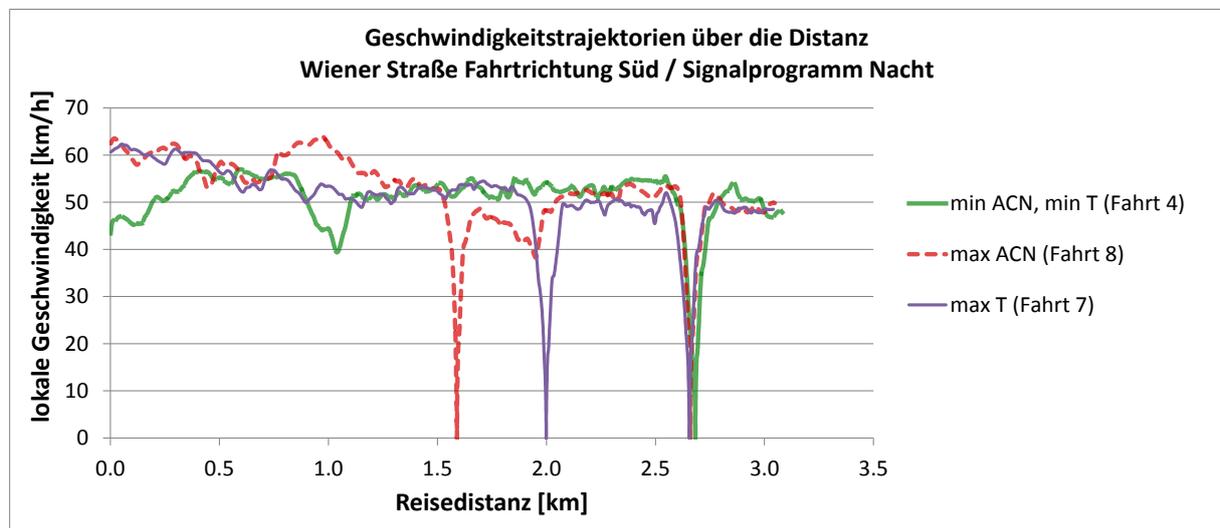


Abbildung 63: Geschwindigkeitsprofile Wiener Straße Süd, Signalprogramm Nacht

Für das Signalprogramm Nacht kann festgestellt werden, dass die Fahrten 7 (maximale Reisezeit) und 8 (maximales Beschleunigungsrauschen) sehr ähnliche Verläufe aufweisen (siehe Abbildung 63). Während der zweite Halt ident ist (bei km 2,7), findet der jeweils erste Halt an verschiedenen Stellen statt. Die längere Reisezeit von Fahrt 8 ist dadurch zu erklären, dass zwischen km 0,7 und 1,4 eine sehr hohe Geschwindigkeit (> 60 km/h) erreicht wird, welche durch eine erhöhte Geschwindigkeit bei grün blinkender VLSA gedeutet werden kann, um diese ohne Halt zu durchfahren, während bei Fahrt 7 dieselbe Passage mit verhältnismäßig konstanter Geschwindigkeit durchfahren wird. Dies wirkt sich

auch im Zeit-Weg-Diagramm (Abbildung 64) aus, in welchem für den beschriebenen Abschnitt eine geringfügig steilerer Verlauf erkennbar ist. Zusätzlich ist der Halt von Fahrt 7 bei km 2,0 etwas länger als der erste Halt von Fahrt 8 bei km 1,7, was am Ende (km 3,0) eine längere Reisezeit für Fahrt 7 ergibt. Das stärkere Beschleunigungsrauschen von Fahrt 8 im Vergleich zu Fahrt 7 kann jedoch in aus dem Geschwindigkeitsverlauf nicht abgelesen werden. Minimale Reisezeit und minimales Beschleunigungsrauschen treten in derselben Fahrt (4) auf.

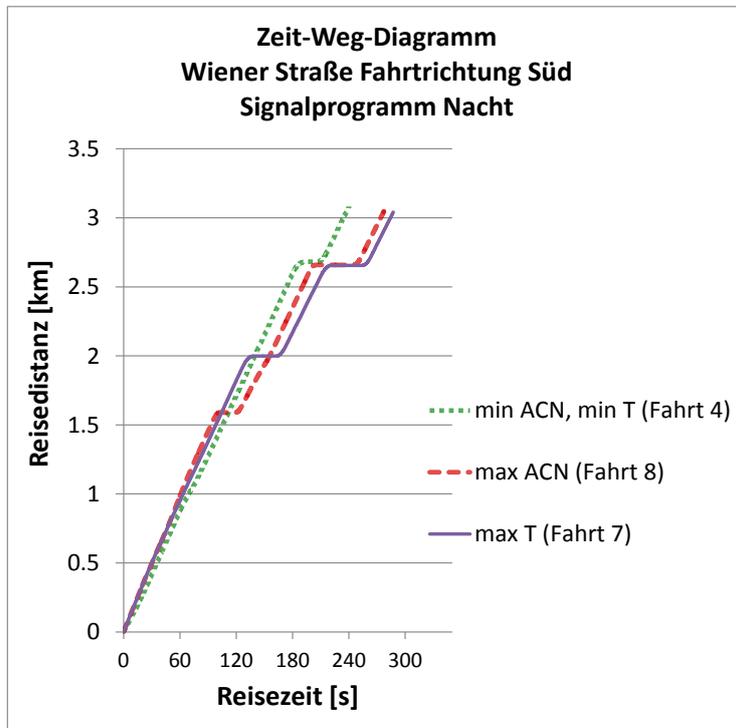


Abbildung 64: Zeit-Weg-Diagramm Wiener Straße Süd, Signalprogramm Nacht

Für das Untersuchungsgebiet Schönaugürtel, Fahrtrichtung Süd, können im Abendprogramm differenziertere Fahrverläufe beobachtet werden.

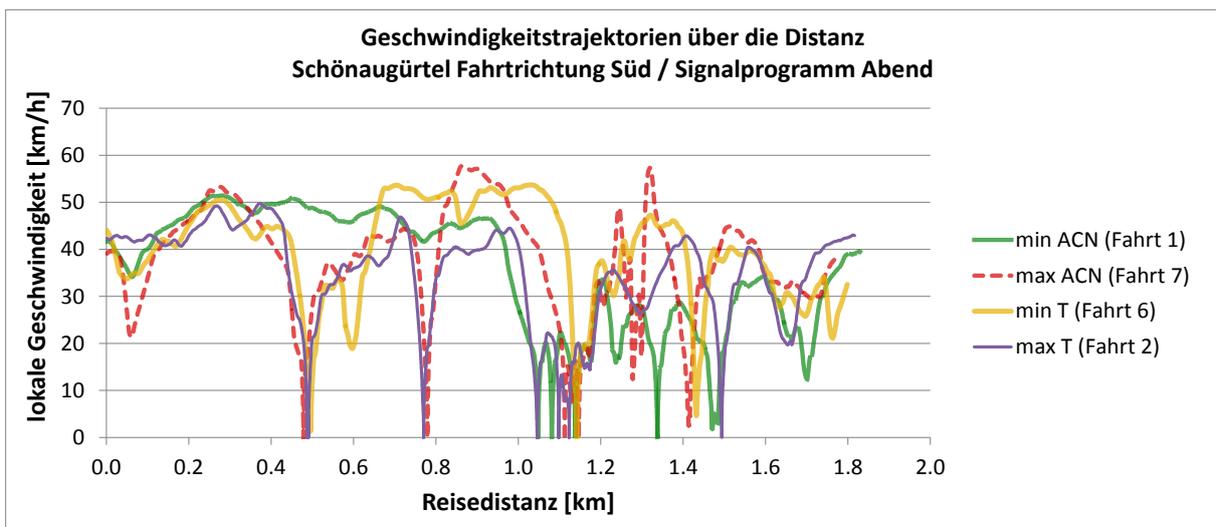
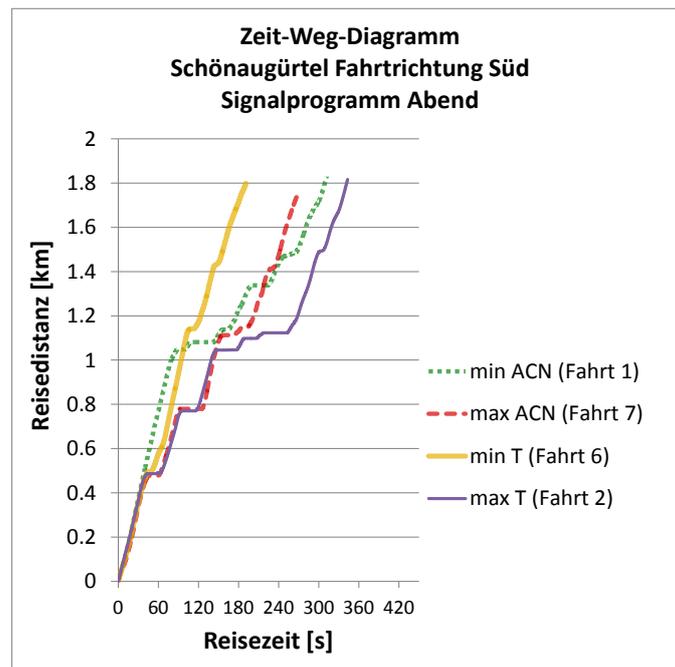


Abbildung 65: Geschwindigkeitsprofile Schönaugürtel Süd, Signalprogramm Nacht

Etwa unterscheidet sich die Reisezeit für jene Trajektorie mit der längsten Reisezeit (Fahrt 6) stark von jener mit dem höchsten Beschleunigungsrauschen (Fahrt 7) (siehe Abbildung 66), was auf sehr starke Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge bei Fahrt 7 im Bereich zwischen km 1,2 und 1,4 zurückzuführen ist (Abbildung 65). Generell werden in diesem Untersuchungsgebiet viele Halte und

damit einhergehende Verzögerungs- und Beschleunigungsbereiche beobachtet. Jene Fahrt (1) mit dem geringsten Beschleunigungsrauschen weist zu Beginn der Fahrt (bis km 1,0) jedoch keine Halte auf und auch die im Vergleich zu den anderen Profilen in Abbildung 65 geringeren maximalen Geschwindigkeiten im Bereich zwischen km 1,2 und 1,8 und den damit einhergehenden geringeren Beschleunigungen/Verzögerungen tragen zu einem geringeren Beschleunigungsrauschen bei. Die minimale Reisezeit von Fahrt 6, deren Zeit-Weg-Kurve im Vergleich zu den übrigen Trajektorien sehr steil ausfällt und nur kurze horizontale (Stillstand) Bereiche aufweist, ist auf die vergleichsweise hohen Geschwindigkeiten zwischen den Halten zurückzuführen, welche zwischen km 0,7 und 1,1 sogar eine plateauartige Ausbildung haben, welche auf eine Fahrt bei Wunschgeschwindigkeit schließen lässt.



**Abbildung 66: Zeit-Weg-Diagramm Schönaugürtel Süd, Signalprogramm Abend**

Die Betrachtung von Geschwindigkeitsprofilen und den entsprechenden Zeit-Weg-Diagrammen weist auf einen nicht ursächlichen Zusammenhang von Reisegeschwindigkeit und Beschleunigungsrauschen hin, welcher bereits in Abschnitt 5.3 festgestellt wurde. Die individuellen Ausprägungen der Geschwindigkeitsprofile führt zu verschiedenen qualitativen Ausprägungen der Kenngröße des Beschleunigungsrauschens, welche daher in Abschnitt 7.3 einer genaueren Untersuchung mit einer großen Datenbasis auf Basis einer Mikrosimulation unterzogen wird.

Es kann jedoch festgestellt werden, dass das Beschleunigungsrauschen von großen Änderungen in der Geschwindigkeit vergrößernd beeinflusst wird, also bei Halten und bei Verzögerungen auf eine viel geringere Geschwindigkeit als der gewünschten.

## 7 Auswertung simulationsbasierter Einzelfahrzeugdaten

Aus realen Messfahrten kann nur ein begrenzter Anteil der am Verkehr teilnehmenden Fahrzeuge erfasst werden, mit geringem Aufwand lassen sich nur geringe Durchdringungsgrade realisieren (vgl. Tabelle 11 in Abschnitt 5.1). Für die Erzeugung einer größeren Datenbasis bedient man sich mikro- und makroskopischer Verkehrsmodelle, deren Datenoutput für die Verkehrsflussanalyse herangezogen werden kann. Mit mikroskopischen Verkehrsmodellen kann die reale Straßengeometrie und Lichtsignalsteuerung nachgebildet werden, sowie alle am Verkehr teilnehmenden Fahrzeuge. Somit stehen die Daten der Grundgesamtheit für eine Analyse zur Verfügung. Für diese Arbeit werden entsprechend der realen streckenbezogenen Einzelfahrzeugdaten zeitlich äquidistante Geschwindigkeitsinformationen der simulierten Fahrzeuge erzeugt und anschließend aufbereitet und analysiert.

### 7.1 Grundlagen Mikroskopische Simulation

Mit den Simulationsdaten sollen verschiedene Fragestellungen beantwortet werden, die sich bei der Realdatenanalyse eröffneten. Drei Fragestellungen sollen in diesem Teil der Arbeit behandelt werden:

1. Benötigter Durchdringungsgrad

Die Daten aus den realen Messfahrten stellen eine geringe Stichprobe aus dem gesamten Verkehrsaufkommen dar und liegt während einer Messung bei maximal einem Prozent (vgl. Abschnitt 5.1). Da bei den realen Messungen von der Grundgesamtheit nur die Verkehrsmenge, nicht aber fahrdynamische Kenngrößen bekannt sind, kann diese Frage aus rein empirischen Daten nicht beantwortet werden. Die Fragestellung für die Simulationsanalyse lautet:

„Welcher Durchdringungsgrad bzw. wie viele Messfahrzeuge sind nötig, um aus den so erzeugten fahrdynamischen Kenngrößen auf die Gesamtheit des einen Straßenzug befahrenden Verkehrs zu schließen?“

2. Sensitivität hinsichtlich der Verkehrsmenge

Die sich mit der Tageszeit verändernde Verkehrsmenge wirkt sich auf fahrdynamische Kenngrößen aus (vgl. Abschnitt 6.2). Durch eine Sensitivitätsanalyse soll folgende Fragestellung beantwortet werden:

"Welchen Einfluss nimmt die Verkehrsstärke auf fahrdynamische Kenngrößen?"

3. Sensitivität hinsichtlich der Signalsteuerung

Neben der Verkehrsstärke ist ein weiterer wichtiger Einfluss auf den Verkehrsablauf die Signalsteuerung. Durch eine Sensitivitätsanalyse wird auf die folgende Aufgabenstellung eingegangen:

„Wie verändern sich fahrdynamische Kenngrößen bei Änderung der Signalsteuerung?“

Für diese Fragestellungen muss eine geeignete Simulationsumgebung mit verschiedenen Szenarien geschaffen werden, um die in der Simulation erzeugten Daten weiterverarbeiten und einer Analyse unterziehen zu können. Für die Simulation wurde das mikroskopische Verkehrssimulationsprogramm VISSIM der PTV AG herangezogen. Diesem liegt ein mikroskopisches, zeitschrittorientiertes und verhaltensbasiertes Verkehrsflussmodell zugrunde, welches in der Lage ist, den motorisierten und nicht motorisierten Individualverkehr (IV), sowie den straßen- und schienengebundenen öffentlichen Nahverkehr (ÖV) zu modellieren. Grundlegende Eingangsgrößen für den Aufbau der Simulation sind die Streckengeometrie, die Verkehrszusammensetzung und die Lichtsignalsteuerung.

Das Fahrverhalten eines jeden Fahrzeugs ist abhängig von der Geometrie, Verkehrsinfrastruktur und umgebenden Fahrzeugen. Das Fahrzeugfolgemedell ist die Basis für das Fahrzeugfolgeverhalten, welches die Interaktion mit anderen Fahrzeugen bzw. mit dem umgebenden Verkehrsgeschehen beschreibt. Für diese Arbeit wurde das Fahrzeugfolgemedell „Wiedemann 99“ (VISSIM, 2012) mit den Standardeinstellungen verwendet.

### **7.1.1 Aufbau der Mikrosimulation**

Für die Simulation wurde der Streckenzug der Wienerstraße aus der Realdatenuntersuchung herangezogen (Abschnitt 5.1). Dieser je Fahrtrichtung zweistreifige Straßenabschnitt wurde in einer abstrahierten Form für die südliche Fahrtrichtung mit den realen Längen abgebildet. Die Verkehrsbelastungen (vgl. Anhang C) wurden den Strombelastungsplänen der Morgenspitze aus dem Jahre 2011 (FALLAST, 2012) entnommen und in der Simulation als stochastische Zuflüsse und Richtungsentscheidungen eingepflegt. Linksabbieger wurden in den Fahrstrom der Rechtsabbieger integriert, wobei entsprechende Längen der Linksabbiegestreifen für die Rechtsabbieger berücksichtigt wurden. Die Lichtsignalprogramme wurden ebenfalls diesem Projekt entnommen (siehe Anhang C). So konnten für alle Knotenpunkte das jeweilige reale Morgenprogramm übernommen werden. Eine geringfügige Vereinfachung erfährt das Modell dabei durch die Nichtberücksichtigung von verkehrabhängigen Änderungen der Steuerprogramme. Im Anhang werden die Lichtsignalprogramme aller Knotenpunkte, sowie die jeweiligen Knotenstrombelastungen aufgeführt. In der Simulation konnten die Verkehrsströme, welche nur die nördliche Fahrtrichtung betreffen, vernachlässigt werden. Weiters wurden minimale Zuflüsse nicht in die Simulation übernommen, sowie alle Fahrzeuge als PKW ausgewiesen (kein LKW-Anteil). Die Lichtsignalprogramme an diesem Streckenzug wurden so gewählt, dass sie eine koordinierte Lichtsignalsteuerung ergeben. So wird den Fahrern die Möglichkeit gegeben, bei Einhaltung der Koordinierungsgeschwindigkeit den Streckenzug im Idealfall ohne Halte zu Durchfahren. Die Koordinierungsgeschwindigkeit beträgt zunächst 60 km/h, nach etwa einem Kilometer 50 km/h. Diese Geschwindigkeiten gelten an den entsprechenden Strecken als zulässige Höchstgeschwindigkeiten und wurden auch als Wunschgeschwindigkeiten in das Modell übernommen. Das zugrundeliegende Grünzeitenband findet sich in Anhang C, in südlicher Fahrtrichtung werden die aufgeführten Knotenpunkte von links nach rechts durchfahren. Die Umlaufzeit je Signalgruppe beträgt 80 Sekunden. Da alle simulierten Knotenpunkte VLSA-gesteuert sind, wurde auf Konfliktflächen verzichtet, welche die Vorfahrt an Knotenpunkten regeln. Da aus dem Projekt GAVe (HIRSCHMANN et al., 2009) bekannt ist, dass die Standard-Fahrverhaltenseinstellungen keine realistischen Standard-Beschleunigungswerte aufweisen, wurden die maximale und Wunschbeschleunigungen entsprechend angepasst (nach HIRSCHMANN et al., 2009).

### 7.1.2 Simulationsdurchführung und Datenausgabe in VISSIM

Je Simulation wurden 10 Simulationsläufe mit verschiedenen Startzufallszahlen durchgeführt, um durch diese Variation die Ergebnisse stochastisch zu sichern (PTV VISION, 2012). Die Gesamtmenge des Datenoutputs dieser jeweils 10 Simulationsläufe dient anschließend als Grundlage für die Datenanalyse. Jede Simulation wird mit einer Vorlaufzeit von 30 Minuten durchgeführt, um das Netz vor dem jeweiligen Analysezeitraum mit Fahrzeugen zu füllen. Eine Übersicht über den simulierten Streckenzug bietet Abbildung 67. Dabei werden die Straßennamen und die Längen der einzelnen Strecken zwischen den Knotenpunkten, die Gesamtlänge, Freigabezeiten, Zuflussmengen und allgemeine Simulationsdaten aufgeführt. Variable Zuflüsse für die Simulation von verschiedenen Verkehrsmengen sind mit einem \* markiert.

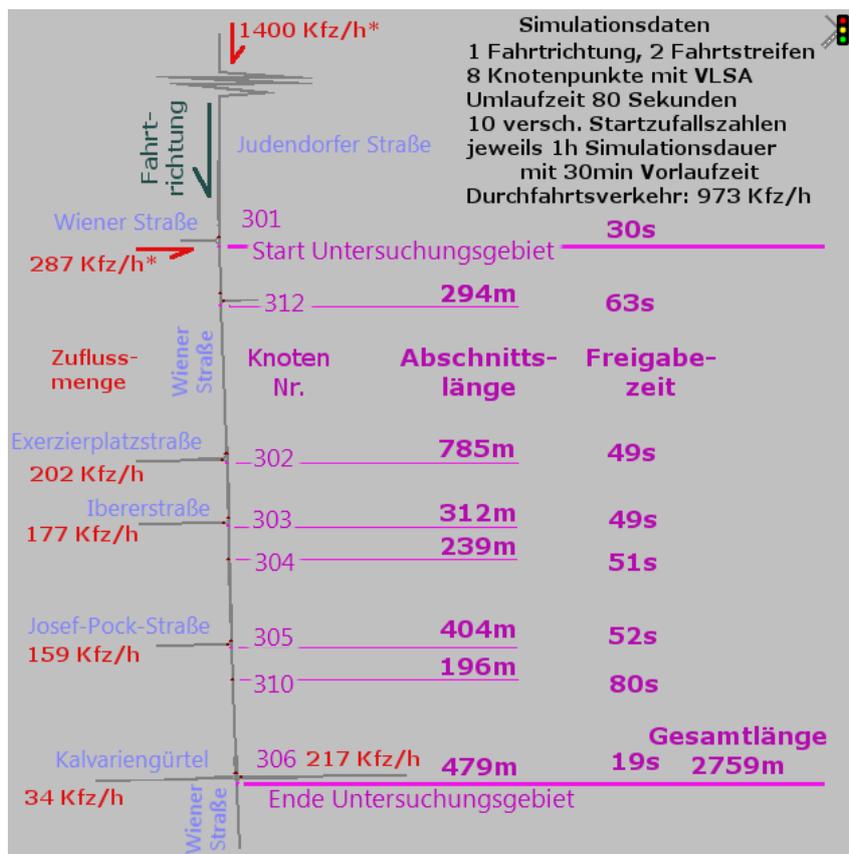


Abbildung 67: Simulierter Streckenzug (VISSIM) mit Längenangaben und Simulationsdaten

Alle Längen wurden dabei anhand der Orthofotos des Digitalen Atlas Steiermark (2012) gemessen und am Günzeitenband kontrolliert. Wie bei der Realdatenaufbereitung beginnt das Untersuchungsgebiet nach dem Kreuzungsbereich. Am Beispiel des Knotenpunkts 301 (Abbildung 68) sind die Haltelinien im Zufluss aus nördlicher Richtung (zwei in Hauptfahrtrichtung und ein Rechtsabbieger) und im Zufluss aus der westlichen Richtung (Wiener Straße) ersichtliche.



Abbildung 68: Screenshot der VLSA 301 (VISSIM)

Die zur Auswertung herangezogenen Daten sind sogenannte „Fahrzeugprotokolle“ mit der Dateiendung \*.fzp, die unter anderem wie GPS-Daten die Informationen Zeitstempel und momentane Geschwindigkeit zur Verfügung stellen. Eine weitere Datenbasis stellen „Streckenauswertungen“ (\*.str) dar, welche zusätzliche Informationen über die Verkehrsmenge liefern können. In einem Aufbereitungsschritt können diese beiden Datensätze gematcht und so die für die Analyse relevanten Größen Verkehrsmenge, Geschwindigkeit und Zeitstempel ausgegeben werden.

Die Geschwindigkeitsinformationen werden mit einer Frequenz von 1Hz geloggt. Insofern unterschieden sich die Simulations- von den Realdaten (Abschnitt 5) da ein 10Hz-Logging bedingt durch die zehnfache Datenmenge außerordentliche Speicherkapazitäten und in weiterer Folge lange Rechenzeiten für die Datenverarbeitung erfordert. Um jeder Geschwindigkeitsinformation eine Verkehrsmenge zuordnen zu können, wurden je Strecke mittlere Verkehrsmengen in 7,5-Minuten-Schritten ermittelt. Es stellte sich heraus, dass dieses Intervall die Verkehrsmengen nicht zu stark verschmiert (wie etwa bei größeren Intervallen) und bei einer Umlaufzeit von 80 Sekunden jedoch die durch die Lichtsignalanlagen bedingten Spitzen und Täler in der Verkehrsbelegung abgefangen werden.

## 7.2 Datenaufbereitung des Simulationsoutputs

Der Datenoutput aus der Simulation wird mit Skripten aufbereitet, welche mit der Statistiksoftware R-Project realisiert wurden. Hierzu wurden die Skripte aus der Realdatenaufbereitung (siehe Abschnitt 5.2) angepasst und erweitert, um fahrdynamische Kenngrößen zu berechnen und Informationen der Verkehrsmenge einfließen zu lassen. Anschließend wurde eine graphische Datenausgabe implementiert, die gesammelte Mittelwerte und Standardabweichungen je gewählter Kenngröße graphisch und in Listenform aufbereitet. Die verwendeten Skripte liegen der Arbeit in digitaler Form bei und können nach dem Schema in Abbildung 69 angewandt werden.

# Auswertung simulationsbasierter Einzelfahrzeugdaten

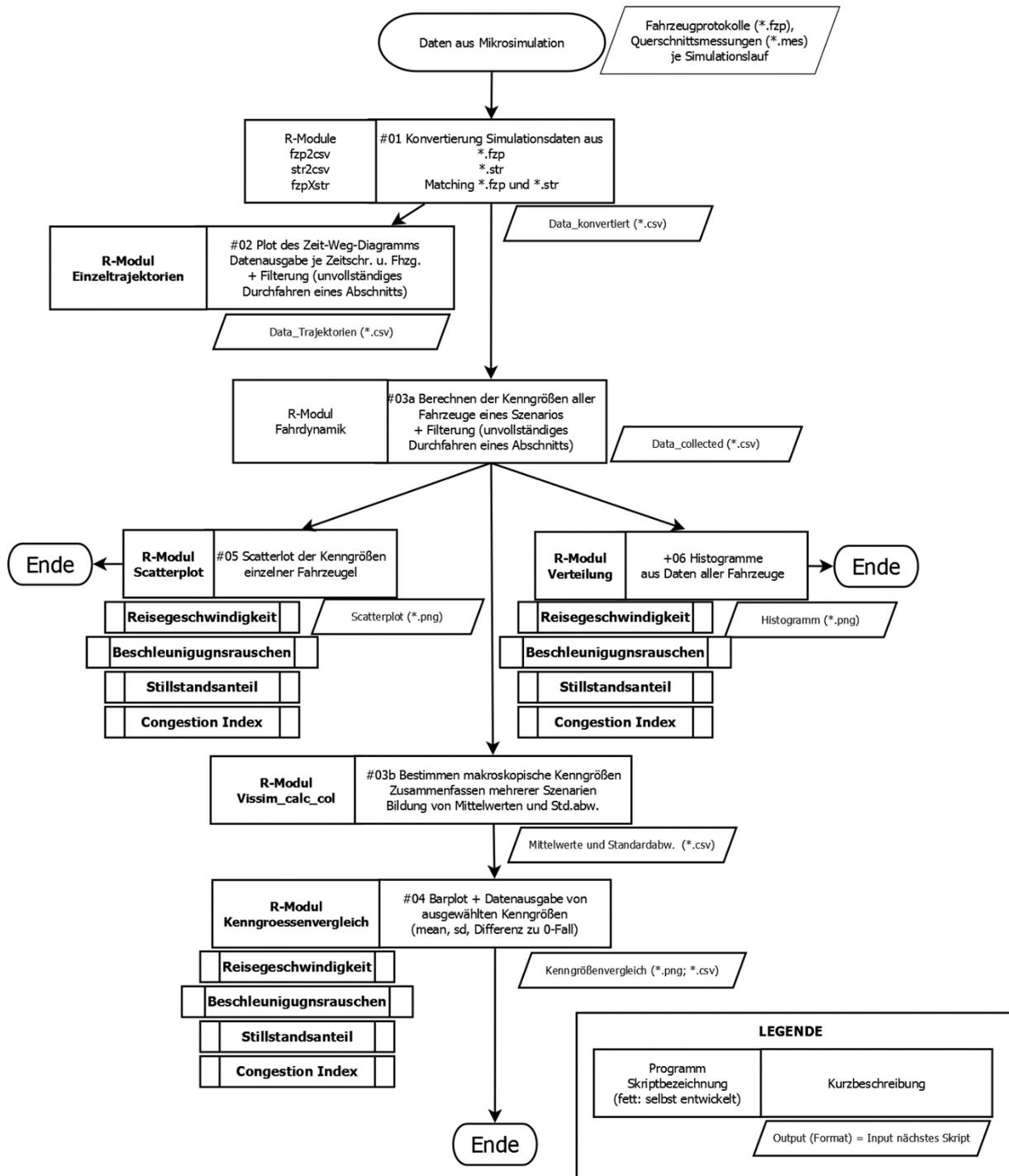


Abbildung 69: Skripte und Ablauf des Simulationsdatenpostprocessings

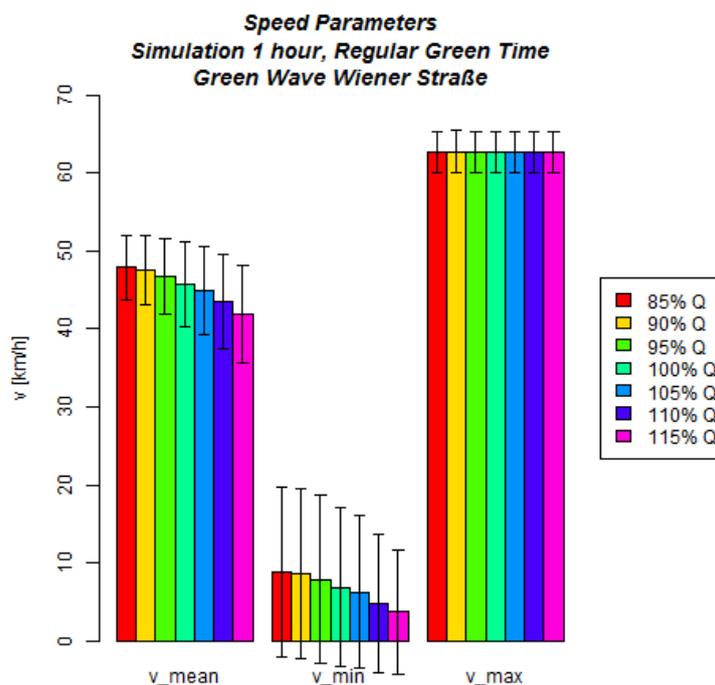
Die aufbereiteten Datensätze werden in den folgenden Abschnitten analysiert.

## 7.3 Sensitivitätsanalyse

In diesem Abschnitt wird der Einfluss von verschiedenen Faktoren auf die mittleren Kenngrößen Reise­geschwindigkeit, Beschleunigungsrauschen, Stillstandsanteile und Congestion Index untersucht. Die untersuchten Faktoren sind die Verkehrsmenge, die Signalsteuerung und zusätzlich das Fahrzeugfolgeverhalten, welche nacheinander in den folgenden Abschnitten untersucht werden.

### 7.3.1 Einfluss der Verkehrsmenge

In diesem Teil wird der Einfluss der Verkehrsmenge auf fahrdynamische Kenngrößen für das Test­scenario untersucht. Hierzu wurden die wichtigsten Zuflüsse in 5%-Schritten erhöht bzw. verringert, so dass 7 verschiedene Szenarien von 85% bis 115% der Verkehrsstärke Q der morgendlichen Spitzen­stunde simuliert wurden.



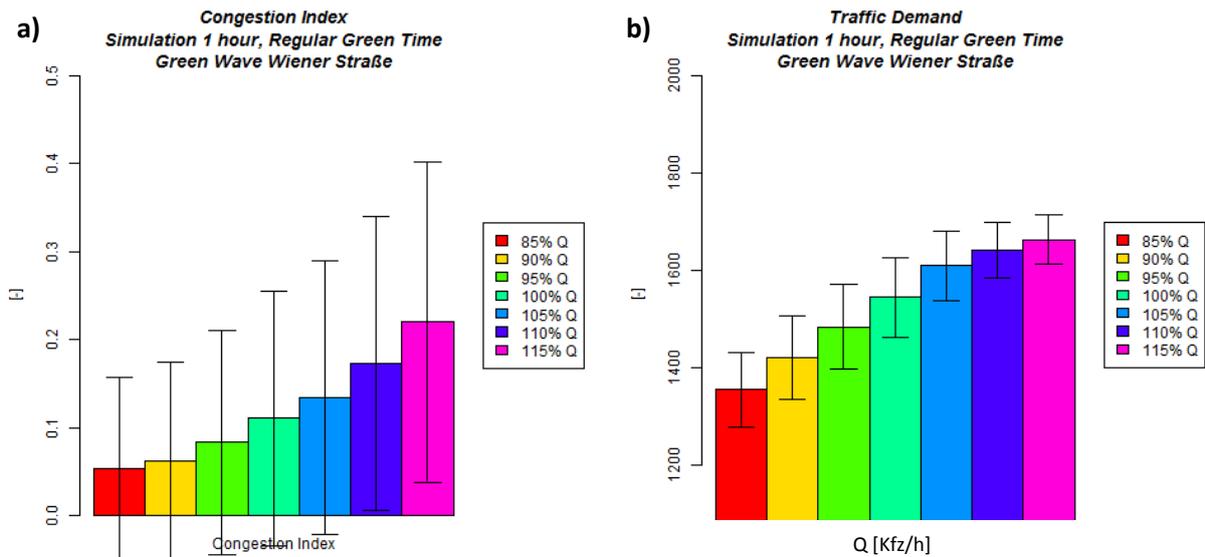
**Abbildung 70: Mittlere Geschwindigkeitsparameter bei steigender Verkehrsbelastung**

In Abbildung 70 werden die mittleren Kenngrößen der mittleren ( $v_{mean}$ ), sowie der minimalen ( $v_{min}$ ) und maximalen erreichten ( $v_{max}$ ) Geschwindigkeiten je Simulation abgebildet, wobei die Simulationen je Kenngröße von links nach rechts eine steigende Verkehrsmenge (85% bis 115% von Q) aufweisen. Die jeweilige Standardabweichung wird in Balken über den Mittelwerten graphisch angegeben, um die Schwankung der Kenngrößen in dieser Darstellung zu erfassen. Zusätzlich werden die errechneten Kenngrößen der mittleren Geschwindigkeit, Standardabweichung, Variationskoeffizient, Minimal- und Maximalwert in Tabelle 19 angeführt.

Es wird sehr deutlich ersichtlich, dass die mittlere Reise­geschwindigkeit bei zunehmender Geschwindigkeit sinkt. Bei Belastungen  $> 100\%$  ist diese Veränderung stärker, als bei Belastungen von  $< 100\%$ . Ebenso sinken die mittleren minimalen Geschwindigkeiten, was auf höhere Stillstandszeiten bzw. auf größere Anteile an Fahrten im gebundenen Verkehr hinweisen. Im Gegensatz dazu bleibt die maximale Geschwindigkeit konstant bei im Mittel 72,7 km/h. Daraus ist ersichtlich, dass zumindest ein Fahrzeug je Simulation die maximale Wunschgeschwindigkeit erreicht. Der Verkehrsfluss wird also erwartungsgemäß durch eine erhöhte Verkehrsmenge hinsichtlich der mittleren

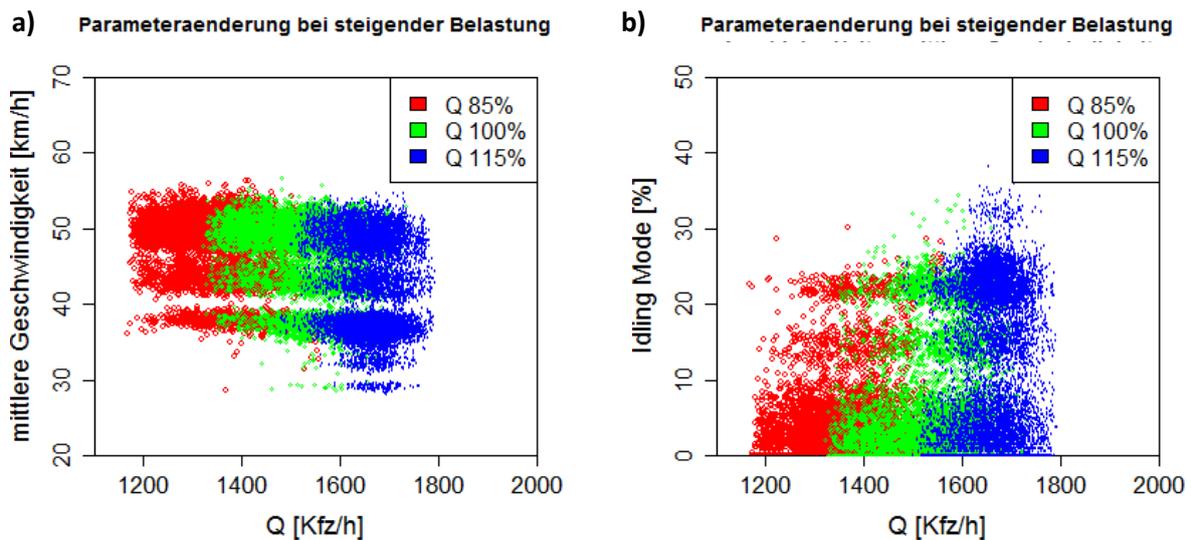
Reisegeschwindigkeit zunehmend verschlechtert, wobei bedingt durch die grüne Welle weiterhin Fahrzeuge den untersuchten Streckenzug mit der maximalen erreichbaren mittleren Reisegeschwindigkeit durchfahren. Dabei wird aber die Streuung dieser Kenngröße größer, es fallen mehr Fahrzeuge aus der Koordinierung heraus und erreichen so eine geringere mittlere Geschwindigkeit.

Die Bewertung der mittleren Geschwindigkeit mittels Congestion Index (Abbildung 71 a) offenbart jedoch eine nur geringe Verschlechterung der Reisezeiten, ein Stau (Congestion Index > 2) wird mit dem Maximalwert von 0.22 (115% Q) bei Weitem nicht erreicht.



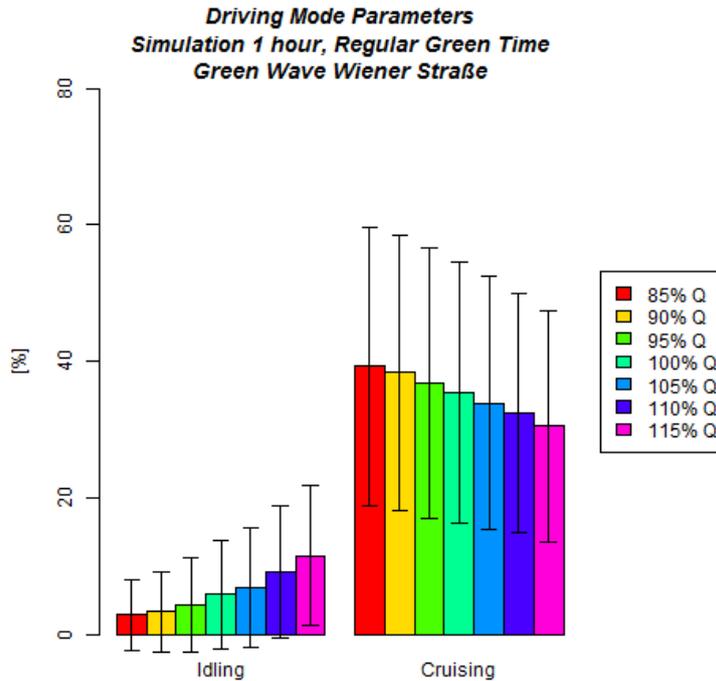
**Abbildung 71: Congestion Index (a) und reale Verkehrsmenge (b) bei steigender Verkehrsbelastung**

Im Scatter-Plot der mittleren Reisegeschwindigkeit (Abbildung 72 a) wird die Veränderung der mittleren Geschwindigkeit verdeutlicht, indem sie den tatsächlich gemessenen Verkehrsstärken gegenübergestellt werden. Die tatsächlich gemessenen Verkehrsstärken der dargestellten Fälle 85%, 100% und 115% Verkehrsmenge entsprechen nicht direkt der zugeführten Verkehrsmenge, da der Simulationsaufbau die gesteigerte Nachfrage (bei 110% bzw. 115%) an einem der erhöhten Zuflüsse nicht mehr aufnehmen kann und die Verkehrsmenge auf dem untersuchten Streckenzug nicht mehr proportional steigt (siehe Abbildung 71 b). Diese Fahrzeuge werden in der Simulation von Lichtsignalanlagen bei der Zufahrt in das Testgebiet aufgehalten, weshalb sich kein Verkehrszusammenbruch einstellt, sich die Geschwindigkeiten jedoch nach unten verlagern.



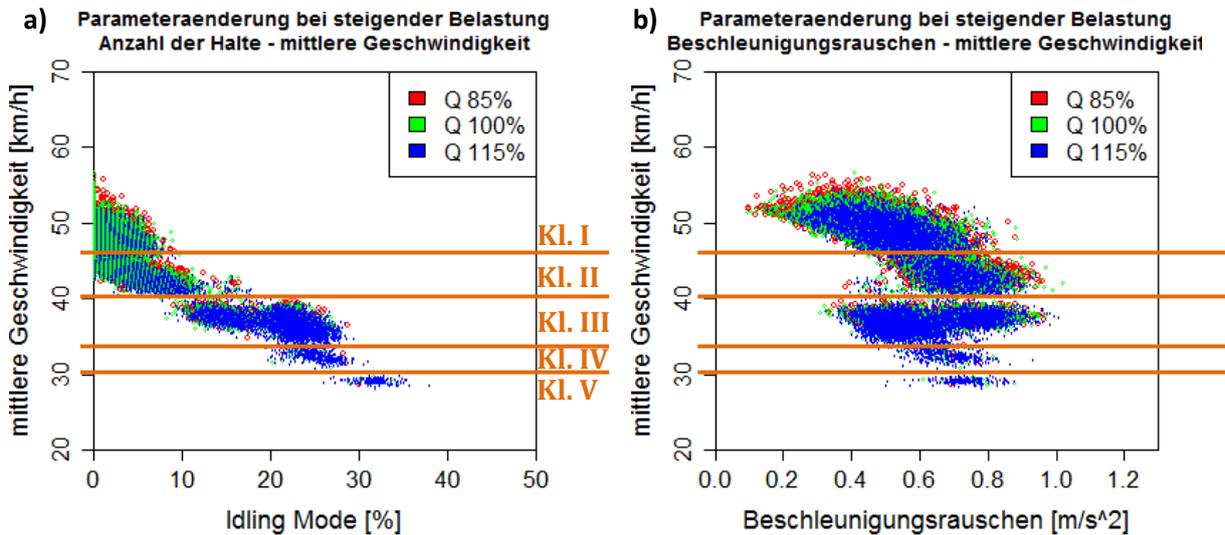
**Abbildung 72: Kenngrößenänderung bei steigender Belastung: mittl. Reisegeschwindigkeit (a), Idling Mode (b)**

Mit steigender Verkehrsbelastung sinkt die Dichte der Datenpunkte im Bereich hoher Geschwindigkeiten (Bereich bei etwa 50 km/h), während die Dichte im unteren Bereich zunimmt. Weiters ist in Abbildung 72 a) eine Einteilung der Datenpunkte in Geschwindigkeitsklassen erkenntlich – bei steigender Verkehrsbelastung (ab etwa 1600 Kfz/h) stellen sich zusätzliche niedrige Geschwindigkeitsbereiche ein (bei <35 km/h). Ähnliches ist für den Anteil an Stillstandszeiten („Idling Mode“, Abbildung 72 b) ersichtlich: Bei höheren Verkehrsmengen steigt der Anteil der Halte, eine ähnliche Gruppenbildung wie bei der mittleren Reisegeschwindigkeit stellt sich ein. Die Mittelwertbildung der Anteilskenngrößen Idling und Cruising (siehe Abbildung 73 bzw. Tabelle 19) verdeutlicht die Steigerung des mittleren Anteils an Halten ( $v < 3\text{ km/h}$ ) von 2,9% (85% Q) zu 11,6% (115% Q) bei gleichzeitig wachsender Streuung von 4,1% (85%Q) auf 6,2% (115% Q). In Bezug auf den jeweils mittleren Anteil der Stillstandszeiten steigt die Streuung nicht, da der Variationskoeffizient von 1,76 auf 0,88 sinkt. Entsprechend der Zunahme des Stillstandsanteils Idling sinkt der Anteil der Zeit, in welcher ein Fahrzeug geringen Verzögerungen bzw. Beschleunigungen bewegt wird (Cruising) von 39,3 % (85% Q) auf 30,6% (115% Q). In diesem Falle bleibt die Streuung bezogen auf die mittlere Kenngröße ( $\text{Cruising}_{\text{var}}$ ) fast konstant (0,52 bei 85% Q, 0,55 bei 115% Q).



**Abbildung 73: Mittlere Anteilsparameter bei steigender Verkehrsbelastung**

Die Gegenüberstellung der mittleren Geschwindigkeiten und dem Anteil der Stillstandszeiten lässt einen starken Zusammenhang dieser Kenngrößen erkennen (Abbildung 74 a). Bei geringeren Belastungen und somit geringerem Anteil von Stillstandszeiten (< 10%) ist eine höhere Schwankung der mittleren Reisegeschwindigkeit ersichtlich, während mit steigender Belastung und somit steigendem Anteil der Stillstandszeiten die mittleren Geschwindigkeiten geringere Streuungen aufweisen und die oben angesprochenen Geschwindigkeitsklassen gebildet werden.



**Abbildung 74: Kenngrößenänderung bei steigender Belastung: mittlere Geschwindigkeit-Idling Mode (a) und mittlere Geschwindigkeit-Beschleunigungsrauschen (b)**

Das Beschleunigungsrauschen hingegen gehorcht nicht dieser einfachen Abhängigkeit von der mittleren Geschwindigkeit (siehe Abbildung 74 b). Jedoch weisen die beobachteten Geschwindigkeitsklassen auch unterschiedliche Ausprägungen hinsichtlich des Beschleunigungsrauschens auf und lassen sich in 5 Klassen einteilen.

## Auswertung simulationsbasierter Einzelfahrzeugdaten

1. Klasse I (mittlere Reisegeschwindigkeit > 46 km/h): Das Beschleunigungsrauschen weist ein breites Spektrum von 0,1 bis 0,8 m/s<sup>2</sup> auf. Dies deutet auf sehr unterschiedliches Fahrverhalten in der Gruppe der schnellsten Fahrzeuge hin.
2. Klasse II (mittlere Reisegeschwindigkeit 40-46 km/h): Das Beschleunigungsrauschen nimmt Werte von etwa 0,5 bis 1,0 m/s<sup>2</sup> an, also im Schnitt höhere Ausprägungen bei geringerer Streuung als in Klasse I.
3. Klasse III (mittlere Reisegeschwindigkeit 33-40 km/h): Das Beschleunigungsrauschen weist in dieser Gruppe mit 0,3 bis 1,0 m/s<sup>2</sup> ein breiteres Spektrum auf als jene in Klasse II, aufgrund derselben Maximalwerte ist jedoch ein geringerer Mittelwert zu erwarten.
4. Klasse IV (mittlere Reisegeschwindigkeit: 30-33 km/h): Die Datenmenge in dieser Klasse ist geringer als in den Klassen I bis III, die Werte streuen verhältnismäßig gering zwischen 0,5 und 0,9 m/s<sup>2</sup>.
5. Klasse V (mittlere Reisegeschwindigkeit < 30 km/h): Die Ausprägung des Beschleunigungsrauschens ist jenem von Klasse 4 sehr ähnlich, die Datenpunkte stammen ebenfalls hauptsächlich aus der Simulation mit Q 115%.

Da die Klassen II bis V im Mittel ein höheres Beschleunigungsrauschen aufweisen als Klasse I und sich die erhobenen Kenngrößen je Fahrzeug bei steigender Belastung hin zu den höheren Klassen verschieben, ist für steigende Verkehrsmengen ein höheres mittleres Beschleunigungsrauschen zu erwarten. Die Mittelwerte des Beschleunigungsrauschens (Tabelle 19: „ACN“) lassen diese Tendenz erkennen – das Beschleunigungsrauschen steigt kontinuierlich von 0,519 (85% Q) auf 0,585 m/s<sup>2</sup> (115%Q). Die Standardabweichung des Beschleunigungsrauschens wird bei steigender Belastung hingegen verringert von 0,145 (85% Q) auf 0,131 m/s<sup>2</sup> (115 % Q). Auch bereinigt um den Mittelwert nimmt die Streuung (Variationskoeffizient) des Beschleunigungsrauschens geringfügig ab von 0,279 (85% Q) auf 0,224 (115 % Q). Dieser Umstand ist auf die beobachtete geringere Streuung der Klassen II bis V zurückzuführen.

Tabelle 19: Parameteränderung bei steigender Verkehrsbelastung

Kenngröße	85% Q	90% Q	95% Q	100% Q	105% Q	110% Q	115% Q
<b>v<sub>mean</sub> [km/h]</b>	47.9	47.5	46.8	45.8	44.9	43.5	41.9
<b>v<sub>sd</sub> [km/h]</b>	4.1	4.4	4.9	5.4	5.7	6.0	6.2
<b>v<sub>var</sub></b>	0.09	0.09	0.10	0.12	0.13	0.14	0.15
<b>v<sub>min</sub>mean [km/h]</b>	8.9	8.7	7.9	6.9	6.3	4.8	3.7
<b>v<sub>max</sub>mean [km/h]</b>	62.7	62.7	62.7	62.7	62.6	62.7	62.7
<b>Idling Mode<sub>mean</sub> [%]</b>	2.9	3.4	4.5	5.9	6.9	9.3	11.6
<b>Idling Mode<sub>sd</sub> [%]</b>	5.2	5.8	6.9	8.0	8.7	9.7	10.2
<b>Idling Mode<sub>var</sub></b>	1.76	1.72	1.55	1.36	1.25	1.04	0.88
<b>Cruising Mode<sub>mean</sub> [%]</b>	39.3	38.4	36.8	35.4	33.9	32.5	30.6
<b>Cruising Mode<sub>sd</sub> [%]</b>	20.4	20.2	19.8	19.1	18.5	17.6	16.9
<b>Cruising Mode<sub>var</sub></b>	0.52	0.53	0.54	0.54	0.54	0.54	0.55
<b>ACN<sub>mean</sub></b>	0.519	0.525	0.534	0.549	0.560	0.571	0.585
<b>ACN<sub>sd</sub></b>	0.145	0.146	0.145	0.143	0.145	0.134	0.131
<b>ACN<sub>var</sub></b>	0.279	0.277	0.272	0.261	0.258	0.235	0.224
<b>Congestion Index<sub>mean</sub></b>	0.05	0.06	0.08	0.11	0.13	0.17	0.22
<b>Congestion Index<sub>sd</sub></b>	0.10	0.11	0.13	0.14	0.15	0.17	0.18
<b>Congestion Index<sub>var</sub></b>	1.92	1.79	1.53	1.31	1.16	0.97	0.83
<b>Verkehrsmenge [Kfz/h]</b>	1356	1421	1484	1545	1610	1642	1663
Indizes: Mittelwert „mean“, Standardabweichung „sd“, Variationskoeffizient „var“							

Für die Veranschaulichung der Veränderung der mittleren Kenngrößen abhängig vom Verkehrsaufkommen wurden die relativen Veränderungen ausgehend vom 100%-Szenario bestimmt (Tabelle 20).

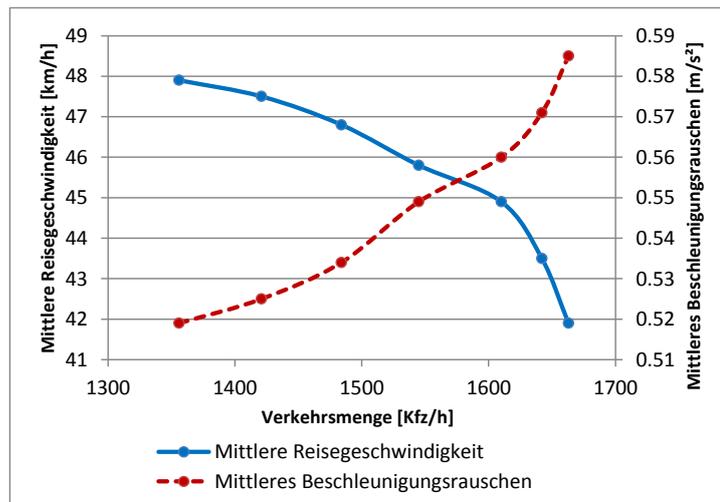
Tabelle 20: relative Parameteränderung (Mittelwerte) bei variabler Verkehrsbelastung

Kenngröße	85% Q	90% Q	95% Q	100% Q	105% Q	110% Q	115% Q
<b>Mittlere Reisegeschwindigkeit [km/h]</b>	+4,6%	+3,7%	+2,2%	<b>45,8</b>	-2,0%	-5,0%	-8,5%
<b>Stillstandsanteil [%]</b>	-50,8%	-42,4%	-23,7%	<b>5.9</b>	+16,9%	+57,6%	+96,6%
<b>Beschleunigungsrauschen [m/s<sup>2</sup>]</b>	-5,5%	-4,4%	-2,7%	<b>0.549</b>	+2,0%	+4,0%	+6,6%
<b>Congestion Index</b>	-54,5%	-45,5%	-27,3%	<b>0.11</b>	+18,2%	+54,5%	+100,0%
<b>Verkehrsmenge [Kfz/h]</b>	-12,2%	-8,0%	-3,9%	<b>1545</b>	+4,2%	+6,3%	+7,6%

Aus der Simulation des Streckenzuges der Wienerstraße in Fahrtrichtung Süd können für eine steigende Verkehrsbelastung bei unveränderter Lichtsignalsteuerung folgende Aussagen getroffen werden.

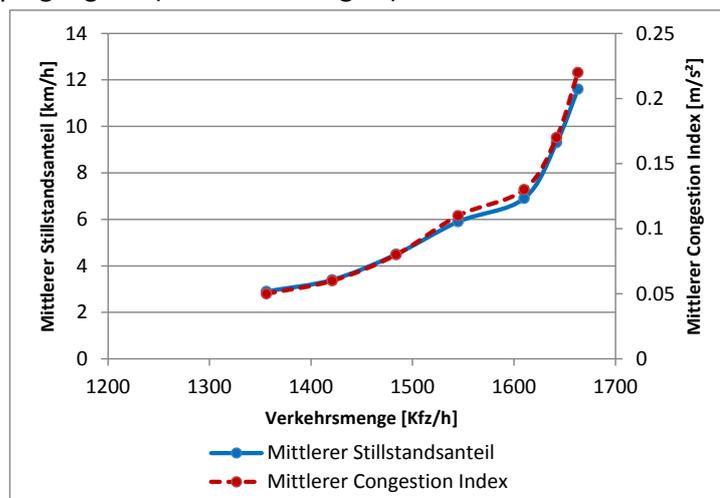
1. Die mittlere Reisegeschwindigkeit sinkt mit zunehmender Verkehrsbelastung, ebenso die absolute und relative Streuung (Variationskoeffizient). Je höher die Verkehrsbelastung ist, um so stärker sinkt die Reisegeschwindigkeit. Ausgehend von der Spitzenstunde (100%) führt ein Rückgang der Verkehrsmenge um 12,2% zu einer Erhöhung der mittleren Reisegeschwindigkeit von 4,6% (siehe. Die Zunahme der Verkehrsmenge um 7,6% führt hingegen bereits zu einem Rückgang von 8,5%.

- Das Beschleunigungsrauschen (Acceleration Noise) steigt mit zunehmendem Verkehr, im Gegensatz zur mittleren Reisegeschwindigkeit sinken jedoch auch absolute und relative Streuung. Ausgehend von der Spitzenstunde (100% Q) führt ein Rückgang der Verkehrsmenge um 12,2% zu einer Verringerung des mittleren Beschleunigungsrauschens von 5,5%. Die Zunahme der Verkehrsmenge um 7,6% führt hingegen bereits zu einem Zuwachs von 6,6%. Die Verschlechterung der Kenngrößen der mittleren Reisegeschwindigkeit (Verringerung) und des mittleren Beschleunigungsrauschens (Erhöhung) bei einer Erhöhung des Verkehrsaufkommens zeigen ein sehr ähnliches Bild (siehe Abbildung 75). So zeigt die Funktion des Beschleunigungsrauschens ein verstärktes Wachstum, die der mittleren Reisegeschwindigkeit einen verstärkten Rückgang.



**Abbildung 75: Mittlere Reisegeschwindigkeit und mittleres Beschleunigungsrauschen in Abhängigkeit von der Verkehrsmenge**

- Ebenso steigen der Anteil der Stillstandszeiten (Idling Mode) und dessen absolute Streuung, die relative sinkt hingegen. Der Fahr-Anteil (Cruising) verhält sich umgekehrt.
- Der Congestion Index verhält sich sehr ähnlich dem Anteil der Stillstandszeiten. Ein höheres Verkehrsaufkommen wirkt sich wie bei den anderen Kenngrößen zunehmend stark auf die Kenngrößenausprägung aus (siehe Abbildung 76).

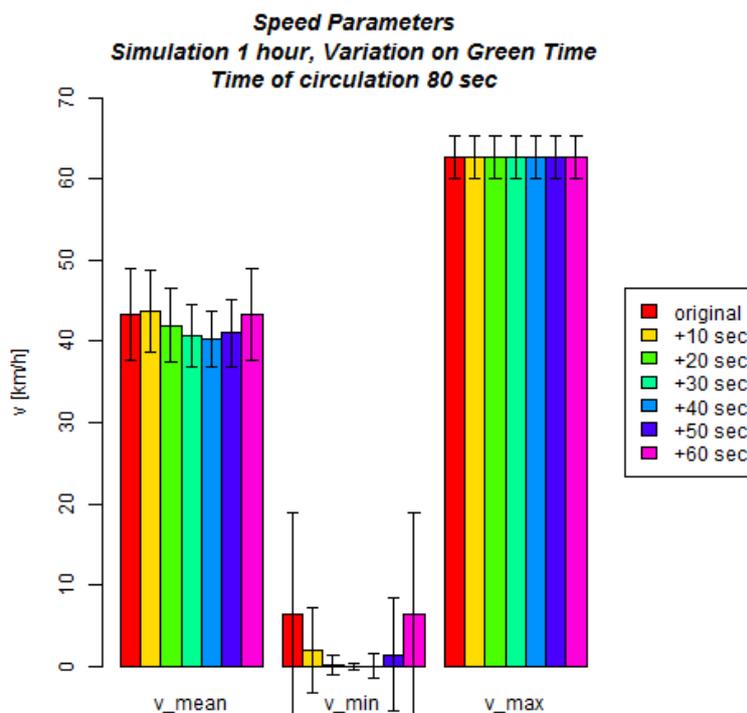


**Abbildung 76: Mittlerer Stillstandsanteil und mittlerer Congestion Index in Abhängigkeit von der Verkehrsmenge**

### 7.3.2 Einfluss der Signalsteuerung

Neben der Verkehrsmenge ist die Lichtsignalsteuerung der wichtigste Einflussfaktor auf innerstädtischen Straßenzügen mit signalgesteuerten Knotenpunkten. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurde die Versatzzeit ab Knoten 305 stromabwärts (siehe Anhang A) jeweils in 10-Sekunden-Schritten versetzt. Die Grünphase setzt also im ersten Szenario ab diesem Knoten um zehn Sekunden später ein, im zweiten zwanzig usw. Bei einer Umlaufzeit von 80 Sekunden wurden sieben Szenarien erstellt: das Grundscenario („original“), welches jenem aus Unterabschnitt 7.3.1 bei 100% der Verkehrsstärke entspricht, sowie sechs weiteren mit Versatz des Grünbandes (Original-Grünband siehe Anhang C).

Wie bei der Untersuchung der steigenden Verkehrsmenge treten in allen Simulationen idente Maximalwerte der Geschwindigkeit auf (siehe Abbildung 77, bzw. Tabelle 21), ein oder mehrere Fahrzeuge erreichen die Wunschgeschwindigkeit im Verlauf ihrer Fahrt. Hingegen verringert sich die mittlere minimale Geschwindigkeit mit wachsender Verschiebung des Grünzeitbandes gegen Null (Verschiebung +20, +30, +40 sec) mit sehr geringer Standardabweichung. In diesem Szenario müssen also nahezu alle Fahrzeuge zumindest einmal Halten. Bei fortschreitender Verschiebung des Grünbandes nähern sich die mittleren minimalen Geschwindigkeiten wieder dem Ursprungszustand an. Selbiges gilt für die mittlere Geschwindigkeit, da die Verschiebung des Grünbandes bei der Hälfte der Umlaufzeit ( $80\text{sec}/2 = 40\text{ sec}$ ) seine maximale Ausprägung erreicht. Bei den mittleren Geschwindigkeiten ist zu beobachten, dass diese bei dem Versatz von 10 Sekunden sogar geringfügig von 43,4 auf 43,7 km/h steigen, bei gleichzeitiger Reduzierung der Standardabweichung. Die reale Reduzierung der Streuung, beschrieben durch den Variationskoeffizienten, sinkt ebenso von 0,13 auf 0,11. Die minimale mittlere Geschwindigkeit wird wie zu erwarten bei einem Versatz von 40 Sekunden erreicht, liegt jedoch mit 40,3 km/h nur um 3,1 km/h unter jener des Ausgangsszenarios.



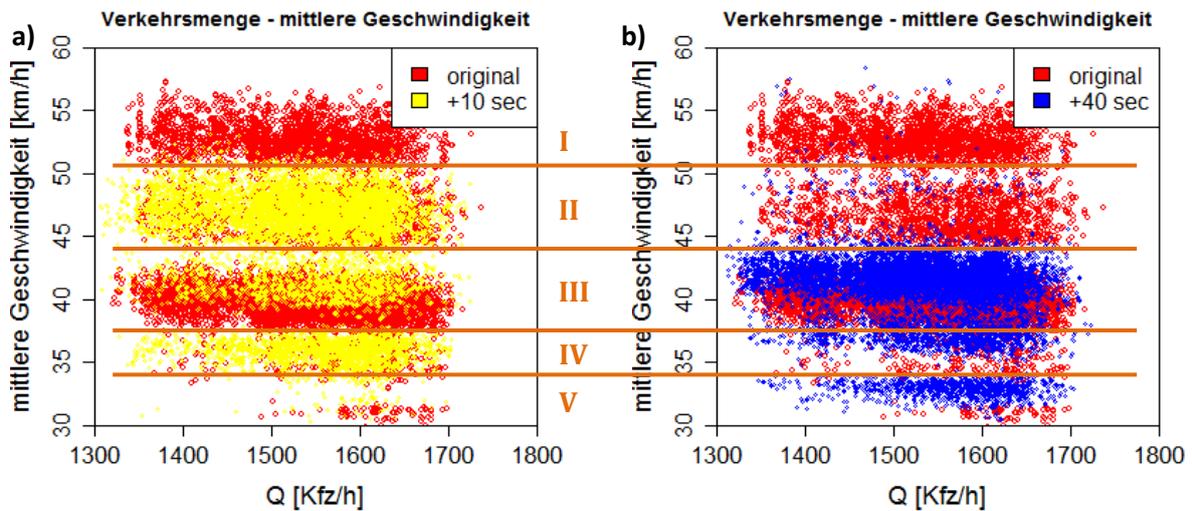
**Abbildung 77: Mittlere Geschwindigkeitsparameter bei unterbrochener Grüner Welle**

In Abbildung 78 a) (Versatzzeit der Grünen Welle: + 10 Sekunden) ist ähnlich wie im vorigen Unterabschnitt eine Klassenbildung nach mittleren Reisegeschwindigkeiten erkennbar, sowohl für den Fall der originalen Signalsteuerung, als auch im Szenario der versetzten grünen Welle. Dieselben

Klassen können annähernd auch für die Versatzzeit von + 40 Sekunden (Abbildung 78 b) angewandt werden:

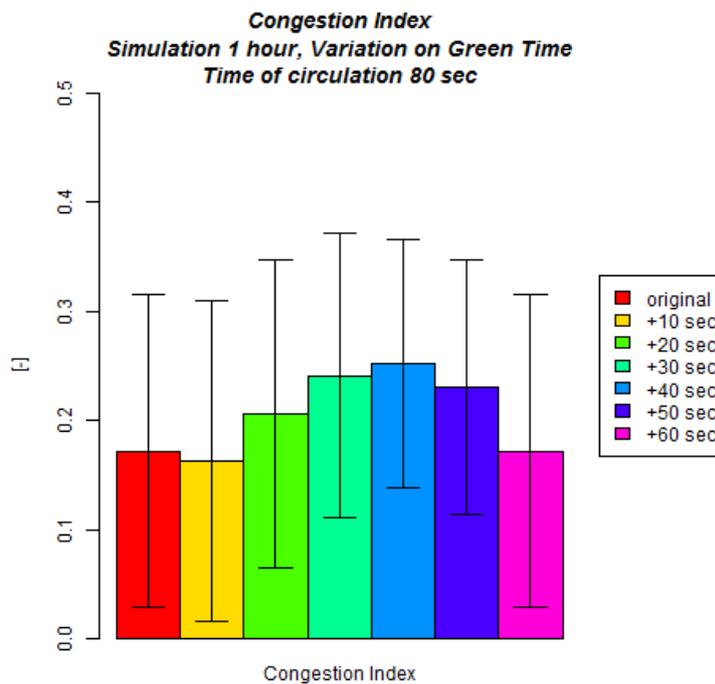
1. Klasse I (mittlere Reisegeschwindigkeit 51-57 km/h): Bei einem Versatz von 10 Sekunden wird die schnellste Klasse (I) nur von sehr wenigen Fahrzeugen erreicht, während diese im originalen Szenario ähnlich stark besetzt sind.
2. Klasse II (mittlere Reisegeschwindigkeit 44-51 km/h): Diese Klasse weist bei einem Versatz von 10 Sekunden eine hohe Dichte an Datenpunkten auf, während sie bei dem Versatz von 40 Sekunden so wie Klasse I kaum erreicht wird.
3. Klasse III (mittlere Reisegeschwindigkeit 37-44 km/h): Diese Klasse wird sowohl vom originalen, als auch vom Versatzszenario + 40 Sekunden stark belegt, im zweiten Falle ist dies die stärkste Gruppe. Sowohl für den Versatz von 10, als auch von 40 Sekunden liegen höhere Geschwindigkeitswerte vor, als im originalen Szenario. Die geringe Dichte an Datenpunkten für den Versatz im Szenario + 10 Sekunden ist bei gleichzeitig stark ausgeprägter Klasse II der Grund, weshalb bei der Versatzzeit von 10 Sekunden die höchste mittlere Reisegeschwindigkeit aller Fahrzeuge erreicht wird (Abbildung 77:  $v_{\text{mean}}$ ).
4. Klasse IV (mittlere Reisegeschwindigkeit: 33-37 km/h): Diese Gruppe erfährt bei der Versatzzeit von 10 Sekunden eine vergleichsweise starke Ausprägung, während im originalen Szenario weniger Datenpunkte auftreten. Jedoch ist zu beobachten, dass die Klasseneinteilung für das Szenario + 40 Sekunden nicht zutrifft, die entsprechenden Datenpunkte liegen eher zwischen 37 und 39 km/h
5. Klasse V (mittlere Reisegeschwindigkeit < 33 km/h): Diese Klasse der langsamsten Fahrzeuge sind für das originale, wie für das Versatzszenario + 10 Sekunden kaum relevant, bei der Versatzzeit von + 40 Sekunden jedoch sehr wohl. Sie treten verstärkt bei höheren Belastungen auf.

Ein geringer Versatz der grünen Welle (+ 10 Sekunden) führt im beobachteten Fall zu einer geringen Erhöhung der mittleren Reisegeschwindigkeit aller Fahrzeuge, jedoch streuen diese weniger (siehe Tabelle 21). Auch bei einem starken Versatz (+ 40 Sekunden) geht die Streuung zurück, die meisten Fahrzeuge finden sich in der Geschwindigkeitsklasse III. Jedoch treten in keinem Szenario mittlere Geschwindigkeiten von unter 30 km/h auf. Es wird also kein kompletter Verkehrszusammenbruch erreicht, da die für den koordinierten Streckenzug überzähligen Fahrzeuge bereits an den Lichtsignalanlagen an der Einfahrt gehindert werden.

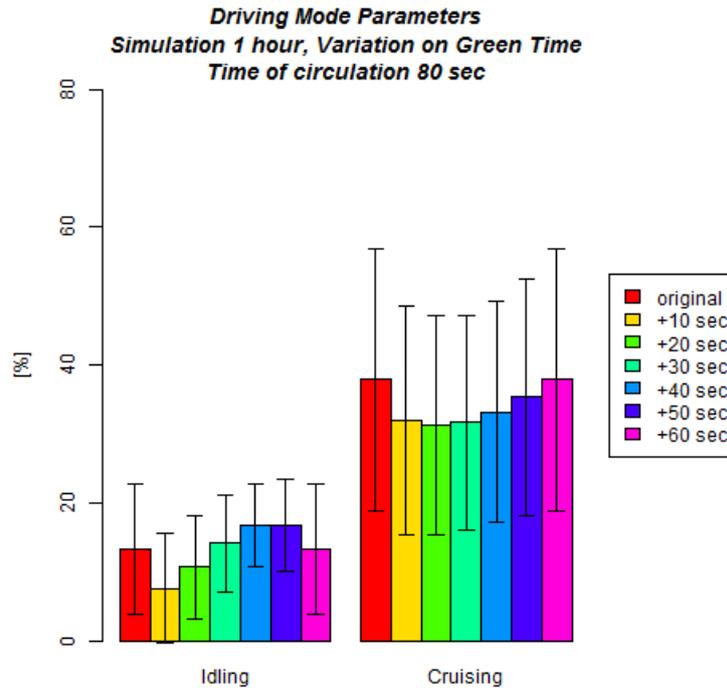


**Abbildung 78: Kenngrößenänderung bei unterbrochener Grüner Welle: mittlere Geschwindigkeit – Q; Versatz +10 Sekunden (a) – Versatz +40 Sekunden (b)**

Verdeutlicht wird dieser Umstand bei Betrachtung des Congestion Index (Abbildung 79), welcher die erzielte Geschwindigkeit bewertet. Die Verringerung der mittleren Geschwindigkeit um wenige km/h führt in dieser Art der Bewertung nur zu geringfügigen Änderungen im Congestion Index. Ein Congestion Index von 1, bei welchem von einer Reisezeitverdopplung bzw. von 2, bei welchem von einer Stauung gesprochen wird, ist weit entfernt von den gemessenen Daten. Eine Stauung auf dem untersuchten Streckenzug liegt also in keinem Fall vor, der Verkehrsfluss wird aber durchaus verändert, wie die Betrachtung der Anteilsparameter zeigt (Abbildung 80).

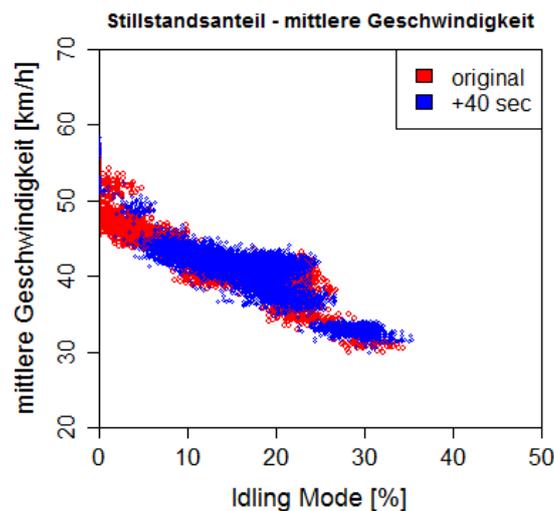


**Abbildung 79: Congestion Index bei unterbrochener Grüner Welle**



**Abbildung 80: Mittlere Anteilsparameter bei unterbrochener Grüner Welle**

Die Kenngrößenprägung der Stillstandsanteile Idling (Abbildung 80) veranschaulichen, dass bei einem Versatz von 40 bzw. 50 Sekunden im Mittel die meiste Zeit im Stillstand verbracht wird (16,8 bzw. 16,9 % der Zeit). Bei geringerem Versatz von 10 (7,7%) oder 20 Sekunden (10,8%) wird im Mittel weniger Zeit im Stillstand verbracht, als im originalen Szenario (13,3%). Hingegen liegen die Anteile an konstanter Fahrt bei geringer Geschwindigkeitsänderung (Cruising) für alle Szenarien unter jenen des originalen (37,9 %). Die annähernd gleichen Cruising-Anteile für die Szenarien +10 bis +40 sec (31,3 bis 33,3 %) stehen im Vergleich sehr stark steigenden Idling-Anteilen gegenüber (+10 sec: 7,7%; +40 sec: 16,8%). Für das Szenario +10 sec bedeutet dies, dass ein geringer Stillstandsanteil, sowie ein geringer Cruising-Anteil auftreten. In Summe führt dies trotz des inhomogeneren Verkehrsflusses (Cruising <) zu höheren mittleren Geschwindigkeiten im Szenario +10 sec (vgl. Abbildung 78).

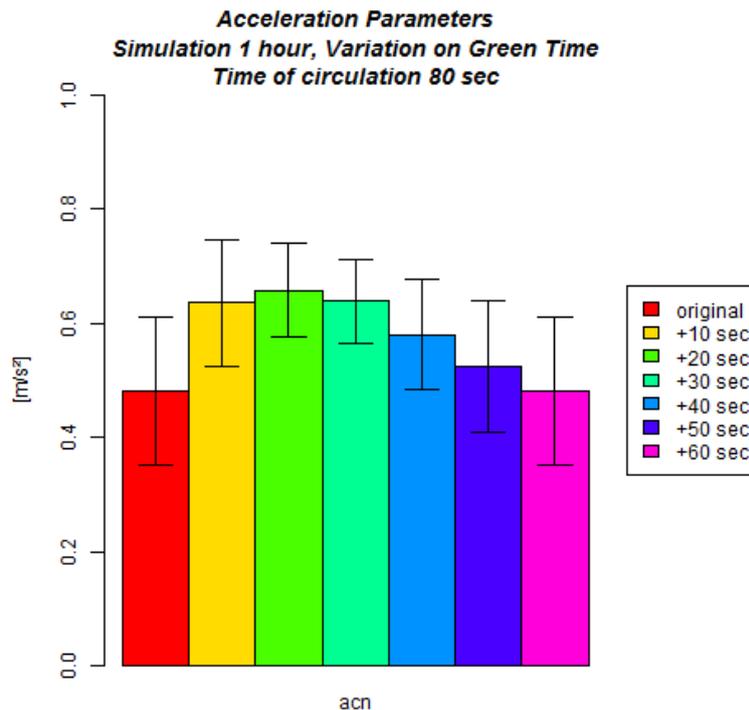


**Abbildung 81: Kenngrößenänderung bei unterbrochener Grüner Welle: mittlere Geschwindigkeit-Stillstandsanteile (Idling Mode)**

Hingegen lassen der hohe Stillstandsanteil und ein geringer Cruising-Anteil bei +40 sec auf einen inhomogenen Verkehrsfluss schließen, welcher in Kombination mit hohen Stillstandsanteilen zu

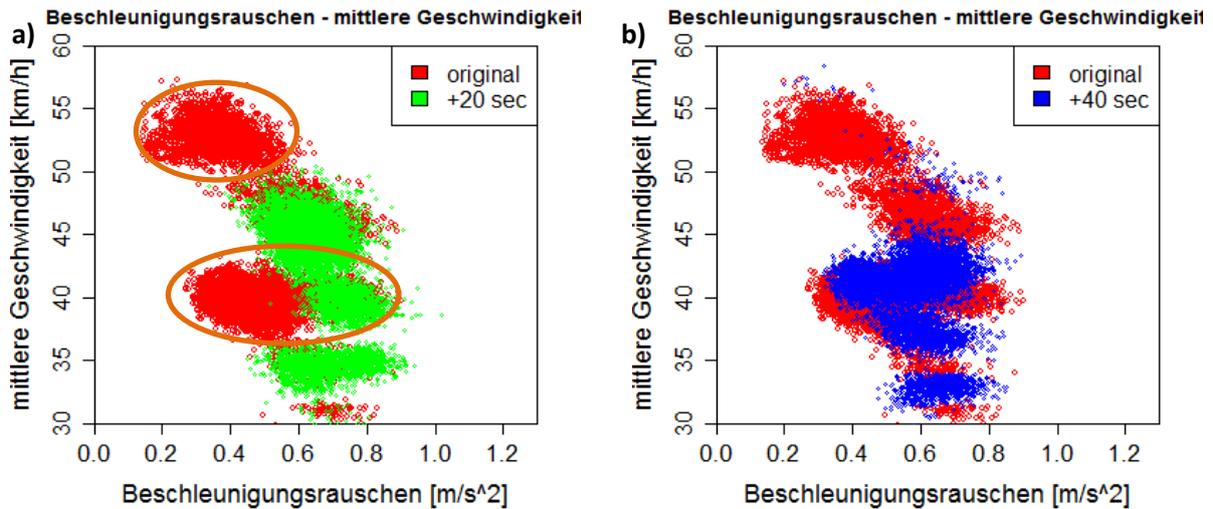
einem Effizienzverlust mit steigenden Reisezeiten (bzw. sinkenden mittleren Reisegeschwindigkeiten) führt. In Abbildung 81 ist dieser Umstand ersichtlich: Für das Szenario +40 sec. treten im Vergleich zum originalen kaum Bereiche mit einem Stillstandsanteil < 5% auf, Stillstandsanteile steigen, die mittleren Geschwindigkeiten sinken.

Die Veränderung der Homogenität des Verkehrsflusses kann auch mit dem Beschleunigungsrauschen (Abbildung 82) ausgedrückt werden. Während in der originalen Konfiguration ein Wert von 0,48 m/s<sup>2</sup> bestimmt werden kann, steigt dieser auf bis zu 0,658 m/s<sup>2</sup> im Mittel im Szenario +20 sec bei gleichzeitig sinkender relativer Standardabweichung (Variationskoeffizient) von 0,270 auf 0,127 (vgl. Tabelle 21).



**Abbildung 82: Mittleres Beschleunigungsrauschen bei unterbrochener grüner Welle**

In den Scatterplots der Kenngrößen je Fahrzeug (Abbildung 83 a) ist diese Entwicklung ersichtlich. Die Datenpunkte des Szenarios +20 sec weisen durchgehend höhere Werte als 0,4 m/s<sup>2</sup> (bis zu 0,9 m/s<sup>2</sup>) auf bei gleichzeitig geringeren Geschwindigkeiten, während für das originale Szenario zwei Bereiche identifiziert werden können, an welchen weit geringeres Beschleunigungsrauschen festgestellt werden kann (siehe Markierung). Im Szenario +40 sec (Abbildung 83 b) sinken hingegen die Geschwindigkeiten, sowie das Beschleunigungsrauschen, welches in einer Größenordnung von ~0,3 bis 0,8 m/s<sup>2</sup> zu liegen kommt.



**Abbildung 83: Kenngrößenänderung bei unterbrochener Grüner Welle: mittlere Geschwindigkeit – Beschleunigungsrauschen; Versatz +20 Sekunden (a) – Versatz +40 Sekunden (b)**

Wie in Unterabschnitt 7.3.1 sind auch bei der Variation der Grünzeiten Klassenbildungen der mittleren Geschwindigkeiten zu erkennen, welche je nach Szenario abweichen. Die Lichtsignalsteuerung zwingt folglich die Fahrzeuge in ein bestimmtes Fahrverhalten. Je nach Position im Pulk und Lichtsignalsteuerung lassen sich diese Klassen hinsichtlich mittlerer Geschwindigkeit und einer weiteren Kenngröße, zum Beispiel dem Beschleunigungsrauschen, einteilen.

**Tabelle 21: Parameteränderung bei Versatz des Grünbandes**

Kenngröße	original	+10sec	+20 sec	+30 sec	+40 sec	+50 sec	+60 sec
<b>v<sub>mean</sub> [km/h]</b>	<b>43.4</b>	<b>43.7</b>	42.0	40.7	<b>40.3</b>	41.1	43.4
<b>v<sub>sd</sub> [km/h]</b>	<b>5.6</b>	<b>5.0</b>	4.5	3.9	<b>3.3</b>	4.1	5.6
<b>v<sub>var</sub></b>	<b>0.13</b>	<b>0.11</b>	0.11	0.10	<b>0.08</b>	0.10	0.13
<b>v<sub>min</sub>mean [km/h]</b>	<b>6.4</b>	<b>2.0</b>	0.2	0.0	<b>0.1</b>	1.5	6.4
<b>v<sub>max</sub>mean [km/h]</b>	<b>62.7</b>	<b>62.7</b>	62.7	62.7	<b>62.7</b>	62.7	62.7
<b>Idling Mode<sub>mean</sub> [%]</b>	<b>13.3</b>	<b>7.7</b>	10.8	14.2	<b>16.8</b>	16.9	13.3
<b>Idling Mode<sub>sd</sub> [%]</b>	<b>9.4</b>	<b>8.0</b>	7.4	7.0	<b>6.1</b>	6.7	9.4
<b>Idling Mode<sub>var</sub></b>	<b>0.71</b>	<b>1.03</b>	0.69	0.49	<b>0.36</b>	0.40	0.71
<b>Cruising Mode<sub>mean</sub> [%]</b>	<b>37.9</b>	<b>32.0</b>	31.3	31.7	<b>33.3</b>	35.4	37.9
<b>Cruising Mode<sub>sd</sub> [%]</b>	<b>19.0</b>	<b>16.6</b>	15.9	15.5	<b>16.1</b>	17.1	19.0
<b>Cruising Mode<sub>var</sub></b>	<b>0.50</b>	<b>0.52</b>	0.51	0.49	<b>0.48</b>	0.48	0.50
<b>ACN<sub>mean</sub></b>	<b>0.481</b>	<b>0.635</b>	0.658	0.638	<b>0.580</b>	0.524	0.481
<b>ACN<sub>sd</sub></b>	<b>0.130</b>	<b>0.110</b>	0.083	0.073	<b>0.096</b>	0.116	0.130
<b>ACN<sub>var</sub></b>	<b>0.270</b>	<b>0.173</b>	0.127	0.114	<b>0.165</b>	0.221	0.270
<b>Congestion Index<sub>mean</sub></b>	<b>0.17</b>	<b>0.16</b>	0.21	0.24	<b>0.25</b>	0.23	0.17
<b>Congestion Index<sub>sd</sub></b>	<b>0.14</b>	<b>0.15</b>	0.14	0.13	<b>0.11</b>	0.12	0.14
<b>Congestion Index<sub>var</sub></b>	<b>0.83</b>	<b>0.90</b>	0.68	0.54	<b>0.45</b>	0.51	0.83
<b>Verkehrsmenge [Kfz/h]</b>	<b>1544</b>	<b>1539</b>	1535	1533	<b>1535</b>	1539	1544
Indizes: Mittelwert „mean“, Standardabweichung „sd“, Variationskoeffizient „var“							

Aus der Simulation des Streckenzuges der Wienerstraße in Fahrtrichtung Süd können für eine gleichbleibende Verkehrsbelastung bei variierender Lichtsignalsteuerung (Umlaufzeit und Grünzeiten

unverändert, jedoch Versatz der Grünen Welle an einer Stelle) abhängig von der Intensität des Eingriffs (zeitliche Unterbrechung der grünen Welle) folgende Aussagen getroffen werden:

1. Die mittlere Reisegeschwindigkeit kann durch einen geringfügigen Versatz der Grünen Welle (+ zehn Sekunden) in einem geringen Maße erhöht werden, ein stärkerer Eingriff verringert jedoch die mittlere Reisegeschwindigkeit. Absolute und relative Streuung werden verringert.
2. Für den Anteil der Stillstandszeiten (Idling Mode) wird bei einem geringen Versatz der Grünen Welle ebenfalls ein geringer Rückgang beobachtet bei steigender Streuung, eine starke Unterbrechung des Grünbandes erhöht diesen Anteil bei sinkender Streuung.
3. Das Beschleunigungsrauschen wird bereits bei einer geringfügigen Verschiebung der Grünen Welle (+ zehn bzw. 20 Sekunden) stark erhöht, größere Verschiebungen führen wieder zu einer Annäherung an das Ausgangsniveau, welches das Optimum darstellt.

### 7.3.3 Einfluss des Fahrzeugfolgeverhaltens

Die Simulation für die Untersuchungen eines Streckenzuges hinsichtlich des Einflusses der Verkehrsmenge und der Signalsteuerung wurden mit den Standardparametern für das Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann 99 (W99) durchgeführt. Die Parameter des Fahrzeugfolgeverhaltens bestimmen, wie sich ein Fahrzeug aufgrund der es umgebenden Fahrzeuge verhält. Bei Annäherung an ein Fahrzeug von hinten werden nach WIEDEMANN (1974) bei normaler Fahrt hinsichtlich des Fahrverhaltens die Bereiche „Freies Verhalten“ mit freier Geschwindigkeitswahl, ein Annäherungsbereich, bei welchem der folgende Fahrer den Abstand zum Vorderfahrzeug verringert, jedoch die Geschwindigkeit bereits gezielt anpasst, sowie ein Folgebereich „eingenommen“ (Abbildung 84). Im Folgebereich reduziert und vergrößert ein Fahrer laufend den Abstand zum vor ihm fahrenden Fahrzeug, um sich so der angestrebten Distanz anzunähern, welche nicht genau erreicht wird.

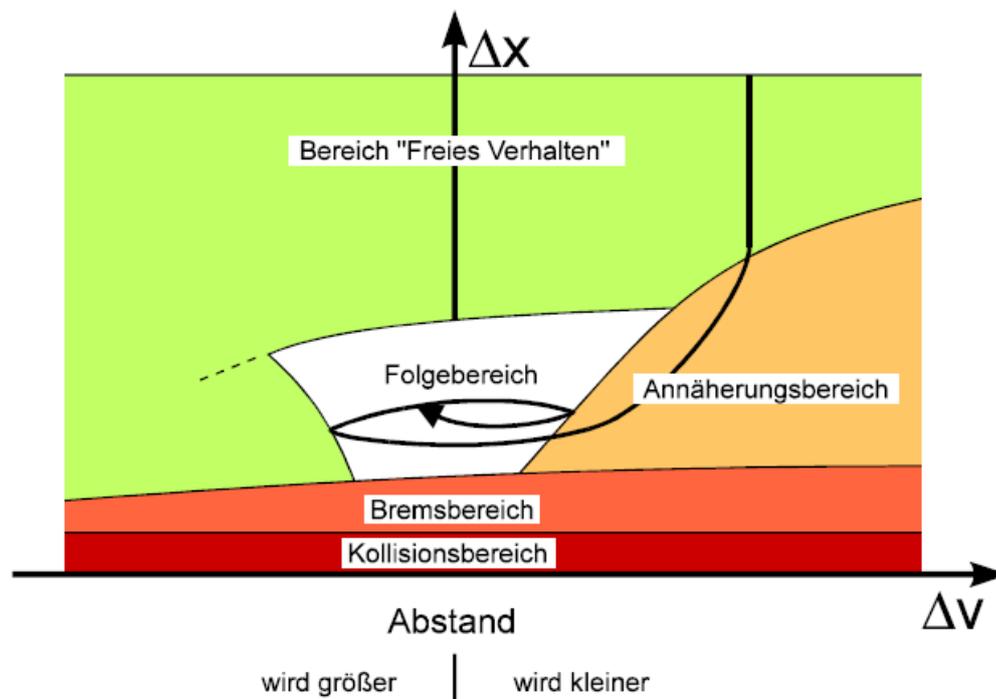
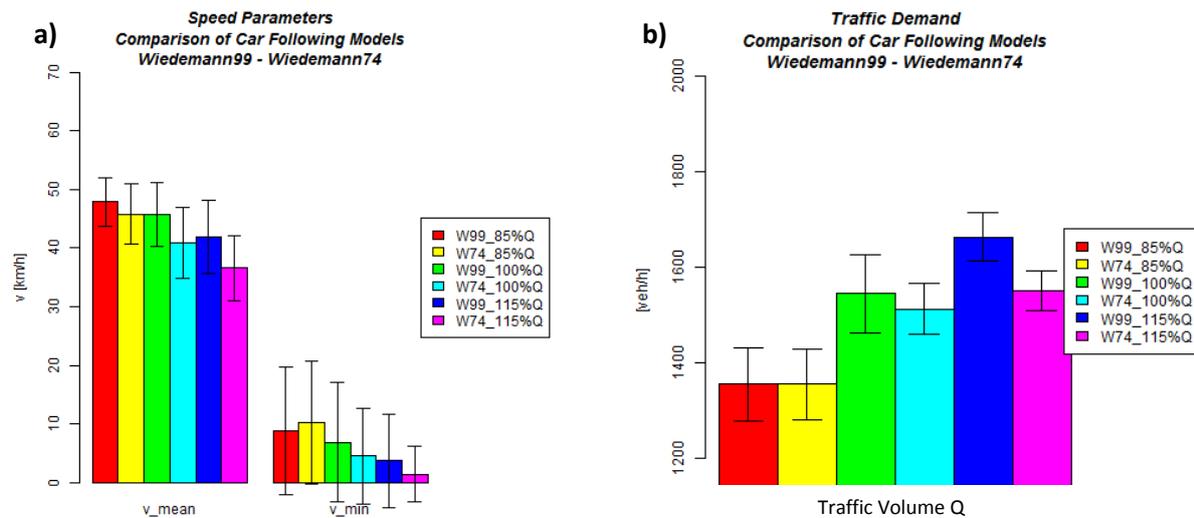


Abbildung 84: Fahrzeugfolgemodell nach WIEDEMANN (1974)

Das Fahrzeugfolgemodell beeinflusst, beretzt von den jeweiligen Parametern des Fahrzeugfolgemodells, die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges laufend. Das Fahrverhalten hat auf fahrdynamische Parameter wie das Beschleunigungsrauschen jedoch einen wichtigen Einfluss, da im

Vergleich zum Parameter der mittleren Reisegeschwindigkeit alle auf der Strecke gemessenen Geschwindigkeitswerte herangezogen werden müssen. Daher wird in diesem Unterabschnitt untersucht, ob sich das Fahrzeugfolgeverhalten entscheidend auf die Ausprägung von Kenngrößen auswirkt. Dazu wird das Verkehrsmodell hinsichtlich des Fahrzeugfolgeverhaltens von W99 auf Wiedemann 74 (W74) geändert und jeweils mit den Standardeinstellungen simuliert. Anschließend werden die Simulationsergebnisse gegenübergestellt. Die zahlenmäßigen Ausprägungen der Berechnungsergebnisse werden in Tabelle 22 aufgelistet.

Zunächst wird die Reisegeschwindigkeit betrachtet (Abbildung 85 a). Je Kenngröße (Mittlere Reisegeschwindigkeit „v\_mean“ und mittlere minimale Reisegeschwindigkeit „v\_min“) werden nebeneinander die Ausprägungen für Wiedemann 99 und Wiedemann 74 gegenübergestellt.

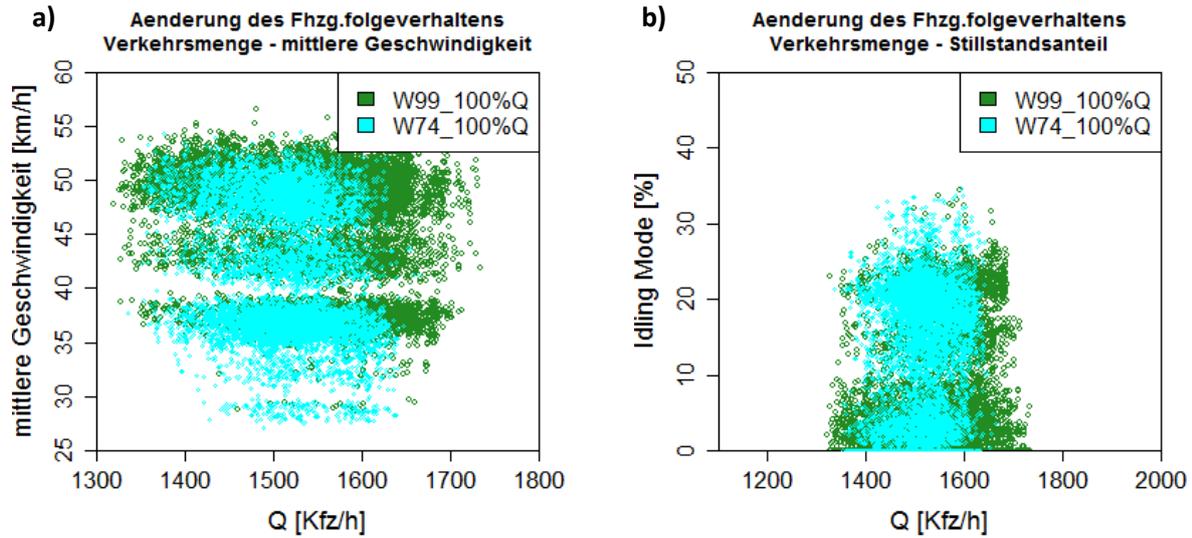


**Abbildung 85: Geschwindigkeitsparameter (a) und Verkehrsnachfrage (b) bei verändertem Modell des Fahrzeugfolgeverhaltens**

Es zeigt sich, dass die Ausprägungen der mittleren Reisegeschwindigkeit bereits bei einer geringen Verkehrsbelastung (85% Q) für W74 deutlich geringer sind (Differenz 2,1 km/h) als jene von W99 und dem Niveau von 100% Q (bei W99) entsprechen (45,8 km/h). Bei steigender Belastung wird dieser Unterschied noch größer (Differenz 4,8 km/h bei 100% Q bzw. 5,3 km/h bei 115% Q. Die minimalen Geschwindigkeiten hingegen weisen bei geringer Belastung (85%) für W74 höhere Werte auf, bei den Belastungen von 100 bzw. 115% sind sie jedoch geringer als jene von W99.

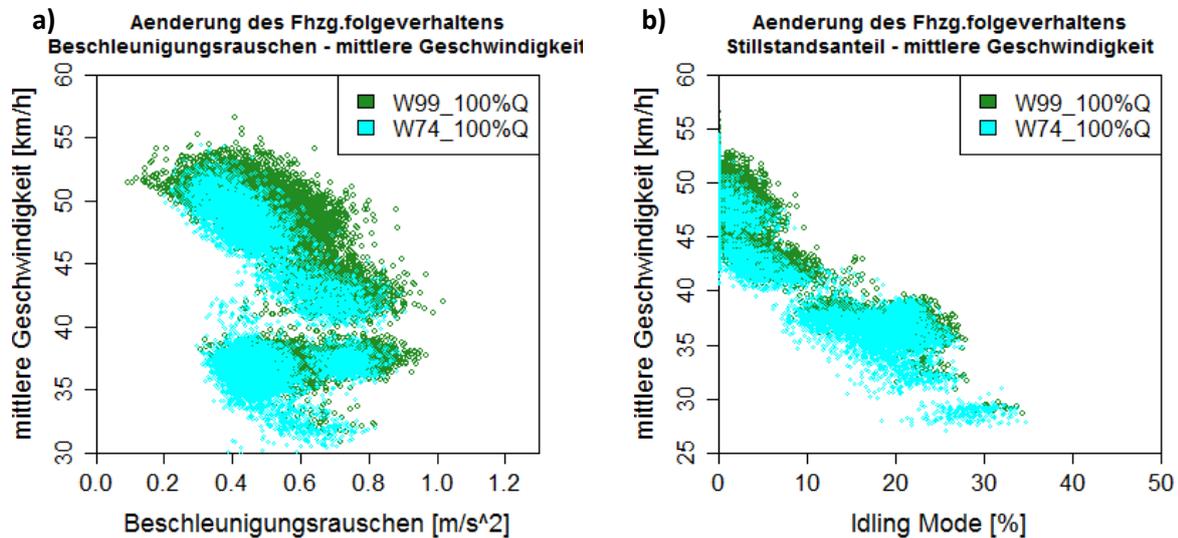
Dies ist auf die generelle Verkehrsmenge zurückzuführen, die je nach Modell des Fahrzeugfolgeverhaltens von dem untersuchten System überhaupt aufgenommen werden kann. Bereits für die normale Belastung der Spitzenstunde (100%) kann unter Verwendung des Modells W74 nicht mehr die komplette Verkehrsbelastung aufgenommen werden, die im System gemessenen Verkehrsmengen sind für W74 geringer als für W99 (Abbildung 85 b). In der Abbildung der einzelnen Datenpunkte je Fahrzeug (Abbildung 86 a) wird jedoch ersichtlich, dass die Reisezeiten auch in Bereichen derselben gemessenen Verkehrsmenge (bis zu ~1600 Kfz/h) für W74 grundsätzlich etwas geringer ausfallen, wengleich dieselbe Klassenbildung der mittleren Geschwindigkeiten zu beobachten ist. Selbiges gilt für den Stillstandsanteil (Abbildung 86 b).

Die höhere Kapazität bei W99 ist durch die Standardeinstellung des maximalen Stillstandsabstands zwischen zwei Fahrzeugen zu erklären, welche mit 1,5 Metern bei W99 um ein Viertel geringer ist als bei W74 mit 2,0 Metern.



**Abbildung 86: Kenngrößenänderung bei unterschiedlichen Fahrverhaltensmodellen: mittlere Geschwindigkeit (a) und Stillstandszeiten (b) in Abhängigkeit der Verkehrsstärke**

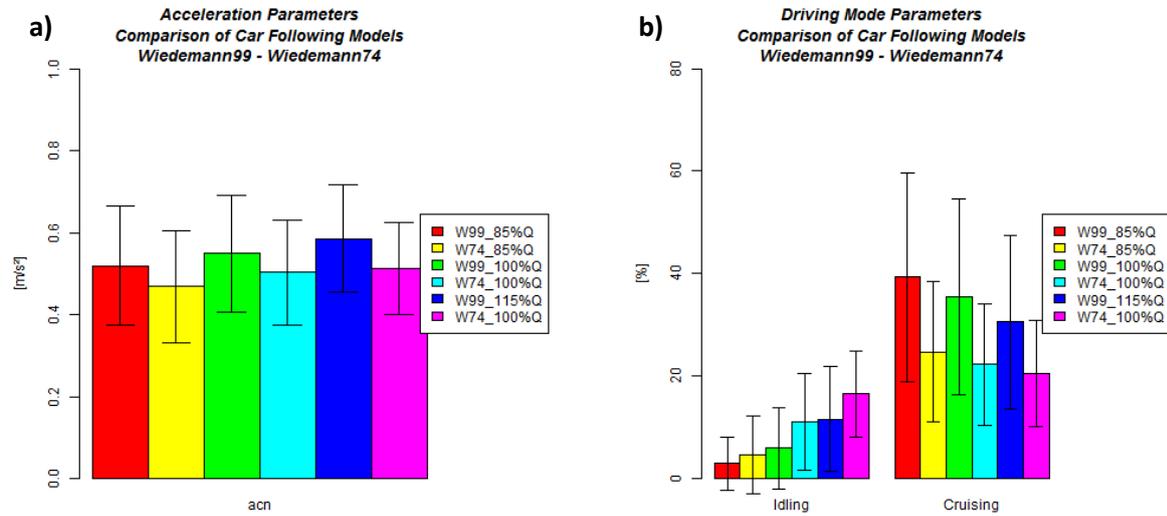
Somit ist festzustellen, dass das veränderte Modell des Fahrzeugverhaltens zwar Auswirkungen auf die Kapazität, sowie Höhe der mittleren Kenngrößen der Geschwindigkeit und des Stillstandsanteils haben, die Klassenbildung der mittleren Geschwindigkeiten, welche durch die Lichtsignalanlagen hervorgerufen wird, jedoch in sehr ähnlicher Form für beide betrachteten Varianten auftritt. Ebenso lässt sich für W74 eine ähnliche Änderung der mittleren Geschwindigkeit bei steigender Verkehrsbelastung aufwie bei W99, jedoch wird diese durch die eingeschränkte Kapazität verstärkt.



**Abbildung 87: Kenngrößenänderung bei unterschiedlichem Fahrverhalten: mittlere Geschwindigkeit in Abhängigkeit von Beschleunigungsrauschen (a) und Stillstandsanteil (b)**

Der relativ geringe Einfluss der Fahrverhaltensparameter wird auch bei der Betrachtung der mittleren Geschwindigkeit im Vergleich zum Beschleunigungsrauschen (Abbildung 87 a) und zum Idling Mode (Abbildung 87 b) ersichtlich. Die Ausprägungen für W74 überdecken große Bereiche von W99, wobei sie vor allem im Bereich von hohen Geschwindigkeiten geringer ausfallen (Verschiebung nach links). So ist auch das geringere Mittel des Beschleunigungsrauschen (siehe Abbildung 88 a bzw. Tabelle 22) bei W74 zu erklären, welches für niedrige Geschwindigkeiten, welche bei W74 verstärkt auftreten, vor allem geringe Ausprägungen aufweist (Bereich zwischen  $\sim 0,4$  und  $0,6 m/s^2$  in Abbildung 87 links). Für den Stillstandsanteil (Idling Mode) gilt selbiges nicht, da dieser für niedrigere Geschwindigkeiten

steigt (Abbildung 87 b) und im Vergleich von W74 zu W99 bei 85% Q um 1,8, bei 100% Q um 4,1 und für 115% Q um 5,0 Prozentpunkte steigt (siehe Tabelle 22)). Im Falle von 100% Q entspricht dies einer relativen Steigerung des Stillstandsanteils um 86%. Im Gegenzug sinken die Anteile bei konstanter Fahrt (Cruising, siehe Abbildung 88 b).



**Abbildung 88: Beschleunigungsrauschen (a) und Anteilsparameter (b) bei verändertem Modell des Fahrzeugfolgeverhaltens**

**Tabelle 22: Kenngrößenausprägungen für verschiedene Fahrverhaltensparameter**

Kenngröße	W99	W74	W99	W74	W99	W74
	85% Q	85% Q	100% Q	100% Q	115% Q	115%Q
<b>v<sub>mean</sub> [km/h]</b>	47.9	45.8	45.8	41.0	41.9	36.6
<b>v<sub>sd</sub> [km/h]</b>	4.1	5.2	5.4	6.1	6.2	5.6
<b>v<sub>var</sub></b>	0.09	0.11	0.12	0.15	0.15	0.15
<b>v<sub>min</sub>mean [km/h]</b>	8.9	10.3	6.9	4.6	3.7	1.5
<b>v<sub>max</sub>mean [km/h]</b>	62.7	63.3	62.7	63.2	62.7	63.0
<b>Idling Mode<sub>mean</sub> [%]</b>	2.9	4.7	5.9	11.0	11.6	16.6
<b>Idling Mode<sub>sd</sub> [%]</b>	5.2	7.5	8.0	9.4	10.2	8.4
<b>Idling Mode<sub>var</sub></b>	1.76	1.62	1.36	0.85	0.88	0.51
<b>Cruising Mode<sub>mean</sub> [%]</b>	39.3	24.7	35.4	22.2	30.6	20.4
<b>Cruising Mode<sub>sd</sub> [%]</b>	20.4	13.7	19.1	11.8	16.9	10.4
<b>Cruising Mode<sub>var</sub></b>	0.52	0.55	0.54	0.53	0.55	0.51
<b>ACN<sub>mean</sub></b>	0.52	0.47	0.55	0.50	0.58	0.51
<b>ACN<sub>sd</sub></b>	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.11
<b>ACN<sub>var</sub></b>	0.28	0.29	0.26	0.25	0.22	0.22
<b>Congestion Index<sub>mean</sub></b>	0.05	0.11	0.11	0.25	0.22	0.40
<b>Congestion Index<sub>sd</sub></b>	0.10	0.14	0.14	0.18	0.18	0.21
<b>Congestion Index<sub>var</sub></b>	1.92	1.28	1.31	0.74	0.83	0.52
<b>Verkehrsmenge [Kfz/h]</b>	1356	1355	1545	1513	1663	1551

Es konnte gezeigt werden, dass sich das Fahrzeugfolgeverhalten vor Allem aufgrund der kapazitätsmindernden Wirkung von Wiedemann 74 auf die Höhe der Kenngrößen auswirkt, die Veränderungen der Kenngrößen bei verschiedenen Simulationsszenarien jedoch ähnlich sind.

## 7.4 Bestimmung des erforderlichen Durchdringungsgrades

In diesem Abschnitt wird untersucht, bei welchem Durchdringungsgrad an Messfahrzeugen eine repräsentative Messreihe für den untersuchten Streckenzug durchgeführt werden kann. Für die Bestimmung wurden die in den vorangegangenen Abschnitten untersuchten Kenngrößen mittlere Reisegeschwindigkeit, Beschleunigungsrauschen, Stillstandsanteile und der Congestion Index für die Szenarien steigende Verkehrsmenge (Verkehrsbelastung „Q 85%“ und „Q 115%“ im Vergleich zur mittleren Belastung der Spitzenstunde „Q 100%“) und unterbrochene Grüne Welle (Verschieben der originalen Versatzeit ab Knoten 305 stromabwärts um zehn bzw. 40 Sekunden: Szenario „sign +10 sec“ bzw. „sign + 40 sec“) untersucht.

Für die Bestimmung des erforderlichen Stichprobenumfangs  $n$  kann in einer Näherung nach SCHNABEL&LOHSE (2011) bei einer gegen Unendlich strebenden Grundgesamtheit  $N$  (siehe Abschnitt 4.6) folgende Formel herangezogen werden:

$$n = \frac{k^2 \cdot V^2}{d_r^2} \quad ; \quad \frac{n}{N} < 0,05 \quad (38)$$

mit dem erforderlichen Stichprobenumfang  $n$  bei der Grundgesamtheit  $N$ , dem Genauigkeitsfaktor  $k$ , dem Variationskoeffizienten  $V = \frac{\sigma}{\mu}$  und dem relativen Stichprobenfehler  $d_r$ .

Der relative Stichprobenfehler  $d_r$  beschreibt die zulässige Abweichung des Mittelwerts der Stichprobe  $\bar{X}$  vom Mittelwert der Grundgesamtheit  $\mu$ :

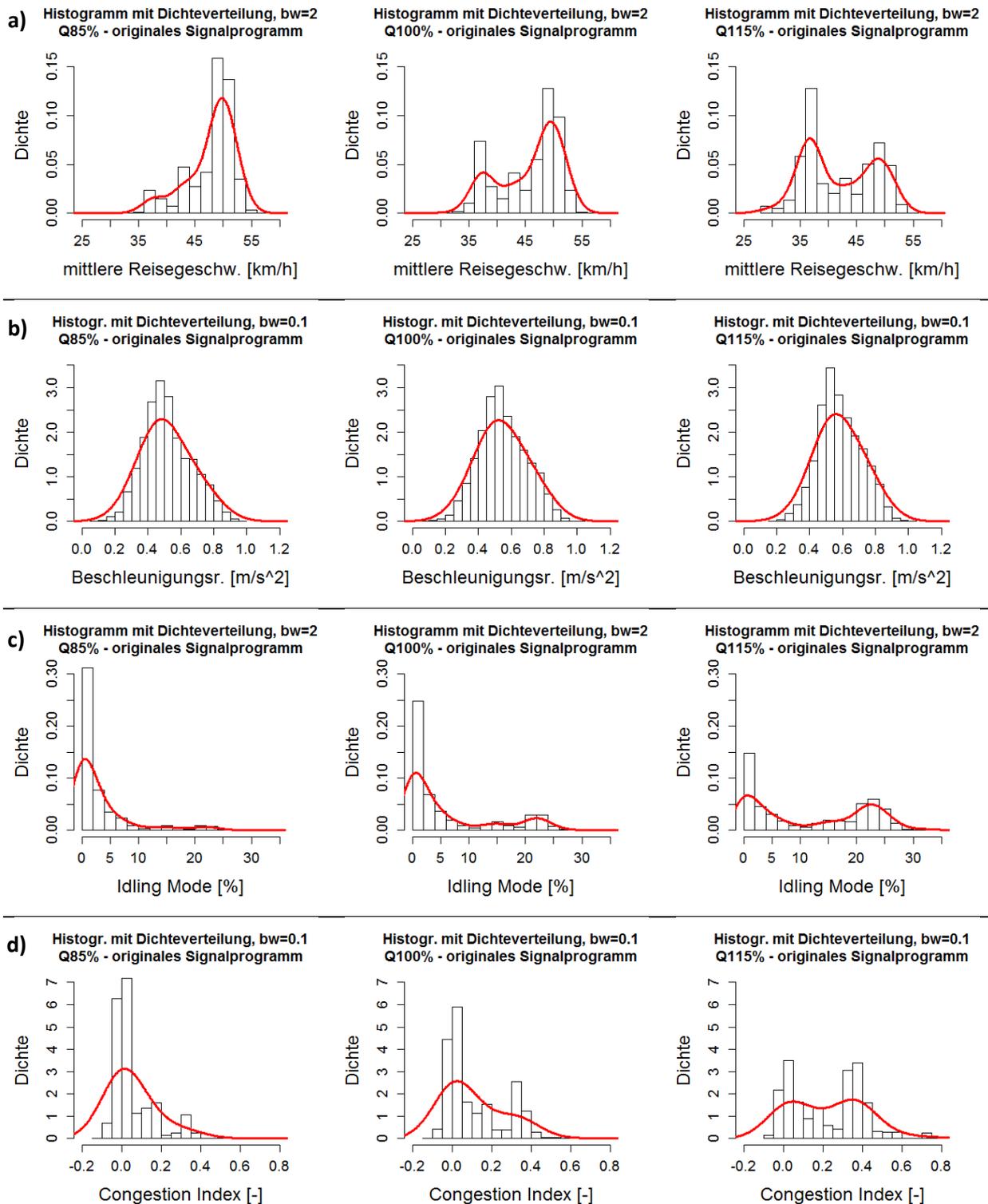
$$d = \pm \mu - \bar{X} \quad (39)$$

Der Genauigkeitsfaktor  $k$  ist von der statistischen Sicherheit  $S$  und dem Verteilungstyp abhängig. Abhängig von der angenommenen Verteilung der zu untersuchenden Kenngrößen ergibt sich der Genauigkeitsfaktor für verschiedene statistische Sicherheiten zu den in Tabelle 23 genannten Werten:

**Tabelle 23 Genauigkeitsfaktor  $k$  für verschiedene Verteilungen bei normalverteilten Größen und zweiseitiger Entscheidung (SCHNABEL&LOHSE, 2011)**

Statistische Sicherheit $S$ [%]	90	95
Normalverteilung	1,65	1,96
eingipflige Verteilung	2,11	2,98
unbekannte Verteilung	3,16	4,47

Die Verteilungen der simulierten Kenngrößen wurden graphisch als Dichteverteilungen je Kenngröße ausgewertet (Abbildung 89), um sie den in Tabelle 23 genannten Verteilungen zordnen zu können. Hierzu wurden im Statistikprogramm R je Kenngröße Histogramme der Datenausprägungen erzeugt und gemeinsam mit einer Dichteverteilung abgebildet. Für sinnhafte Darstellungen wurde die Bandbreite der Dichtefunktion je Kenngröße zu 2 (mittlere Reisegeschwindigkeit und Stillstandsanteil) bzw. zu 0,1 (Beschleunigungsrauschen und Congestion Index) gewählt.



**Abbildung 89: Dichteverteilungen: mittlere Reisegeschwindigkeit (a), Beschleunigungsrauschen (b), Stillstandsanteile (c), Congestion Index (d)**

Es wird ersichtlich, dass die Verteilung der mittleren Reisegeschwindigkeit bei steigender Verkehrsbelastung (a) von einer eingipfligen zu einer zweigipfligen Verteilung wechselt. Selbiges gilt für die Stillstandsanteile (c) und den Congestion Index (d). Für diese Kenngrößen wird für die weitere Berechnung eine unbekannte Verteilung angenommen, während für das Beschleunigungsrauschen (b) eine Normalverteilung angenommen wird. Entsprechend wurden für die weitere Berechnung die Genauigkeitsfaktoren  $k$  nach Tabelle 25 gewählt.

Die auf dieser Basis mit der Formel (38) durchgeführten Berechnungen des erforderlichen Stichprobenumfangs für das Beschleunigungsrauschen, den Congestion Index und den Anteil der Stillstandszeiten lieferten Ergebnisse, für welche das Verhältnis  $n/N < 0,05$  nicht eingehalten werden konnte. Daher wurde die Untersuchung ohne Näherung mit folgender Formel durchgeführt (SCHNABEL&LOHSE, 2011):

$$n = \frac{k^2 \cdot V^2 \cdot N}{k^2 \cdot V^2 + (N - 1) \cdot d_r^2} \quad (40)$$

Die berechneten erforderlichen Stichprobengrößen  $n_{90}$  und  $n_{95}$  (Index entsprechend der statistischen Sicherheit) für einen zulässigen Stichprobenfehler von 5% ( $d=0,05$ ) für o.g. Kenngrößen in unterschiedlichen Simulationsszenarien werden in Tabelle 24 aufgelistet. Die Grundgesamtheit  $N$  bezieht sich dabei auf jene Fahrzeuge, die den gesamten Streckenzug durchfahren. Dies bedeutet, dass die Grundgesamtheit nicht die gesamte abgewickelte Verkehrsmenge repräsentiert, sondern nur den Durchfahrtsanteil, auf dessen Datenbasis die fahrdynamischen Kenngrößen ermittelt wurden. Die Datenbasis sind Mittelwerte und Standardabweichung der aus jeweils 10 Simulationsläufen zusammengefassten Kenngrößen je Fahrzeug, die Grundgesamtheit  $N$  das stündliche Mittel aus der Menge der erfassten, den gesamten Streckenzug während der Simulationszeit (1h) durchfahrenden Fahrzeuge. Zusätzlich werden in Tabelle 24 der benötigte Stichprobenanteil an den durchfahrenden Fahrzeugen ( $n_{90}/n$ ) und die gesamte mittlere gemessene Verkehrsmenge  $N_{ges}$  am analysierten Streckenzug aufgelistet.

**Tabelle 24: erforderliche Stichprobengrößen bei variierender statistischer Sicherheit**

Kenngröße	Szenario	$N_{ges}$	$N$	$V$	$n_{90}$	$n_{95}$	$n_{90}/N_{ges}$
<b>mittlere Reise- geschwin- digkeit</b>	Q 85%	1356	831	0.09	<b>31</b>	60	2%
	Q 100%	1545	973	0.12	<b>54</b>	103	4%
	Q 115%	1663	1064	0.15	<b>83</b>	154	5%
	Q 100% / Signalzeitversatz +10 s.	1539	831	0.11	<b>46</b>	87	3%
	Q 100% / Signalzeitversatz +40 s.	1535	973	0.08	<b>25</b>	49	2%
<b>Beschleu- nigungs- rauschen</b>	Q 85%	1356	831	0.28	<b>77</b>	105	6%
	Q 100%	1545	973	0.26	<b>69</b>	95	4%
	Q 115%	1663	1064	0.22	<b>52</b>	72	3%
	Q 100% / Signalzeitversatz +10 s.	1539	831	0.17	<b>31</b>	44	2%
	Q 100% / Signalzeitversatz +40 s.	1535	973	0.17	<b>29</b>	40	2%
<b>Stillstands- anteile</b>	Q 85%	1356	831	1.76	<b>779</b>	804	57%
	Q 100%	1545	973	1.36	<b>860</b>	913	56%
	Q 115%	1663	1064	0.88	<b>792</b>	908	48%
	Q 100% / Signalzeitversatz +10 s.	1539	831	1.03	<b>695</b>	757	45%
	Q 100% / Signalzeitversatz +40 s.	1535	973	0.36	<b>338</b>	502	22%
<b>Congestion Index</b>	Q 85%	1356	831	1.92	<b>786</b>	808	58%
	Q 100%	1545	973	1.31	<b>852</b>	909	55%
	Q 115%	1663	1064	0.83	<b>768</b>	892	46%
	Q 100% / Signalzeitversatz +10 s.	1539	831	0.90	<b>661</b>	736	43%
	Q 100% / Signalzeitversatz +40 s.	1535	973	0.45	<b>442</b>	608	29%

Um reale Kenngrößen im fließenden Verkehr zu erheben, können Floating Car Data herangezogen, oder Messfahrten durchgeführt werden. Bei der Verwendung von Floating Car Data werden die

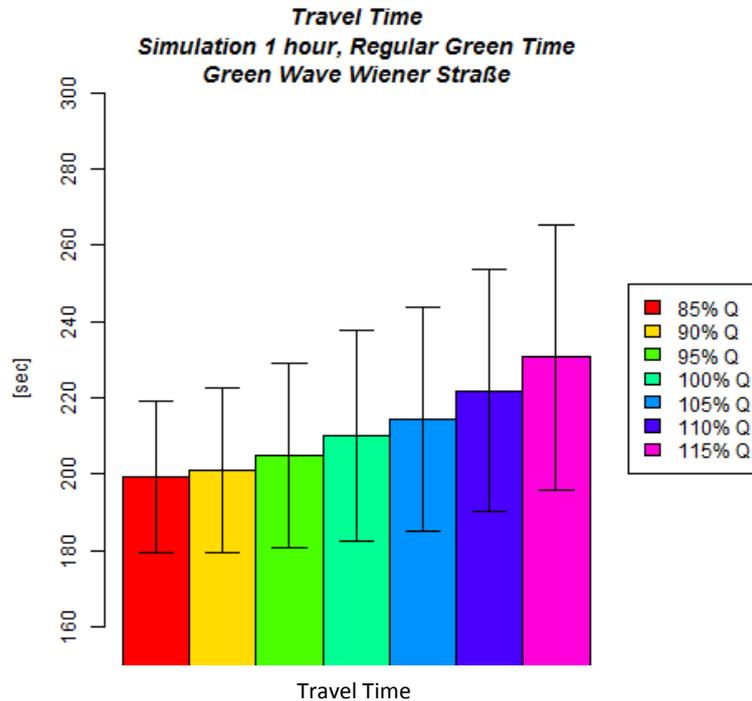
Daten von Fahrzeugen verwendet, welche ohnehin im Verkehr mitschwimmen – der gesamte Verkehr erfährt also keinen Einfluss durch die Datenerhebung. Werden die Daten hingegen durch Messfahrzeuge erhoben, so muss die Verkehrsmenge erhöht werden. In Tabelle 24 wird das Verhältnis der benötigten Messfahrten zur Grundgesamtheit für eine 90-prozentige statistische Sicherheit ( $n_{90}/N_{ges}$ ) aufgelistet. Es zeigt sich, dass sich die mittlere Reisegeschwindigkeit bereits bei zwei bis fünf Prozent Erhöhung der durchfahrenden Verkehrsmenge (Maximalwert: 83 Messfahrten) bestimmen lässt. Im Falle der höchsten simulierten Verkehrsbelastung entspricht dies einer gesamten mittleren Verkehrszunahme  $n_{90}/N_{ges}$  von 5 Prozent. Für das Beschleunigungsrauschen muss eine relative Zunahme des Durchfahrtsverkehrs von zwei bis sechs Prozent hingenommen werden. Auf das gesamte Verkehrsaufkommen würde dies im schlechtesten Fall von 77 Messfahrten (Q 85%) eine Erhöhung der Verkehrsmenge  $n_{90}/N_{ges}$  von 5,6% verursachen. Für die Kenngrößen Stillstandsanteil und Congestion Index werden als Stichprobenumfang 338 bis 860 Fahrten errechnet, der geringste Anstieg der Durchfahrtsverkehrsmenge wird zu 22% bestimmt. Diese sehr unterschiedlichen Ergebnisse der Berechnung der erforderlichen Stichprobengröße für verschiedene Kenngrößen werden im Folgenden einer genaueren Betrachtung unterzogen:

Bei 90-prozentiger statistischer Sicherheit sind nach obiger Berechnung für die mittlere Reisegeschwindigkeit 25 bis 83 Messfahrten nötig, wobei die Anzahl der benötigten Stichprobe mit der Verkehrsmenge steigt. Für die simulierte, gleichbleibende Belastung der Spitzenstunde („Q 100%/sign original“) kann die mittlere Reisegeschwindigkeit mit 54 Messfahrten repräsentativ erfasst werden. Die erforderliche Stichprobenanzahl für das Beschleunigungsrauschen nimmt ähnliche Größen ein. Sie liegt zwischen 29 und 77. Die Annahme von normalverteilten Daten im Gegensatz zur mittleren Reisegeschwindigkeit wirkt hier dem höheren Variationskoeffizienten entgegen. Generell sinkt die erforderliche Stichprobengröße für das Beschleunigungsrauschen mit Zunahme des Verkehrs bzw. mit einer Verschlechterung der Lichtsignalsteuerung.

Für die Bestimmung des Congestion Index werden nach der Berechnung bis zu 852 Messfahrten benötigt, im günstigsten Falle 442. Somit erscheint die Ermittlung dieser Messgröße durch Messfahrzeuge unmöglich, da dies den Verkehr selbst gravierend beeinflussen würde mit einem Plus von 29% Verkehr auf der Strecke. Für die Stillstandsanteile gilt mit bis zu 860 ermittelten Fahrten bei einer statistischen Sicherheit von 90% ähnliches. Diese Kenngröße bedient sich der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsinformation in jedem einzelnen gemessenen Punkt und weist bei geringem Mittelwert hohe Streuungen auf. Praktisch bedeutet dies, dass viele Fahrzeuge den Streckenzug ohne oder mit nur geringer Stillstandszeit durchfahren, andere hingegen müssen oft bzw. länger halten. Diese Kenngröße kann daher ebensowenig wie der Congestion Index mit Messfahrten bestimmt werden.

Auf der Basis der betrachteten Simulationsszenarien erscheinen die Kenngrößen mittlere Reisegeschwindigkeit und Beschleunigungsrauschen geeignet, um in realen Messfahrten erhoben zu werden. Für den in der Simulation untersuchten Streckenzug wurden bei „normaler“ Belastung (100% Q) Reisezeiten von durchschnittlich 210 Sekunden (3,5 Minuten) mit einer Standardabweichung von 28 Sekunden gemessen (vgl. Abbildung 90). Die höchste mittlere Reisezeit (Q 115%) beträgt 230 Sekunden (etwa 4 Minuten). Unter Berücksichtigung einer Toleranzzeit für das Wenden des Messfahrzeuges von etwa 2 Minuten (Verlassen des Streckenzugs und neuerliches Auffahren bei einer Umlaufzeit von 80 Sekunden plus ggf. Zeitfenster für Datensicherung/-prüfung) beträgt die benötigte Zeit für die einmalige Datenaufnahme des Streckenzugs ~ 6 Minuten. Da das Messfahrzeug den zu untersuchenden Streckenzug ebenfalls in der Gegenrichtung passieren muss,

erhöht sich diese auf etwa 12 Minuten, jedoch können auch bei der Rückfahrt Daten für die Analyse der Gegenrichtung aufgenommen werden.



**Abbildung 90: Mittlere Reisezeiten bei steigender Verkehrsbelastung**

Nach dieser Rechnung können je Stunde mit einem Messfahrzeug 5 Messfahrten (20 Messfahrten bei vier Messfahrzeugen) durchgeführt werden, in 2,5 Stunden 13 (bzw. 50 mit 4 Messfahrzeugen). Unter Annahme annähernd gleichbleibender Verkehrsmengen in diesem Zeitraum kann die Kenngröße der mittleren Reisegeschwindigkeit entsprechend Tabelle 25 mit 90-prozentiger statistischer Sicherheit repräsentativ erhoben werden, sofern keine grobe Überlastung des Streckenzuges eintritt. Für das Beschleunigungsrauschen ergibt sich dieselbe Erhebbarkeit bei sehr hohem Verkehrsaufkommen bzw. bei schlechter Lichtsignalsteuerung. Die Bewertungsbasis stellen hierfür die errechneten Stichprobengrößen aus Tabelle 24 dar.

**Tabelle 25: Repräsentativität der Kenngrößen bei Datenerhebung mit zwei Messfahrzeugen**

Kenngröße	statistische Sicherheit 4 Messfahrzeuge./2,5 h	Verkehrsbedingungen
<b>mittlere Reisegeschwindigkeit [km/h]</b>	mittel (90%)	„normale“ Belastung der Spitzenstunde
<b>Beschleunigungsrauschen [m/s<sup>2</sup>]</b>	mittel (90%)	Überlastung des Streckenzuges oder schlechte Koordinierung
<b>Anteil der Stillstandszeiten [%]</b>	-	
<b>Congestion Index [-]</b>	-	

Für die Datenerhebung im simulierten Szenario sind also vier Messfahrzeuge nötig, um bei einer statistischen Sicherheit von 90% repräsentative Daten zu erhalten. Es ist zu berücksichtigen, dass sich diese Ergebnisse auf über jeweils 2,5 Stunden gleichbleibende Verkehrsnachfrage beziehen, Schwankungen zu Spitzenzeiten jedoch einen höheren Bedarf an Messungen erfordern können.

## 7.5 Erkenntnisse der simulationsbasierten Kenngrößenanalyse

Mit den unterschiedlichen Simulationsszenarien konnten die Auswirkungen der wichtigsten Einflussfaktoren Verkehrsmenge und Lichtsignalsteuerung auf fahrdynamische Kenngrößen aufgezeigt werden. Eine steigende Verkehrsmenge wirkt sich dabei in steigenden (Beschleunigungsrauschen, Anteil der Stillstandszeiten, Congestion Index) bzw. sinkenden Ausprägungen (mittlere Reisegeschwindigkeit, Cruising-Anteil) aus. Hingegen nimmt eine variierende koordinierte Lichtsignalsteuerung einen differenzierteren Einfluss und kann hinsichtlich der Stillstandsanteile eine Verbesserung bewirken, jedoch zu Lasten einer hohen mittleren Reisegeschwindigkeit. Letztgenannte Kenngröße weist im innerstädtischen Verkehr bedingt durch die Lichtsignalsteuerung an verschiedenen hintereinanderliegenden Knoten eine Klassenbildung auf. Für das Beschleunigungsrauschen ist festzustellen, dass die Streuung kleiner wird, je „schlechter“ der Verkehrsfluss ist, also bei höherer Verkehrsnachfrage oder einem Bruch in der Koordinierung der Lichtsignalsteuerung.

Für die Kenngrößen der mittleren Reisegeschwindigkeit und des Beschleunigungsrauschens kann festgestellt werden, dass diese mit vertretbarem Aufwand in empirischen Messfahrten erhoben werden können, ein einzelnes Messfahrzeug hierfür jedoch zu wenige Daten liefern würde. Die Aussagekraft bei stark schwankender Verkehrsbelastung ist jedoch schwer festzustellen, weshalb sich die in dieser Arbeit bestimmten fahrdynamischen Kenngrößen am Besten für vergleichende Analysen am selben Streckenzug zu vergleichbaren Zeiträumen eignet. Für die Kenngröße Stillstandsanteile gilt jedoch, dass ein hoher Messaufwand einer geringen Aussagekraft gegenübersteht, wenngleich sie bei stark unterschiedlichen Ausprägungen ein Erkenntnis über ein grundsätzliches Koordinierungsproblem einer Lichtsignalanlage ermöglicht.

## 8 Vergleich der simulierten mit gemessenen Trajektorien

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse aus der Realdatenerhebung jenen aus der Simulation gegenübergestellt werden. Hierzu wurden Scatterplot-Skripte aus der Simulationsdatenauswertung (vgl. Abbildung 69) und Boxplot-Skripte aus der Realdatenuntersuchung (vgl. Abbildung 35) angepasst und angewendet, um eine vergleichende Betrachtung zu ermöglichen. Die Vergleichbarkeit der Daten unterliegt dabei einigen Einschränkungen, auf welche in Abschnitt 8.1 eingegangen wird. In Abschnitt 8.2 werden die realen und simulierten Kenngrößen im Detail verglichen und die Erkenntnisse in Abschnitt 8.3 zusammengefasst.

### 8.1 Einschränkungen für den Datenvergleich

Dabei findet sich der grundlegendste Unterschied in der Datenmenge, welche je Verfahren generiert werden kann. Durch die Vereinfachung in der Modellbildung kommt es auch zu systemischen Unterschieden (siehe Tabelle 26).

#### 1. Verkehrsmenge und Erhebungszeitraum

Die Verkehrsmenge wurde in der Realdatenbetrachtung in 15-Minuten-Intervallen an verschiedenen Querschnitten an der Strecke gemessen und über die Strecke verschmiert. Geringere aggregierte Intervalle können mit der vorhandenen Infrastruktur nicht erhoben werden. In der Simulation wurden hingegen feinere Intervalle (7,5 Minuten) gemessen, um eine differenziertere Betrachtung zu ermöglichen. Außerdem wird die Verkehrsmenge in der Simulation ob einer vereinfachten Modellbildung nur an zwei verschiedenen Zuflüssen variiert, um verschiedene Verkehrsstärken zu erzeugen. Da der reale Durchfahrtsverkehr nicht bekannt ist, biegen Fahrzeuge in der Simulation einer stochastischen Verteilung folgend an den Knotenpunkten ab, um die realen Knotenströme zu erfüllen. Somit ist der simulierte Durchfahrtsanteil  $N$  (vgl. Abbildung 91 b) unsicher.

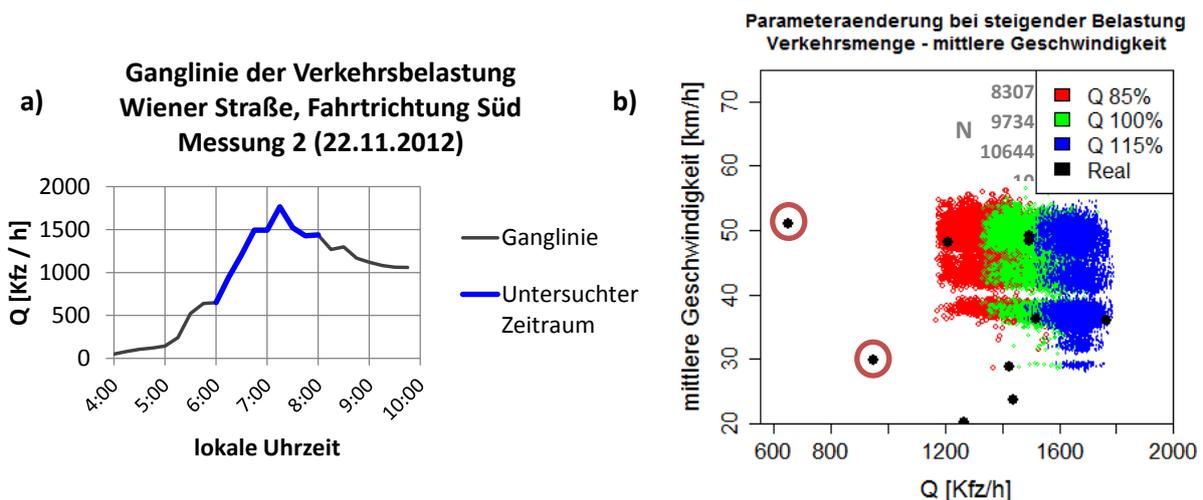


Abbildung 91: Ganglinie der realen Verkehrsbelastung (a) und Boxplot der realen und simulierten Verkehrsbelastungen (b)

Realdaten wurden für verschiedene Streckenzüge je Signalprogramm (= Tageszeit) erhoben. Die Simulation bezieht sich auf die Spitzenstunde des Morgenprogramms des Streckenzugs Wiener Straße in Fahrtrichtung Süd. Für dieses Szenario wurde eine konstante Verkehrsnachfrage simuliert, in der Realität schwankt diese jedoch im betrachteten Zeitraum stark, wie die Ganglinie in Abbildung 91 (a) zeigt. So liegt die Verkehrsbelastung zu Beginn der Messfahrten um 6:00 Uhr bei etwa 650

## Vergleich der simulierten mit gemessenen Trajektorien

Kfz/h und steigt bis 7:15 Uhr auf 1765 Kfz/h, um sich bis 08:00 Uhr bei etwas weniger als 1500 Kfz/h zu halten. In den simulierten Szenarien mit 85 bis 115% der Verkehrsbelastung der Spitzenstunde bewegen sich die Werte der Verkehrsbelastung zwischen 1169 Kfz/h und 1793 Kfz/h. Die ersten beiden Messfahrten können also durch die Simulationsdaten (Abbildung 91 (b) runde Markierung) in keinem Falle repräsentiert werden. Weiters zeichnet sich eine zufällige Verteilung der mittleren Geschwindigkeiten ab, dieser wird in Abschnitt 8.2 behandelt.

Nach dem Ausschluss der beiden oben genannten Trajektorien überlappen sich die im realen Testfeld und die in der Simulation gemessenen Bereiche der Verkehrsstärke. Dies wird in einem Boxplot veranschaulicht (Abbildung 92): Der geringste Wert des Simulationsszenarios von 85% der Spitzenstunde („SIM\_Q085“) liegt knapp unter dem Minimalwert der Realdaten, der höchste Wert des Simulationsszenarios von 115% der Spitzenstunde („SIM\_Q115“) knapp über dem Maximalwert der Realdaten („REAL“). Die Grundgesamtheit N der Realdaten wird durch den Ausschluss von zwei Trajektorien von 10 auf 8 reduziert.

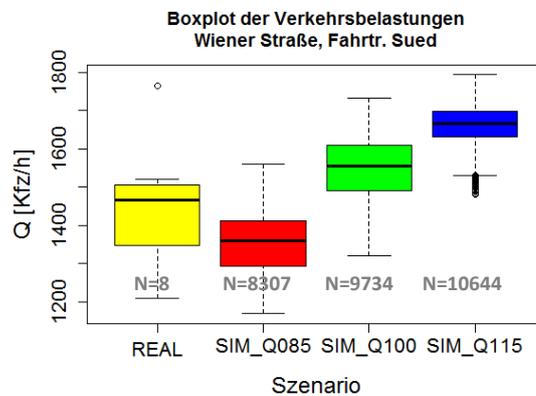


Abbildung 92: Boxplot der Verkehrsbelastungen

### Signalprogramme

Die Signalprogramme sind veränderlich je Tageszeit. Daher können nur die Realdaten des morgendlichen Signalprogramms an der Wiener Straße in Fahrtrichtung Süd aus der Messung nach der Signalprogrammanpassung (vgl. Abschnitt 5.1). für Vergleiche herangezogen werden. Eine weitere Besonderheit sind verkehrsabhängige Grünzeiten, welche in der Realität auftreten, in der Simulation jedoch nicht berücksichtigt wurden.

Tabelle 26: Datenbasis für Vergleich Messfahrten - Simulation

	Messfahrten	Simulation
<b>Untersuchungsgebiet</b>	Wiener Straße, Fahrtr. Süd	Wiener Straße, Fahrtr. Süd
<b>Untersuchungszeitraum</b>	06:00 bis 08:00, 22.11.2012 (Messung 2)	morgendliche Spitzenstunde
<b>Signalprogramm</b>	Morgendliches SP mit verkehrsabhängiger Steuerung	Morgendliches SP ohne verkehrsabhängige Steuerung
<b>Messfahrten je Erhebung (N)</b>	8	erfasster Durchgangsverkehr
<b>Erhebung</b>	1	10 Simulationsläufe

## 8.2 Kenngrößenausprägungen im Vergleich

Im Kapitel 6 wurde die Aussagekraft der realen Messfahrten ob der geringen Datenmenge je Signalprogramm angezweifelt. Diese Zweifel wurden durch eine Abschätzung der erforderlichen Stichprobenmenge auf der Basis von Simulationsdaten in Kapitel 7 bestätigt. Daher werden in diesem Kapitel Scatter-Plots der Simulationsdaten mit den Kenngrößenausprägungen der Realdaten verglichen, um so einen optischen Vergleich anzustellen. Da die Daten zumeist nicht normalverteilt sind, werden zusätzlich für einen quantitativen Vergleich Boxplots herangezogen und die Quartilwerte zur Analyse verwendet.

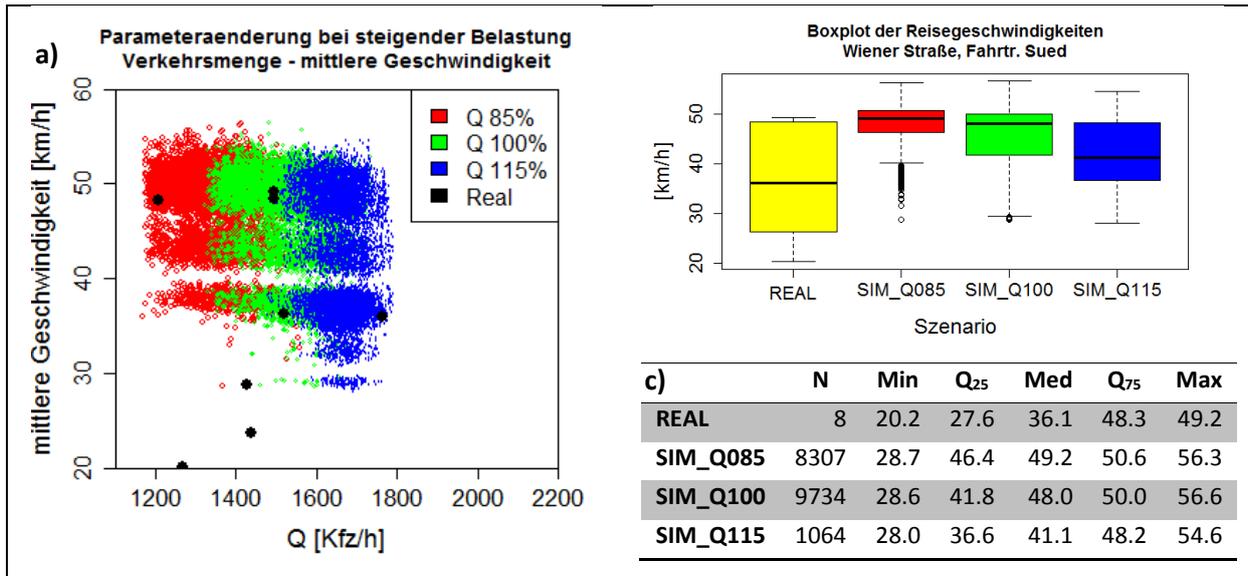
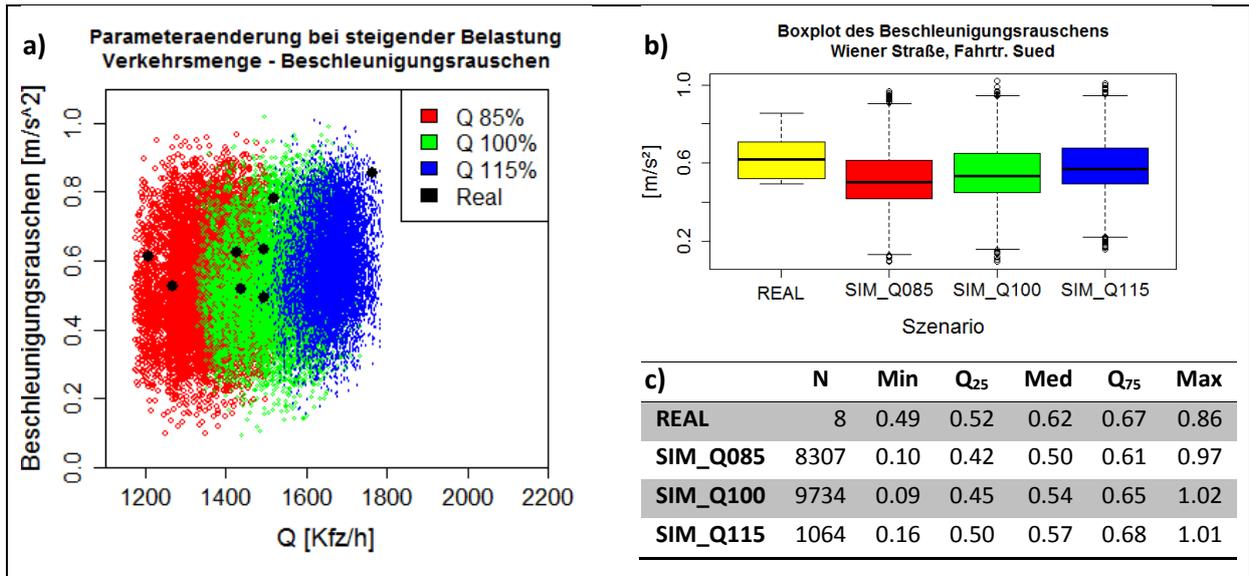


Abbildung 93: mittlere Reisegeschwindigkeit real und simuliert: Scatterplot(a), Boxplot(b), Datenblatt(c)

Im Scatterplot von Verkehrsmengen und **Reisegeschwindigkeiten** (Abbildung 93 a) wird ersichtlich, dass 5 der 8 realen Datenpunkte in dem Bereich der simulierten Verkehrsmenge von 100% der Spitzensunde liegen („Q 100%“), zwei liegen im unteren Bereich von 85% und einer im oberen Bereich von 115%. Die realen mittleren Reisegeschwindigkeiten überlappen für 6 von 8 Punkten mit dem simulierten Bereich, zwei jedoch liegen eindeutig unter den simulierten Werten bei 20 bzw. 24 km/h (siehe Minimalwert des Szenarios REAL in Abbildung 93 c). Das Geschwindigkeitsniveau ist somit für die Realdaten niedriger als bei allen simulierten Szenarien, wie auch der Boxplot (Abbildung 93 b) zeigt. Alle Quartils- und Extremwerte der Simulationsdaten sind zumeist deutlich höher als jene der Realdaten. Weiters ist zu beobachten, dass die Abstände von Minimal- zu Maximalwerten aller Szenarien ähnliche Größen annehmen (REAL: 29; SIM\_Q085: 28, SIM\_Q100: 28, SIM\_Q115: 27), die Bereiche zwischen dem ersten und dritten Quartil (farbige Bereiche im Boxplot) sind in den simulierten Szenarien weniger stark ausgeprägt. Somit ist für die Kenngröße der mittleren Geschwindigkeit festzustellen, dass sie in der Simulation tendenziell höher ausfällt als jene der Realdaten.

## Vergleich der simulierten mit gemessenen Trajektorien



**Abbildung 94: Beschleunigungsrauschen real und simuliert: Scatterplot(a), Boxplot(b), Datenblatt(c)**

Anders verhält sich das **Beschleunigungsrauschen**, auf welches in Abbildung 94 eingegangen wird, da alle realen Kenngrößenausprägungen mit den simulierten überlappen (a). Dies ist auch im Boxplot (b) abzulesen, in welchem die Plots der simulierten Szenarien den Bereich des realen abdecken. Am nächsten kommen die Realdaten (REAL) den simulierten mit einer Verkehrsnachfrage von 115% der Spitzenstunde (SIM\_Q115), bei welchen die Quartile 1, 2 (Median) und 3 (siehe Abbildung 94 c) nur um 4, 9, bzw. 1% abweichen. Tendenziell tritt in den simulierten Szenarien mit zunehmender Verkehrsstärke eine Erhöhung des Beschleunigungsrauschens auf, wobei dies konsequent für die Quartile 1 bis 3 gilt (siehe Abbildung 94 b und c). Diese Entwicklung ist auch für die Realdaten feststellbar, welche für die höchsten Belastungen das höchste Beschleunigungsrauschen aufweisen (zwei Datenpunkte, siehe Abbildung 94 a). Ebenso weisen die Bandbreiten zwischen erstem und drittem Quartil hohe Ähnlichkeiten unter allen Szenarien auf (vgl. Abbildung 94 c: REAL: 0,15; SIM\_Q085: 0,19, SIM\_Q100: 0,20; SIM\_Q115: 0,18). Grundsätzlich aber fallen die Realdaten höher aus als jene der simulierten, wie der Vergleich der Mediane zeigt (siehe Abbildung 94 b und c), da die geringeren Werte von 0.1 bis 0.4 in der Realität nicht gemessen werden (siehe Abbildung 94 c: Minimalwert für Szenario REAL: 0.49), in den simulierten Szenarien jedoch häufig auftreten (siehe Abbildung 94 a).

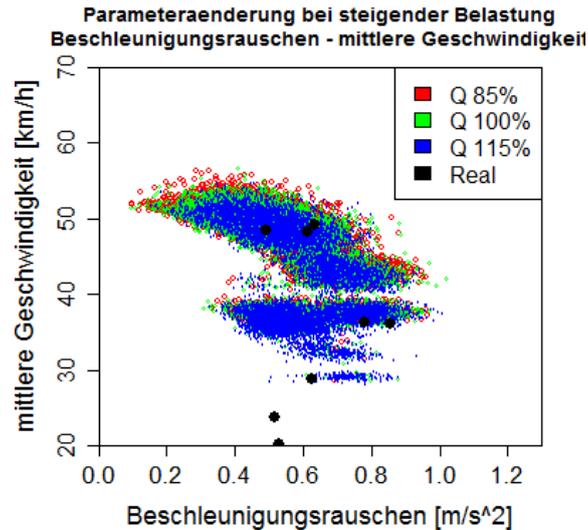


Abbildung 95: Scatterplot von Beschleunigungsrauschen und Reisegeschwindigkeit real und simuliert

Auch bei der Gegenüberstellung von Beschleunigungsrauschen und mittlerer Reisegeschwindigkeit (Abbildung 95) ist eine Überlappung von Realdaten und aus der Simulation gewonnen feststellbar, abgesehen von den o.g. beiden Punkten bei sehr niedriger mittlerer Reisegeschwindigkeit.

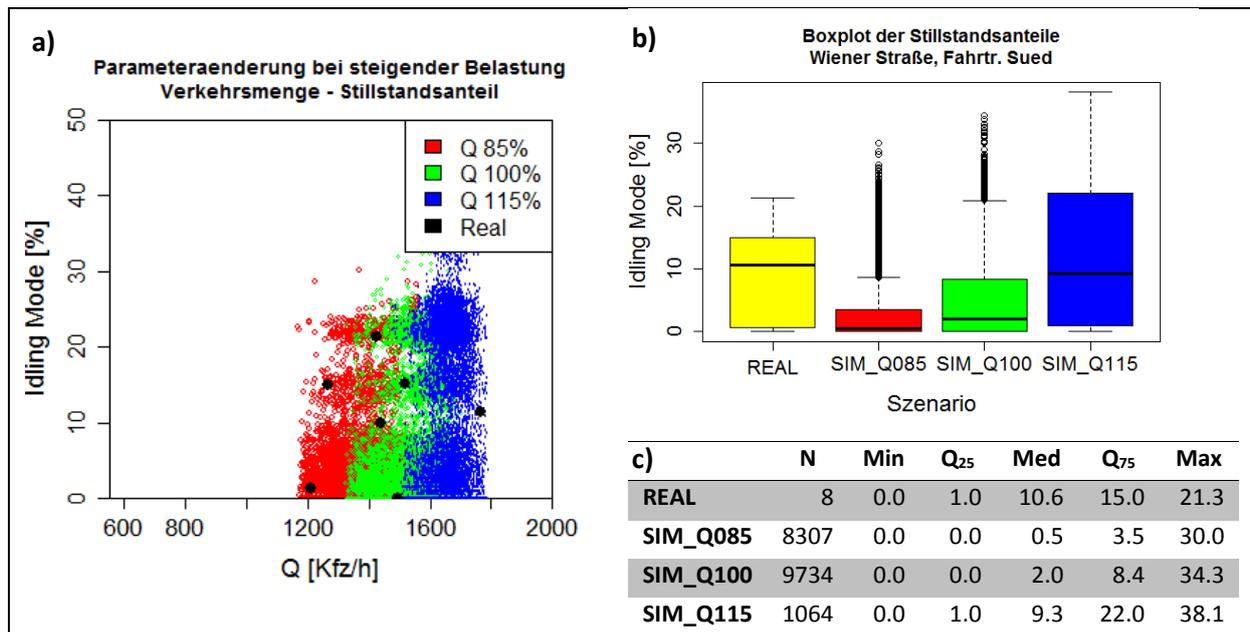
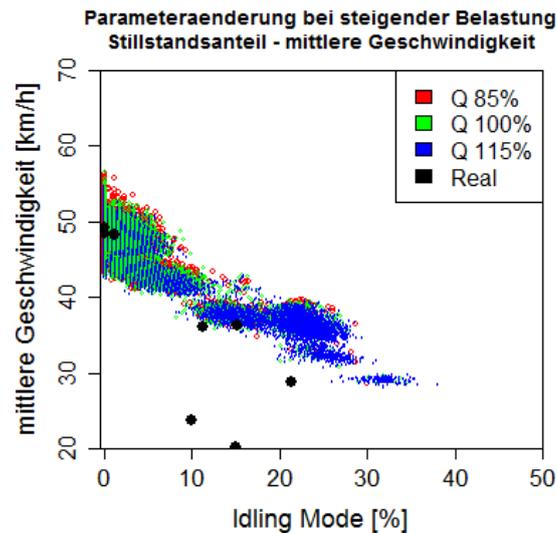


Abbildung 96: Stillstandsanteile real und simuliert: Scatterplot(a), Boxplot(b), Datenblatt(c)

Für die Stillstandsanteile („Idling Mode“) kann festgestellt werden, dass alle in der Realität gemessenen Werte auch in der Simulation auftreten (Abbildung 96 a). Zwar treten in der Simulation auch höhere als in der Realität gemessene Werte auf, jedoch offenbart der Boxplot (Abbildung 96 b) der Stillstandsanteile, dass in der Simulation eine Menge geringer Werte knapp über 0% auftreten, weswegen die Mediane der Simulationsszenarien geringer ausfallen als jener der Realdaten (siehe Abbildung 96 c). Es ist zu beobachten, dass bei höheren Verkehrsbelastungen die Stillstandsanteile stärker steigen. So beträgt die Differenz der Mediane von dem Simulationsszenario mit 85% der Verkehrsbelastung der Spitzenstunde zum 100%-Szenario 1,5 Prozentpunkte, von 100% zu 115% bereits 7.3. Selbiges gilt für das dritte Quartil (4,9 bzw. 13,6 Prozentpunkte Unterschied).

## Vergleich der simulierten mit gemessenen Trajektorien



**Abbildung 97: Scatterplot von Stillstandsanteilen und Reisegeschwindigkeit real und simuliert**

Im Vergleich der Stillstandsanteile mit der mittleren Reisegeschwindigkeit (Abbildung 97) zeigt sich, dass im Bereich hoher Geschwindigkeiten (ca. 50 km/h) sowohl in der Realität, als auch in der Simulation sehr geringe Stillstandsanteile von knapp über 0% auftreten. Gleichzeitig überschneiden sich in diesem Bereich Real- und Simulationsdaten sehr gut. mit sinkender mittlerer Geschwindigkeit steigen auch in der Realität die Stillstandsanteile, jedoch stärker als in der Simulation.

### 8.3 Zusammenfassung

Durch den Vergleich der simulierten mit den gemessenen Trajektorien können Unterschiede und Ähnlichkeiten hinsichtlich der Kenngrößenausprägungen bestimmt werden. Diese werden zunächst benannt und anschließend diskutiert.

1. Die reale Verkehrsnachfrage liegt zwischen den simulierten Nachfragen „85%“ und „100%“.
2. Die realen Reisegeschwindigkeiten sind geringer als die simulierten. Zwei von 8 Datenpunkten liegen unterhalb der simulierten Reisegeschwindigkeiten.
3. Das Beschleunigungsrauschen in den Realdaten ist höher als in der Simulation, die Bandbreite der Messdaten geringer.
4. Die Stillstandsanteile sind ebenso in den Realdaten höher als in der Simulation bei gleichzeitig geringerer Bandbreite.
5. Die Mediane aus den Kenngrößen Reisegeschwindigkeit, Beschleunigungsrauschen und Stillstandsanteile aus den Messdaten sind „schlechter“ als jene der Simulationswerte. Am nächsten sind sie den Werten aus „115% Q“. Der jeweilige Median in der Simulation weicht in folgender Relation von den Messwerten ab:  
Reisegeschwindigkeit: +14%  
Beschleunigungsrauschen: -8%  
Stillstandsanteile: -12%

Der Umstand, dass die reale Verkehrsnachfrage in der unteren Hälfte der Verkehrsnachfrage in den simulierten Szenarien liegt, die Kenngrößen jedoch durchwegs auf einen schlechteren Verkehrsfluss schließen lassen, kann nicht ausschließlich mit der geringen Stichprobe erklärt werden. Vielmehr ist die Begründung in der Modellbildung zu suchen, welche der Mikrosimulation zugrunde liegt. In der Modellbildung werden folgende Faktoren vereinfacht:

1. Strecken: Zuflüsse an Knotenpunkten werden auf je eine Strecke zusammengefasst.
2. Verkehrsnachfrage: Zuflüsse werden an zwei Strecken variiert.
3. Signalprogramme: Diese werden nicht verkehrabhängig gesteuert.
4. Durchgangsverkehrsanteil: Abbieger folgen einer stochastischen Verteilung, welche für jeden Knoten festgelegt ist.

Der Vergleich von Real- und Simulationsdaten lässt eine grundsätzliche Ähnlichkeit der Kenngrößenprägung der Realdaten mit jener der Simulationsdaten erkennen. Mittlere Reisegeschwindigkeiten fallen in der Realität deutlich geringer aus, als in den Simulationsdaten, und das Beschleunigungsrauschen und die Stillstandsanteile sind real höher, als simuliert. Die deutlichen Unterschiede können durch eine Vereinfachung der Zuflüsse und Abbiegebeziehungen erklärt werden und dadurch, dass verkehrabhängige Steuerungen in der Simulation nicht berücksichtigt werden. Der in der Realität deshalb noch differenziertere Verkehrsablauf spiegelt sich somit in schlechteren Werten des Verkehrsflusses. Es ist folglich keine direkte Vergleichbarkeit der Real- mit den Simulationsdaten gegeben, die jedoch ähnlichen Ausprägungen der Kenngrößen bestätigen aber die Messbarkeit der Kenngrößen in der Realität. Für eine stärkere Aussagekraft dieser ist jedoch eine größere Durchdringung mit Messgeräten erforderlich.

Vergleich der simulierten mit gemessenen Trajektorien

## 9 Fazit

In diesem abschließenden Abschnitt werden die gewonnenen Erkenntnisse aus der innerstädtischen Verkehrsflussanalyse mit Einzelfahrzeugdaten zusammengefasst. Die Erkenntnisse beruhen auf empirischen und Simulationsdaten. Weiters werden auch die Beschränkungen des Verfahrens diskutiert.

### Realdaten für die Verkehrsflussanalyse

Mit Satellitentechnologie gewonnene Einzelfahrzeugdaten ermöglichen die Aufzeichnung von Geschwindigkeitsprofilen und Geschwindigkeitsganglinien der mit einem Logging-Gerät ausgerüsteten Fahrzeuge. Da zu den Geschwindigkeitsinformationen auch Orts- und Zeitinformationen bestimmt werden können, wird durch die Erfassung der GPS-Daten der Fahrtverlauf eines Fahrzeugs auf einer gefahrenen Strecke abgebildet. Da sich die Fahrzeuge gegenseitig beeinflussen, kann so mit einer im Vergleich zum gesamten Verkehrsaufkommen geringen Anzahl von erfassten Fahrzeugen auf den gesamten Verkehrsablauf geschlossen werden. Neben den in kommerziellen Anwendungen wie Routing und Verkehrsinformation eingesetzten Geschwindigkeits-, Zeit- und Ortsinformationen können bei ausreichender Logging-Frequenz von mindestens 1 Hz weitere fahrdynamische Kenngrößen, wie zum Beispiel Stillstandsanteile oder das Beschleunigungsrauschen geringem Aufwand ortsunabhängig erhoben werden. Die in dieser Arbeit hauptsächlich untersuchten Kenngrößen sind dabei die mittlere Reisegeschwindigkeit und das Beschleunigungsrauschen (die Standardabweichung der Beschleunigung), welche die mittleren Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge erfasst.

### Realdatenerfassung und Datenaufbereitung

Für die satellitengestützte Datenerfassung bedient man sich GPS-Empfängern, bestehend aus einer Empfangseinheit (Antenne) und einer Aufzeichnungseinheit, welche die Satelliteninformationen in Geschwindigkeits-, Zeit- und Ortsinformationen umwandelt und speichert bzw. an eine Zentrale sendet. Die Vergleichbarkeit von GPS-basierten Daten von zeitlich und örtlich verschiedenen Trajektorien mit Geräten verschiedener Hersteller ist jedoch nicht eindeutig gegeben, da bereits bei der gerätsinternen Datenaufbereitung Glättungen verschiedener Art herstellerabhängig vorgenommen werden. Die für die Bildung fahrdynamischer Kenngrößen benötigten, zeitlich äquidistanten Geschwindigkeitsinformationen können in verschiedenen Aufzeichnungsintervallen geloggt werden, deren Einfluss auf die Kenngrößen in dieser Arbeit nachgewiesen wurde. So stellte sich heraus, dass größere Aufzeichnungsintervalle einen Glättungseffekt herbeiführen und Kenngrößen wie das Beschleunigungsrauschen bei niedrigerer Aufzeichnungsrate geringer ausfallen als bei höherer. Der Vergleich verschiedener Logging-Frequenzen mit 10Hz-Daten ergab, dass eine Aufzeichnungsrate von 1Hz die Geschwindigkeitsverläufe ausreichend abbildet, grundsätzlich jedoch für vergleichende Analysen dieselben Geräte mit derselben Aufzeichnungsrate herangezogen werden sollten. Ebenso spielt die Datenaufbereitung (Glätten der Geschwindigkeitsganglinien, Schneiden der Trajektorien) für die Ausprägung der Kenngrößen eine Rolle und hängt dabei von der Datenbasis ab. Zu den beeinflussenden Parametern zählen

- Die Aufzeichnungsrate (Logging-Frequenz)
- Maximale DOP-Werte (Dilution of Precision: Qualitätskriterium für die Geoinformation)
- Anzahl der verfügbaren Satelliten zur Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung
- Drehraten und weitere Kriterien für den Ausschluss unrealistischer Daten
- Maximale Anzahl und Dauer von Signalausfällen

Durch eine Festlegung des Postprocessings und der obigen Qualitätsparameter kann so im Sinne der FCD (Floating Car Data) eine einheitliche Datenquelle erzeugt werden, welche vergleichbare empirische mikroskopische Verkehrsflussanalysen ermöglicht – und zwar an jeder Strecke unter freiem Himmel.

### **Vorteile und Einschränkungen**

Der große Vorteil von satellitengestützter Einzelfahrzeugdatenerfassung ist die Flexibilität des Systems, da keine verkehrsseitige Infrastruktur für die Datenerfassung benötigt wird. Die so gewonnenen Geschwindigkeitsdaten eignen sich als eine weitere Größe für die Verkehrsflussanalyse im innerstädtischen Bereich, in welchem die vielen äußeren Einflüsse eine Interpolation von Querschnittsmessungen für dazwischenliegende Abschnitte nicht zulassen. Eine Messung des Verkehrsaufkommens kann das Verfahren jedoch nicht ersetzen.

Ein weiterer klarer Vorteil ist der Ortsbezug durch die Positionsdaten. Mit ihnen können bei geeigneter Visualisierung oder Kilometrierung des Verkehrsnetzes Schwachstellen gefunden werden, z.B. durch die Identifizierung von Stellen mit häufigen Halten von Fahrzeugen.

Bei Untersuchungen mit der gezeigten Methodik ist darauf zu achten, dass bestimmte Einflussfaktoren ausgeschlossen werden können (z.B. außergewöhnliche Vorfälle wie Stau, Einfluss auf das Fahrverhalten durch Motorisierung oder persönliches Fahrverhalten). Die Methodik der Verkehrsflussanalyse mit Einzelfahrzeugdaten von einzelnen Messfahrten eignet sich vor allem für vergleichende Verkehrsflussanalysen von Streckenzügen. Die angewandte Methodik kann durch weitere zeitgleiche Messfahrten an wichtigen, den untersuchten Streckenzug kreuzenden Strecken, erweitert werden, um weitere Informationen z.B. über das Zusammenspiel von gesetzten Maßnahmen auf einem Streckenzug zu erhalten.

### **Mikrosimulation**

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass mit Satellitentechnologie empirisch gewonnene Einzelfahrzeuginformationen einen Datenschatz darstellen, welcher bei entsprechender Durchdringung den gesamten Verkehrsablauf auf Strecken unter freiem Himmel beschreiben kann. Einzelne Messfahrzeuge können jedoch nur einen Bruchteil der verkehrenden Fahrzeuge erfassen. Durch die Simulation eines Streckenzuges kann die erforderliche Anzahl an Messfahrzeugen ermittelt werden, mit deren Daten der Verkehrsfluss analysiert werden kann. Diese Anzahl ist jedoch von vielen Faktoren abhängig, wie der auszuwertenden Kenngröße, der Streckenlänge, der mittleren Reisezeit, der Verkehrsmenge, der Funktionalität der koordinierten Verkehrssteuerung und nicht zuletzt der Infrastruktur (Abstände der Knotenpunkte, Straßennutzung, Bebauung). Grundsätzlich aber ist der Bedarf an Messfahrten niedriger, je homogener der Verkehr auf einem Abschnitt fließt. Für den simulierten Straßenzug konnten für eine statistische Sicherheit von 90% eine Anzahl von 25 bis 83 Messfahrten (mittlere Reisegeschwindigkeit) bzw. von 29 bis 77 Messfahrten (mittleres Beschleunigungsrauschen) für den untersuchten Streckenzug an der Wiener Straße in Graz bestimmt werden. Dies entspricht einer Durchdringung von 2 bis 6 Prozent.

### **Erkenntnisse aus fahrdynamischen Kenngrößen**

Viele aus Geschwindigkeitsinformationen ableitbare Kenngrößen sind voneinander abhängig und bedürfen daher keiner gesonderten Betrachtung. Daher wurde in dieser Arbeit vornehmlich die Kenngröße der mittleren Reisegeschwindigkeit herangezogen, welche im Gegensatz zur mittleren Reisezeit unabhängig von der Streckenlänge ist, sowie das Beschleunigungsrauschen, welches durch große Beschleunigungs- und Bremsvorgänge ansteigt. Es wird in dieser Arbeit klar, dass die verschiedenen Fahrzeuge ähnliche Geschwindigkeitsganglinien beschreiben und sich je nach Position

im Pulk hinsichtlich der fahrdynamischen Kenngrößen in verschiedene Gruppen (vgl. Abschnitt 7.3) einteilen lassen (Simulationsergebnis). Klar voneinander getrennte Gruppen von Geschwindigkeitsklassen (die Klasseneinteilung erfolgte visuell an den Scatter-Plots) weisen je ein charakteristisches Beschleunigungsrauschen mit unterschiedlichen Schwankungsbreiten auf. Durch die Klassifizierung der Datensätze kann ein genaueres Bild des Verkehrs gezeichnet und die Veränderung der Mittelwerte und Streuungen fahrdynamischer Kenngrößen differenzierter betrachtet werden. Dies gilt jedoch für große Datensätze, welche aus einer Mikrosimulation oder FCD mit hoher Durchdringungsrate stammen können.

Die empirische Datenanalyse wurde in dieser Arbeit auf Basis einer begrenzten Datenmenge angestellt, welche unter der in der Mikrosimulation bestimmten erforderlichen Datenmenge liegt. Jedoch konnten in den empirischen Daten dennoch Unterschiede in der Ausprägung der Kenngrößen hinsichtlich der Tageszeit bzw. des Signalprogramms oder auch hinsichtlich des Untersuchungsgebiets festgestellt werden. Insbesondere wurde in dieser Arbeit erkannt, dass trotz guter Werte der Reisegeschwindigkeit ein erhöhtes Beschleunigungsrauschen auftreten kann, welche auf die Koordinierung der Lichtsignalanlagen zurückzuführen ist. Hinsichtlich eines homogeneren Verkehrsflusses kann dieses Erkenntnis als Basis für eine Anpassung der Lichtsignalsteuerung verwendet werden.



## Literaturverzeichnis

- BEVLY, D. M., GERDES, J. C., WILSON, C., Zhang G. (2000): *The Use of GPS Based Velocity Measurements for Improved Vehicle State Estimation*, In: Proceedings of the American Control Conference, Chicago, Illinois
- BOLTZE, M., BUSCH, F., FRIEDRICH, B., Friedrich, M., KOHOUTEK, S., LÖHNER, H., LÜßMANN, J., OTTERSTÄTTER, T. (2010): *AMONES-Anwendung und Analyse modellbasierter Netzsteuerungsverfahren in städtischen Straßennetzen*, Technische Universität München et al., Forschungsbericht
- BRILON, W., PONZLET, M. (1996): *Auswirkungen von zeitlich veränderlichen Leistungsfähigkeiten*, In: Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn, Heft 718.
- BRILON, W.; SCHNABEL, W. (2003): *Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufes auf Hauptverkehrsstraßen*, Straßenverkehrstechnik 1/2003.
- D'ESTE, G.M., ZITO, R., TAYLOR, M.A.P. (1999): *Using GPS to Measure Traffic System Performance*, In: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 14, S. 255-265
- ERICSSON, E. (2000): *Variability in urban driving patterns*, In: Transportation Research Part D 5, 337-354
- ERICSSON, E. (2001): *Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors*, In: Transportation Research Part D 6, S. 325-345
- FALLAST (2012): Überarbeitung Steuergebiet 30 Wiener Straße, Referat für Verkehrslichtsignalanlagen, Stadt Graz
- FELLENDORF, M. (2011): *Skriptum zur Vorlesung mit integrierten Übungen "Straßenwesen"*, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Technische Universität Graz
- FELLENDORF, M. (2009): *Foliensatz-Straßenverkehrstechnik und Telematik*, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, TU Graz
- FGSV (2001). *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2001)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), FGSV-Verlag, Köln
- FARAGHER, R. (2012): *Understanding the Basis of the Kalman Filter Via a Simple and Intuitive Derivation*, In: IEEE Signal Processing Magazine 29, Number 5, S. 128-132
- FOMUNUNG, I., WASHINGTON, S., GUENSLER, R. (1999): *A statistical model for estimating oxides of nitrogen emissions from light duty motor vehicles*, In: Transportation Research Part D, 333-352
- GEISTEFELDT, J. (2007): *Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit auf Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen*, In: Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 30
- HERMAN, R.; MONTROLL, E.W.; Potts, R.B.; Rothery, R.W. (1959): *Traffic dynamics: Analysis of stability in car following*, In: Operations Research 7, S. 86-106
- HIRSCHMANN et al. (2009): GAVe – Grazer adaptive Verkehrssteuerung, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie Österreich, Forschungsbericht
- HUNG, W.; TAM, K.; LEE, C.; CHAN, L.; CHEUNG, C. (2005): *Comparison of driving characteristics in cities of Pearl River Delta, China*, In: Atmospheric Environment 39, S. 615-625
- JUN, J., GUENSLER, R., Ogle, J. (2006): *Smoothing methods to minimize impact of Global Positioning System random error on travel Distance, speed, and acceleration profile estimates*, In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1972, S. 141-150.

- JONES, T.R., POTTS, R.B. (1962): *The Measurement of Acceleration Noise – A Traffic Parameter*, In: Operations Research 10, no. 6, S.745-763
- KALMAN, R.E. (1960): *A new approach to linear filtering and prediction problems*, In: Transaction of the American Society of Mechanical Engineers. Journal of Basic Engineering, S. 35-45
- KERNER, B.S. (2004): *Three-phase traffic theory and highway capacity*, In: Physica A 333, S. 379-440
- KENT, J.H.; ALLEN, G.H.; RULE, G. (1978): *A driving cycle for Sydney*, In: Transportation Research 12, S. 147-152
- KO, J., GUENSLER, R., HUNTER, M. (2010): *Analysis of effects of driver/vehicle characteristics on acceleration noise using GPS-equipped vehicles*, In: Transportation Research Part F 13, S. 21-31
- KOJIMA, Y., IWASE, T., MEGURO, J., TAKEYAMA, K., SUZUKI, N., TERAMOTO, E. (2012): *Development of a Novel Integrated Positioning System "PRECISE" for ADAS Applications*, In: 19<sup>th</sup> ITS World congress, Vienna, Austria
- KREISS, J.-P., NEUHAUS, G. (2006): *Einführung in die Zeitreihenanalyse*, Springer Verlag
- KRUSE, R.E., HULS, T.A. (1973): *Improved driving cycle for testing automotive exhaust emissions*. SAE Paper 780650
- KUHLER, M., KARSTENS, D. (1978): *Improved driving cycle for testing automotive exhaust emissions*, In: SAE Paper 780650
- LEUTZBACH, W. (1988): *Introduction to the Theory of Traffic Flow*, Springer Verlag
- MANSFELD, W. (2010): *Satellitenortung und Navigation- Grundlagen, Wirkungsweise und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme*, 3. überarbeitete und aktualisierte Auflage, Verlag Vieweg+Teubner
- OTTO, T. (2011): *Kooperative Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung an signalisierten Knotenpunkten*, Schriftenreihe Verkehr Heft 21, Kassel University Press
- REHBORN, H., KOLLER, M., KERNER, B.S. (2012): *Traffic Data Fusion of Vehicle Data to detect Spatiotemporal Congested Patterns*, In: 19<sup>th</sup> ITS World congress, Vienna, Austria
- RICHARDSON, A. J., Taylor, M. A. P. (1978): *Travel time variability on commuter journeys*, In: Journal of Advanced Transportation, 12 (1), 77-99
- SCHICK, P. (2003): *Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses*, In: Schriftenreihe Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart, Heft35
- SCHNABEL, W., LOHSE, D. (2011): *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung*, Kerschbaum Verlag GmbH, Bonn
- TREIBER, M., KESTING, A. (2010): *Verkehrsdynamik und -simulation*, Springer Verlag
- UNDERWOOD, R.T. (1968): *Acceleration noise and traffic congestion*" In: Traffic Engineering and Control 10(3), S. 120-123
- WANG, Q.; HUO, H.; HE, K.; YAO, Z.; ZHANG, Q. (2008): *Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in Chinese cities*, In: Transportation Research D 13, S. 289-297
- WARDROP, J.G. (1952): *Some theoretical aspects of road traffic research*, In: Proceedings of the Institute of Civil Engineers, London
- WEIJER, C.J.T. (1997): *Heavy-duty emission factors, development of representative driving cycles and prediction of emissions in real life*, TU Graz, Dissertation
- WELCH, G., BISHOP, G. (2001): *An Introduction to the Kalman Filter*, In: Siggraph 2001 Conference, Los Angeles, California

- WIEDEMANN, R. (1974): *Simulation des Verkehrsflusses*. In: Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 8, Universität (TH) Karlsruhe (seit 2009 KIT – Karlsruher Institut für Technologie).
- WINZER, T. (1981): *Beschleunigungsrauschen und Geschwindigkeitsgradient als Qualitätsmaßstab des Verkehrsablaufs*, In: Straßenverkehrstechnik 25, S. 154-158
- WITTE, T.H., WILSON, A.M. (2005): *Accuracy of WAAS-enabled GPS for the determination of position and speed over ground*, In: Journal of Biomechanics 38, S. 1717-1722
- WITTE, T.H., WILSON, A.M. (2004): *Accuracy of non-differential GPS for the determination of speed over ground*, In: Journal of Biomechanics 37, S. 1891-1898

Aus dem Internet:

- WALDEER T. (1999): *Diskussion von Verkehrsgrößen anhand von Messungen*, Technischer Report 2/1999, Fachbereich Transport- und Verkehrswesen, Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, Verfügbar unter [http://public.rz.fh-wolfenbuettel.de/~waldeer/report2\\_99.pdf](http://public.rz.fh-wolfenbuettel.de/~waldeer/report2_99.pdf) [Datum des Zugriffs: 12.04.2012]
- Digitaler Atlas Steiermark (2012): Orthofotos, Verfügbar unter <http://www.gis.steiermark.at/> [Datum des Zugriffs: 25.02.2013]

Software:

- VBOXTools (2003), Vers. 2.10.1. Computer Software. Racelogic
- R (2013), Vers. 3.0.0 (64-bit). Computer Software: The R Foundation for Statistical Computing
- VISSIM (2012), Ver. 5.40 (32-bit). Computer Software. PTV AG
- PTV VISION (2012): Benutzerhandbuch VISSIM 5.40



## ANHANG

<b>Anhang A: Testfeld und Realdatenauswertung .....</b>	<b>133</b>
<b>Anhang B: Kenngrößenänderung Messung 1 – Messung 2.....</b>	<b>143</b>
<b>Anhang C: Simulation .....</b>	<b>147</b>
<b>Anhang D: Digitale Medien .....</b>	<b>157</b>

## Anhang A: Testfeld und Realdatenauswertung

### Testfeld: Untersuchungsgebiete

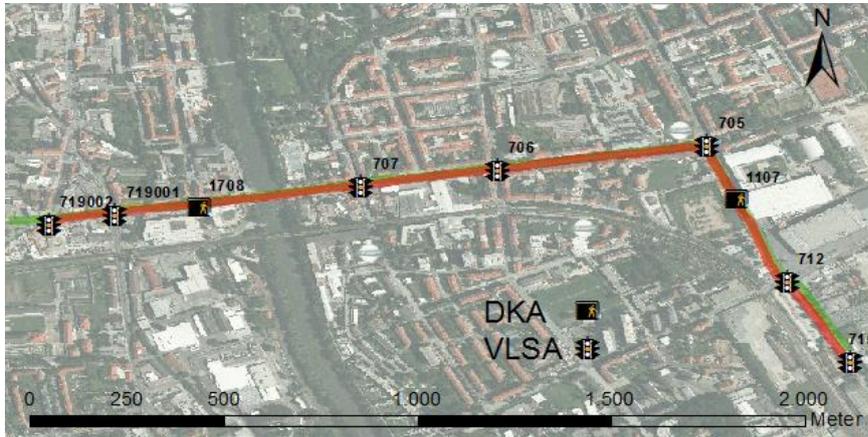


Abbildung 98: Untersuchungsgebiet Schönaugürtel (SG\_70)

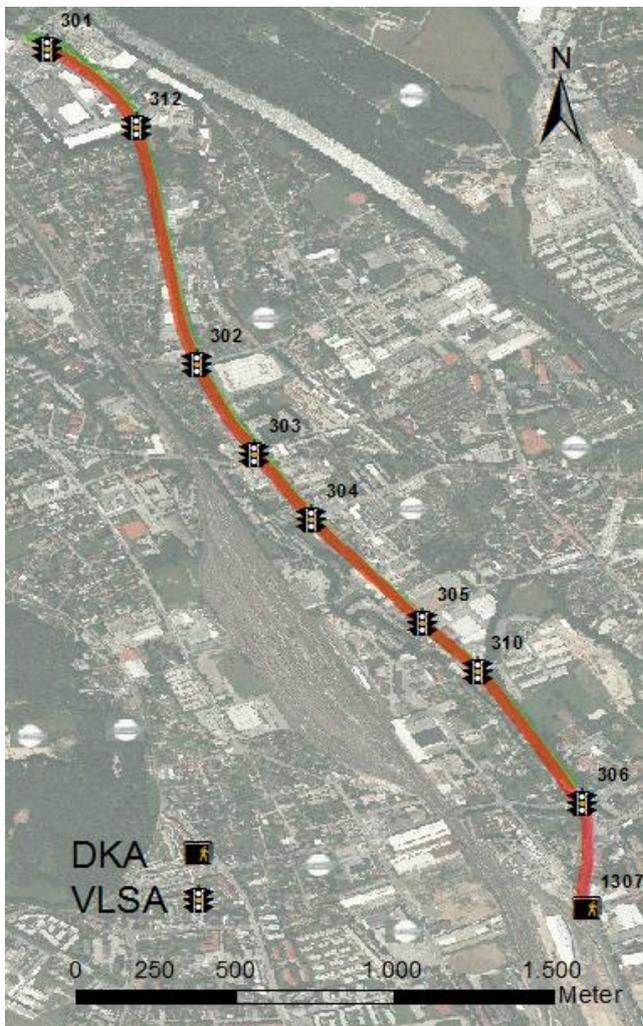


Abbildung 99: Untersuchungsgebiet Wiener Straße (SG\_30)

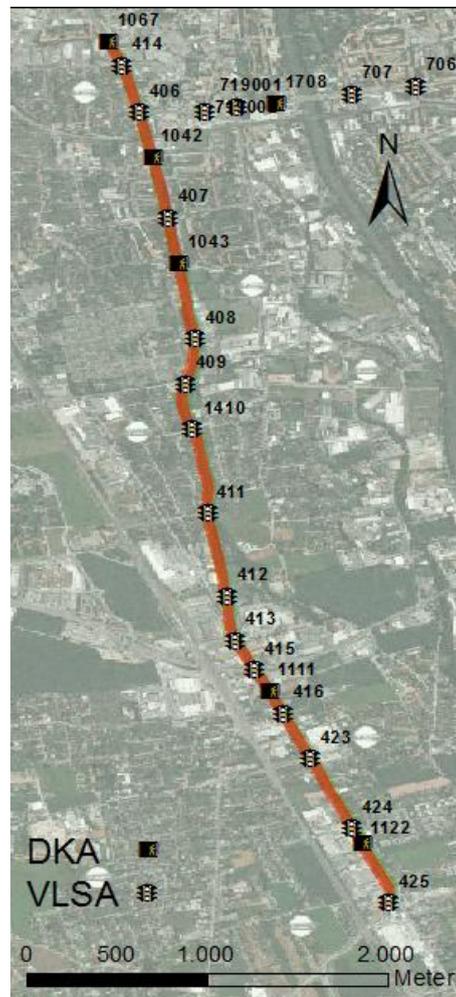


Abbildung 100: Untersuchungsgebiet Triesterstraße (SG\_41)

## Spezifikation GPS-Messgerät VideoVBOX (Hersteller: Racelogic)



## GPS Specifications

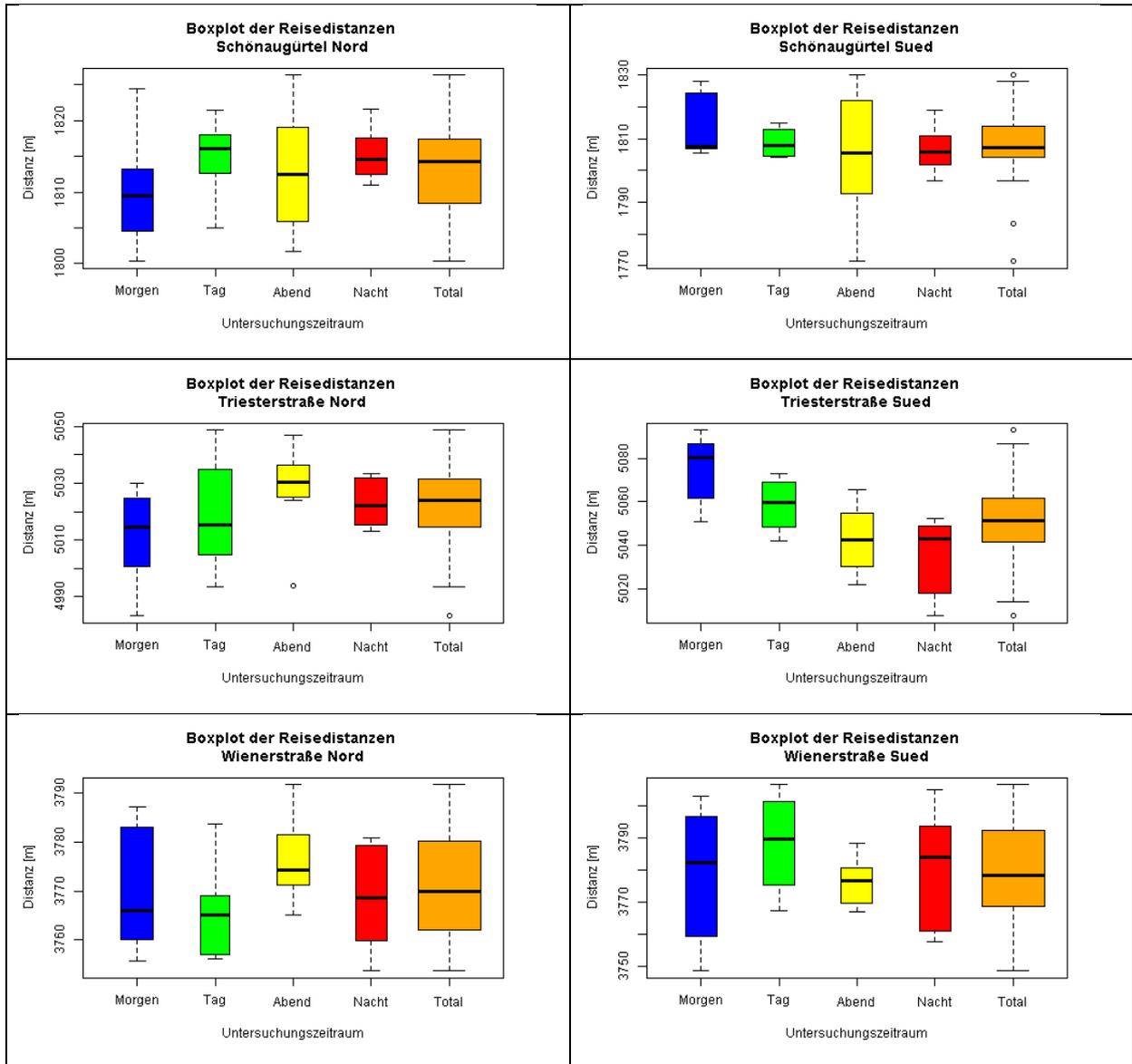
10Hz system (All data recorded at 10Hz)

Velocity		Distance	
Accuracy	0.2 Km/h (averaged) over 4 samples	Accuracy	0.05 % (<50cm per Km)
Units	Km/h or Mph	Units	Metres / Feet
Update rate	10 Hz	Resolution	1 cm
Maximum velocity	1600 km/h		
Minimum velocity	0.1 Km/h		
Resolution	0.01 Km/h		
Latency	<160ms		

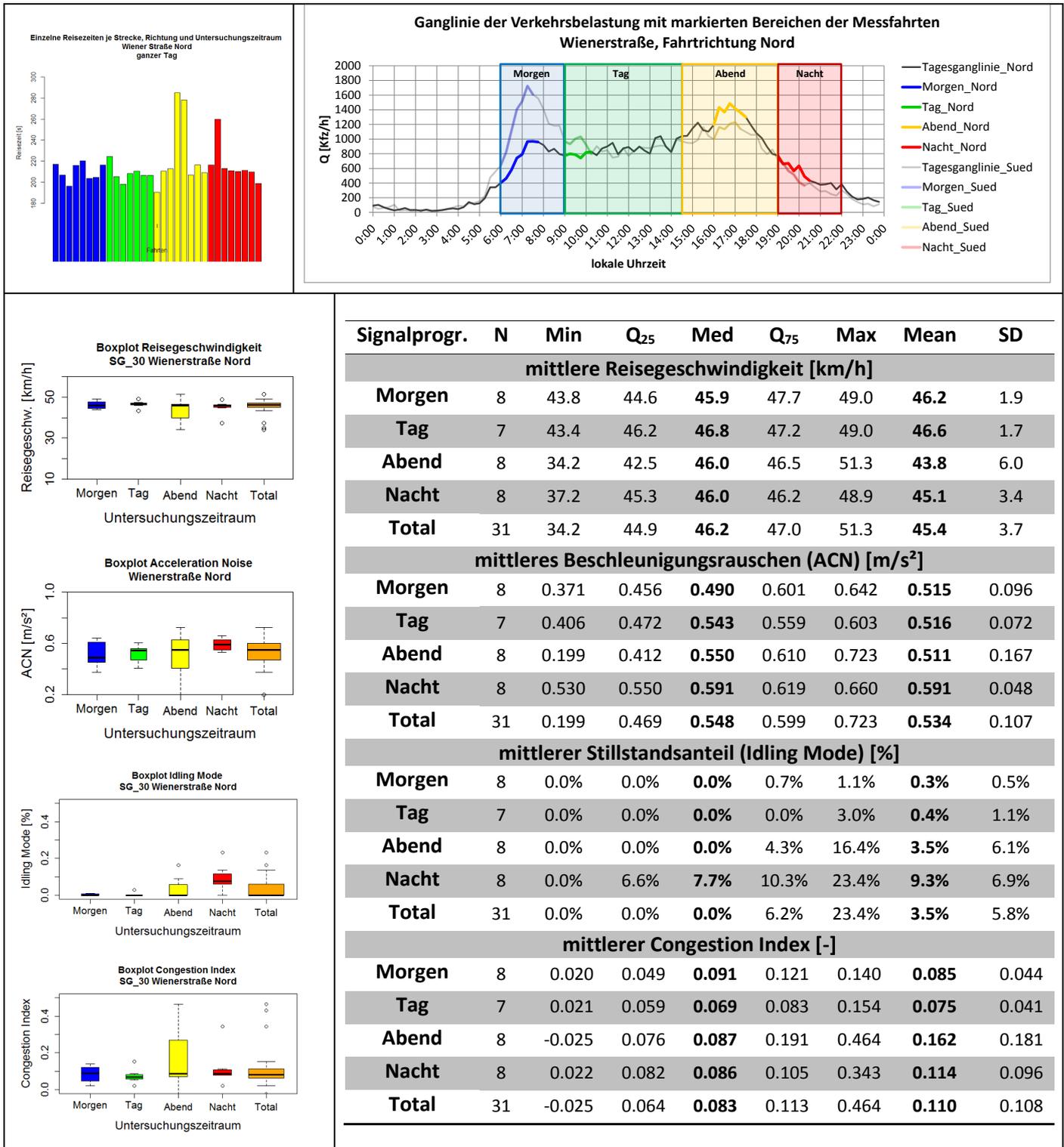
Position		Acceleration	
2D Position	±5m 95% CEP *	Accuracy	1 %
Height	10 Metres 95% CEP *	Maximum	4 G
		Resolution	0.01 G

Heading		Lap Timing (OLED/ Circuit Tools)	
Resolution	0.01°	Resolution	0.01 s
Accuracy	0.2°	Accuracy	0.01 s **

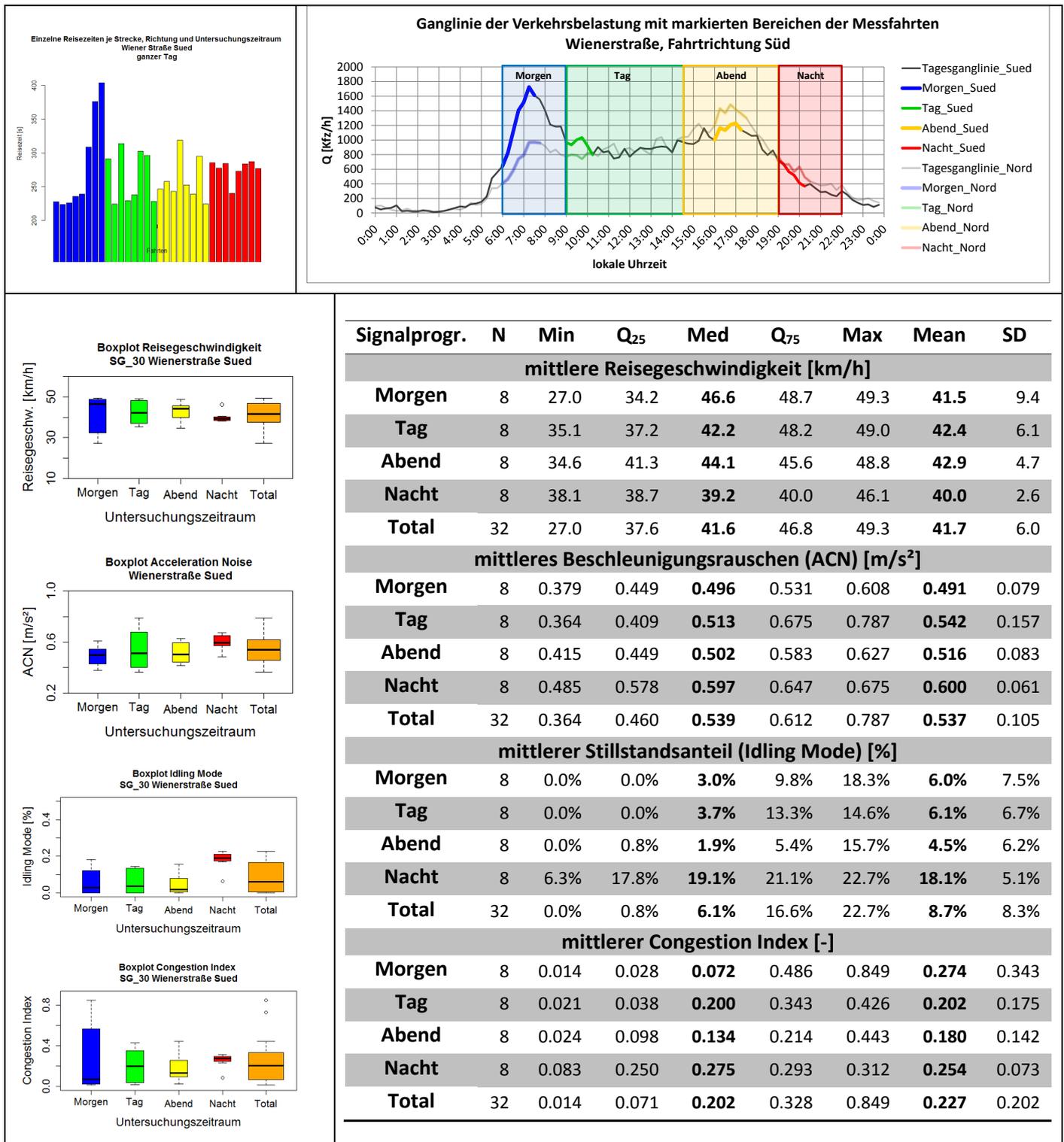
## Boxplots Reisedistanzen (Messung 1)



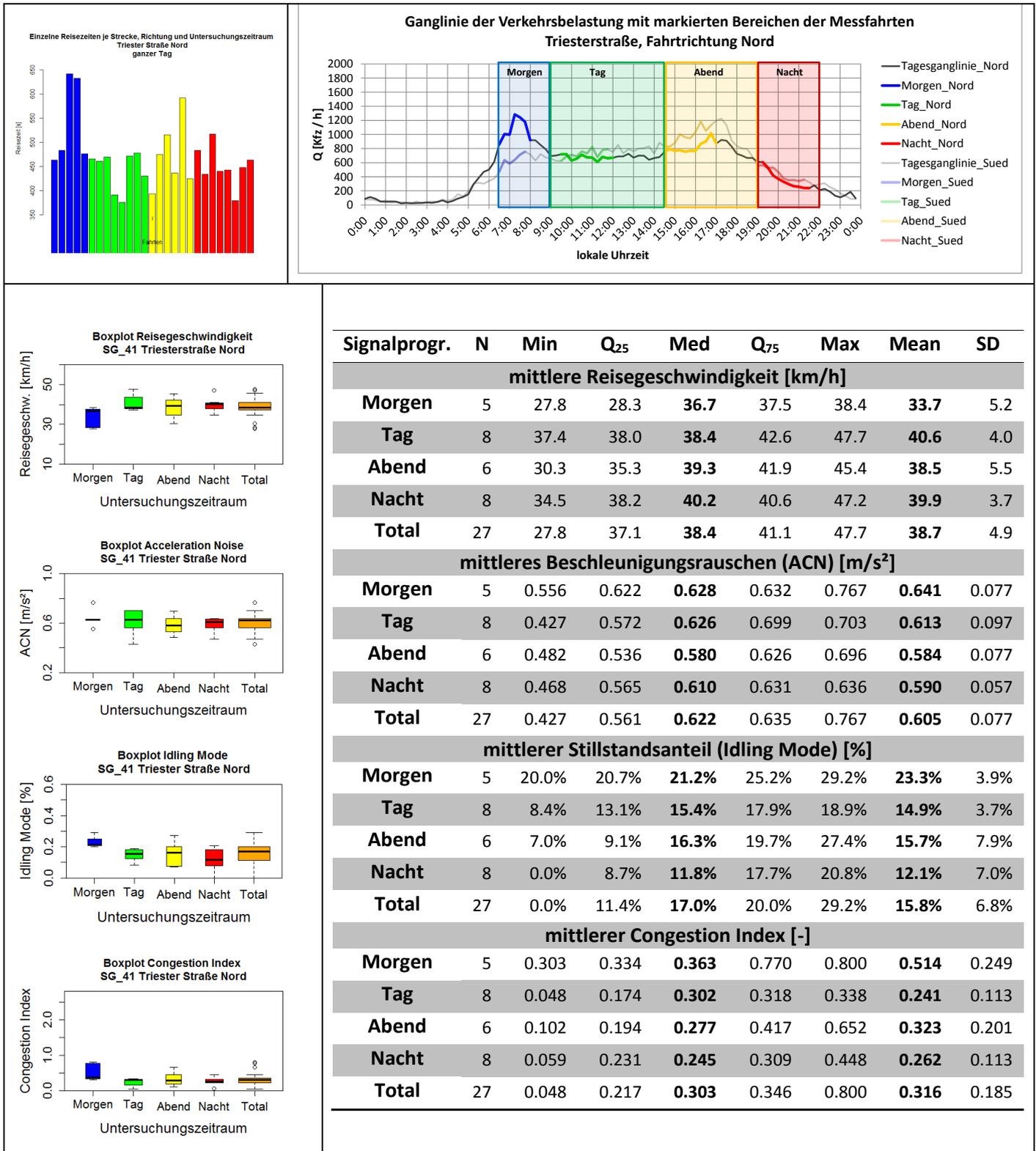
## Datenblatt Realdaten: Wiener Straße, Fahrtrichtung Nord



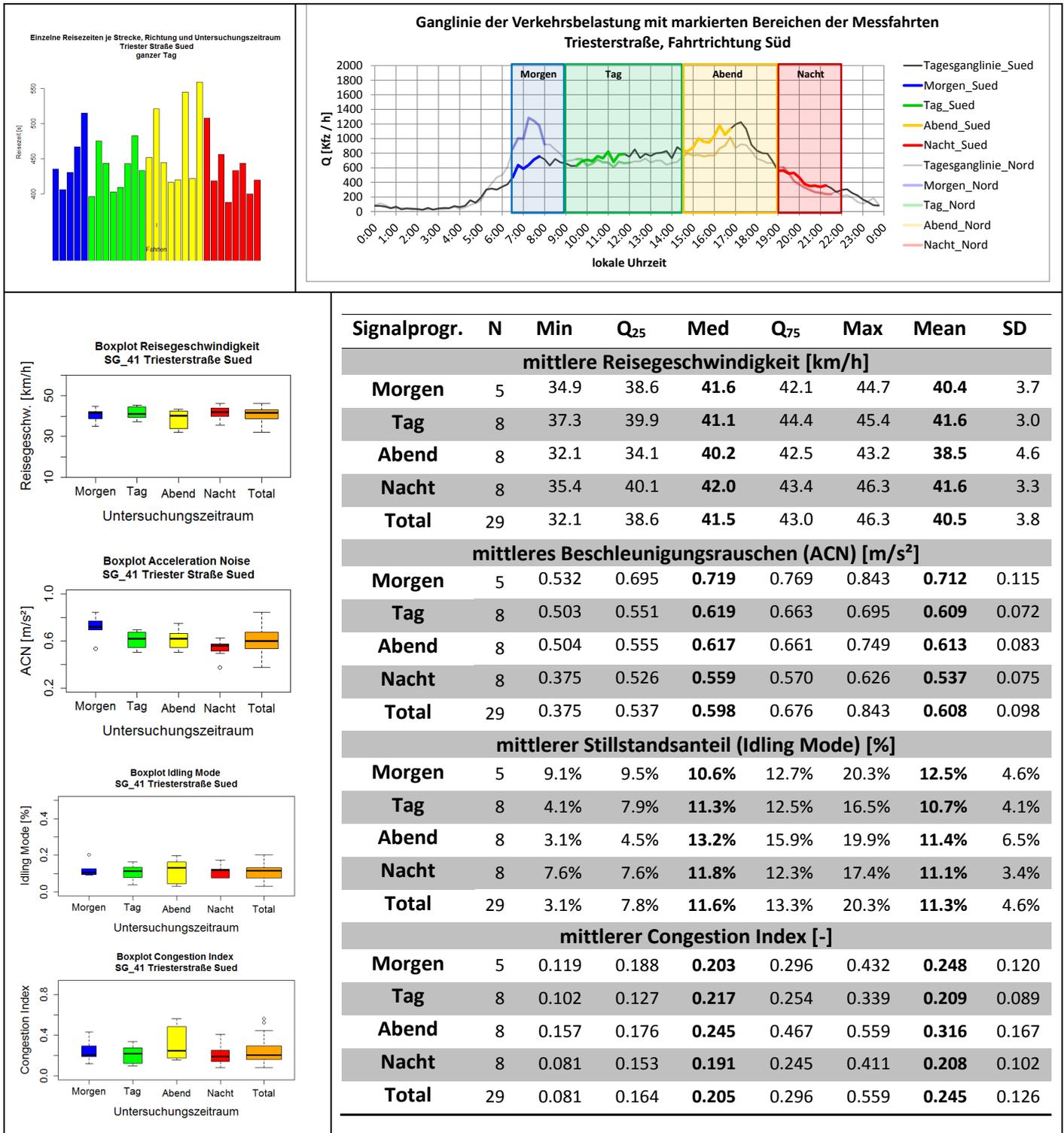
## Datenblatt Realdaten: Wiener Straße, Fahrtrichtung Süd



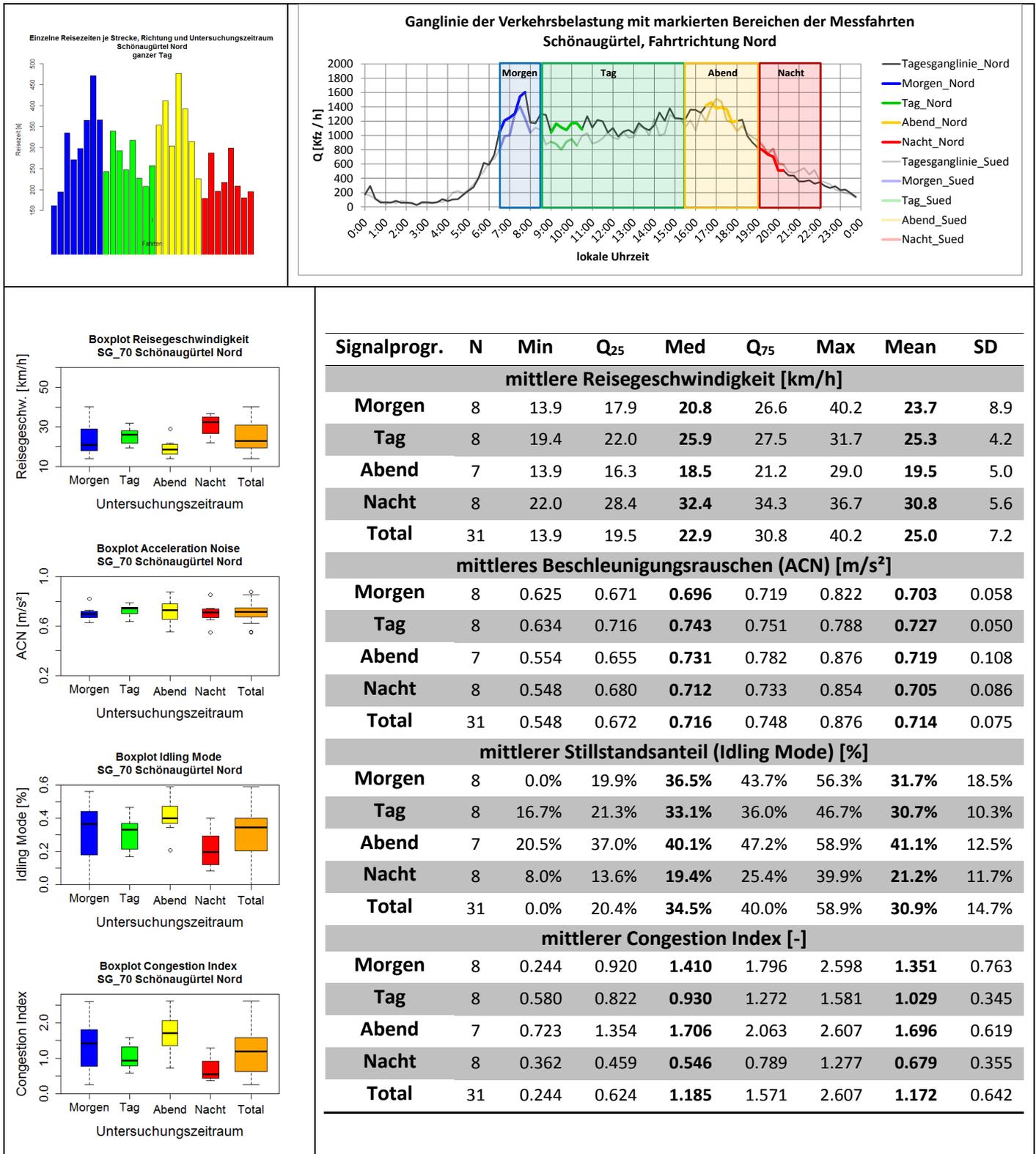
## Datenblatt Realdaten: Triester Straße, Fahrtrichtung Nord



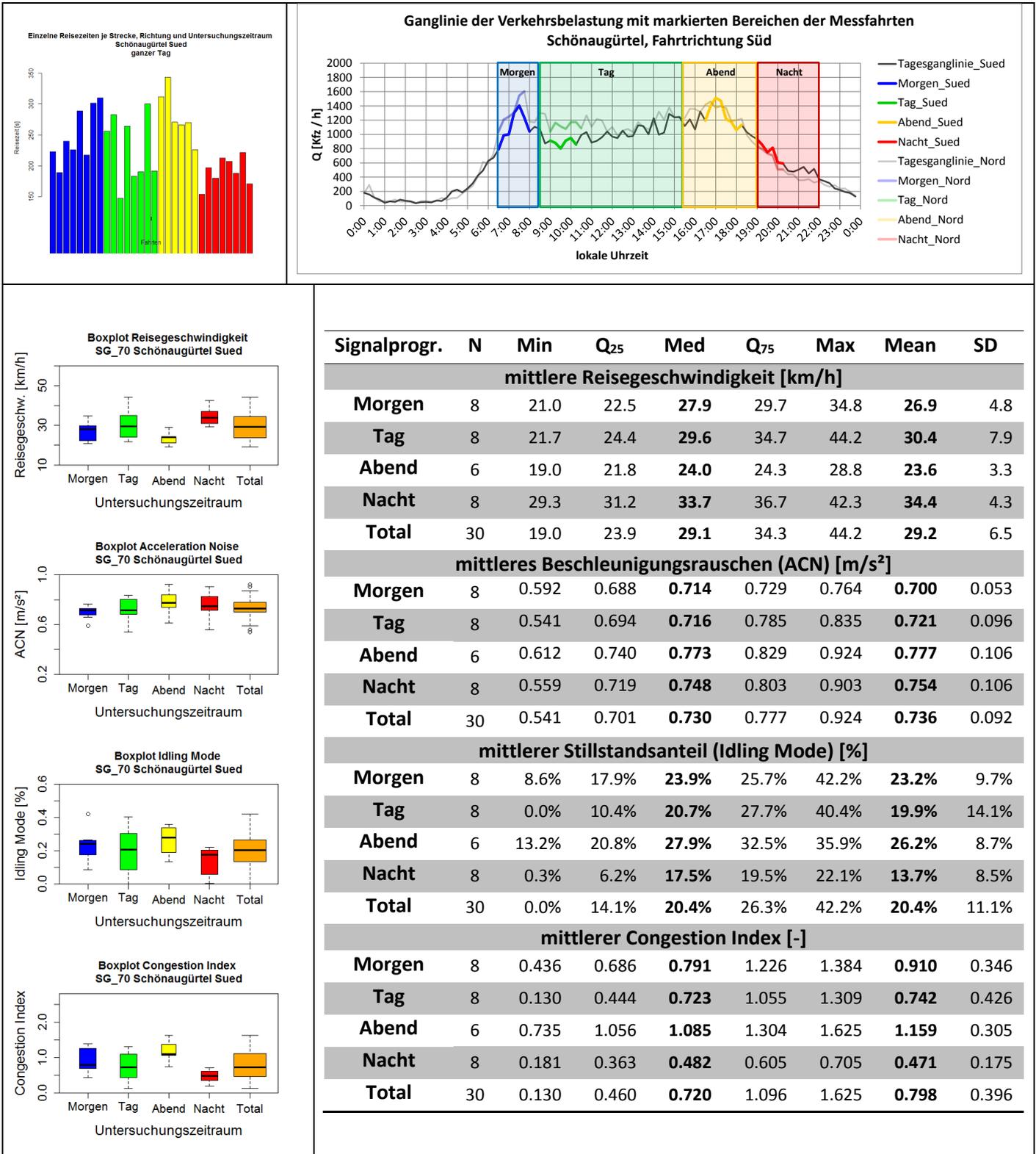
## Datenblatt Realdaten: Triester Straße, Fahrtrichtung Süd



### Datenblatt Realdaten: Schönaugürtel, Fahrtrichtung Nord



Datenblatt Realdaten: Schönaugürtel, Fahrtrichtung Süd



## Anhang B: Kenngrößenänderung Messung 1 – Messung 2

### Header

Header	Bedeutung
<b>parameter</b>	Kenngröße [Einheit]
<b>mean_1</b>	Messreihe 1: arithm. Mittel der Kenngrößen
<b>sd_1</b>	Messreihe 1: arithm. Mittel der Standardabw. der Reisegeschwindigkeiten
<b>mean_2</b>	Messreihe 2: arithm. Mittel der Kenngrößen
<b>sd_2</b>	Messreihe 2: arithm. Mittel der Standardabw. der Reisegeschwindigkeiten
<b>mean_2-1</b>	Absolute Differenz der Mittelwerte der Kenngrößen: Messreihe 2 – Messreihe 1
<b>(mean_2-1)/1</b>	relative Veränderung von Messreihe 2 zu Messreihe 1 [%]

### Kenngrößen

Kenngrößen	Bedeutung
<b>v mean [m/s]</b>	Mittlere Reisegeschwindigkeit
<b>v sd [m/s]</b>	Standardabweichung der mittleren Reisegeschwindigkeit
<b>a_ACN [m/s<sup>2</sup>]</b>	Beschleunigungsrauschen
<b>a_MVG [m/s<sup>2</sup>]</b>	Mean Velocity Gradient
<b>a_pos_SW_ANT [%]</b>	Anteil der Zeitschritte mit positiver Beschleunigung ( $a > 0,1 \text{ m/s}^2$ )
<b>a_neg_SW_ANT [%]</b>	Anteil der Zeitschritte mit negativer Beschleunigung ( $a < -0,1 \text{ m/s}^2$ )
<b>v_still_SW_ANT [%]</b>	Stillstandsanteil ( $v < 3 \text{ km/h}$ , )
<b>v_cruis_SW_ANT [%]</b>	Cruising-Anteil ( $v > 5 \text{ km/h}$ ; $-0,1 \text{ m/s}^2 < a < 0,1 \text{ m/s}^2$ )
<b>v_creep_SW_ANT [%]</b>	Creeping-Anteil ( $v < 5 \text{ km/h}$ ; $a >  0,1  \text{ m/s}^2$ )
<b>Stops</b>	Anzahl der Halte ( $v < 3 \text{ km/h}$ , Dauer $> 2$ Sekunden)

### Kenngrößenveränderung Wiener Straße, Fahrtrichtung Nord: SP Morgen

parameter	mean_1	sd_1	mean_2	sd_2	mean_2-1	(mean_2-1)/1
v mean [m/s]	12.82	0.53	12.84	0.37	0.02	0.2%
v sd [m/s]	2.79	0.90	4.18	0.67	1.39	49.9%
a_ACN [m/s <sup>2</sup> ]	0.515	0.096	0.561	0.033	0.045	8.8%
a_MVG [m/s <sup>2</sup> ]	0.040	0.009	0.044	0.003	0.003	8.1%
a_pos_SW_ANT [%]	35.42%	2.44%	33.99%	2.60%	-0.014	-4.0%
a_neg_SW_ANT [%]	39.49%	2.77%	37.42%	2.96%	-0.021	-5.2%
v_still_SW_ANT [%]	0.32%	0.47%	5.57%	2.41%	0.052	1627.5%
v_cruis_SW_ANT [%]	25.03%	3.00%	24.27%	3.60%	-0.008	-3.0%
v_creep_SW_ANT [%]	0.001	0.001	0.043	0.023	0.042	6694.0%
Stops	0.25	0.46	1.00	0.00	0.75	300.0%

## Kenngrößenveränderung Wiener Straße, Fahrtrichtung Nord: SP Tag

parameter	mean_1	sd_1	mean_2	sd_2	mean_2-1	(mean_2-1)/1
v mean [m/s]	12.94	0.47	13.82	1.19	0.88	6.8%
v sd [m/s]	2.85	0.88	2.37	1.21	-0.49	-17.0%
a_ACN [m/s <sup>2</sup> ]	0.516	0.072	0.444	0.109	-0.072	-14.0%
a_MVG [m/s <sup>2</sup> ]	0.040	0.006	0.033	0.012	-0.007	-17.5%
a_pos_SW_ANT [%]	36.76%	4.05%	33.78%	4.51%	-0.030	-8.1%
a_neg_SW_ANT [%]	39.17%	1.70%	36.65%	5.12%	-0.025	-6.4%
v_still_SW_ANT [%]	0.42%	1.12%	1.48%	4.91%	0.011	250.9%
v_cruis_SW_ANT [%]	23.88%	4.13%	28.15%	8.46%	0.043	17.9%
v_creep_SW_ANT [%]	0.002	0.005	0.014	0.047	0.012	609.9%
Stops	0.14	0.38	0.09	0.30	-0.05	-36.4%

## Kenngrößenveränderung Wiener Straße, Fahrtrichtung Nord: SP Abend

parameter	mean_1	sd_1	mean_2	sd_2	mean_2-1	(mean_2-1)/1
v mean [m/s]	12.18	1.67	10.05	3.06	-2.13	-17.5%
v sd [m/s]	3.17	1.36	4.92	1.42	1.75	55.4%
a_ACN [m/s <sup>2</sup> ]	0.511	0.167	0.579	0.106	0.068	13.3%
a_MVG [m/s <sup>2</sup> ]	0.044	0.020	0.066	0.031	0.021	48.5%
a_pos_SW_ANT [%]	35.24%	4.96%	31.11%	2.67%	-0.041	-11.7%
a_neg_SW_ANT [%]	36.98%	4.33%	35.94%	3.43%	-0.010	-2.8%
v_still_SW_ANT [%]	3.51%	6.08%	17.36%	11.59%	0.139	394.6%
v_cruis_SW_ANT [%]	25.07%	9.11%	17.75%	6.33%	-0.073	-29.2%
v_creep_SW_ANT [%]	0.027	0.049	0.152	0.098	0.125	460.7%
Stops	0.88	1.36	2.90	2.96	2.03	231.4%

## Kenngrößenveränderung Wiener Straße, Fahrtrichtung Nord: SP Nacht

parameter	mean_1	sd_1	mean_2	sd_2	mean_2-1	(mean_2-1)/1
v mean [m/s]	12.53	0.95	14.47	1.39	1.94	15.5%
v sd [m/s]	4.76	0.87	2.33	2.08	-2.42	-50.9%
a_ACN [m/s <sup>2</sup> ]	0.591	0.048	0.364	0.169	-0.227	-38.4%
a_MVG [m/s <sup>2</sup> ]	0.048	0.007	0.026	0.016	-0.021	-44.5%
a_pos_SW_ANT [%]	29.18%	2.43%	31.27%	2.73%	0.021	7.2%
a_neg_SW_ANT [%]	31.00%	5.49%	33.60%	4.52%	0.026	8.4%
v_still_SW_ANT [%]	9.29%	6.87%	3.12%	6.28%	-0.062	-66.3%
v_cruis_SW_ANT [%]	31.83%	4.12%	32.30%	7.35%	0.005	1.5%
v_creep_SW_ANT [%]	0.080	0.067	0.028	0.057	-0.052	-64.6%
Stops	1.00	0.53	0.22	0.44	-0.78	-77.8%

## Kenngrößenveränderung Wiener Straße, Fahrtrichtung Süd: SP Morgen

parameter	mean_1	sd_1	mean_2	sd_2	mean_2-1	(mean_2-1)/1
v mean [m/s]	11.53	2.61	10.33	3.18	-1.20	-10.4%
v sd [m/s]	3.50	1.23	4.29	1.53	0.78	22.4%
a_ACN [m/s <sup>2</sup> ]	0.491	0.079	0.630	0.121	0.139	28.4%
a_MVG [m/s <sup>2</sup> ]	0.046	0.019	0.067	0.022	0.020	44.2%
a_pos_SW_ANT [%]	34.70%	2.52%	35.80%	3.72%	0.011	3.2%
a_neg_SW_ANT [%]	35.75%	3.44%	38.99%	2.39%	0.032	9.1%
v_still_SW_ANT [%]	6.04%	7.52%	9.84%	8.28%	0.038	62.9%
v_cruis_SW_ANT [%]	24.38%	7.83%	16.61%	5.00%	-0.078	-31.8%
v_creep_SW_ANT [%]	0.052	0.067	0.086	0.076	0.034	66.0%
Stops	1.13	1.36	1.80	1.55	0.68	60.0%

## Kenngrößenveränderung Wiener Straße, Fahrtrichtung Süd: SP Tag

parameter	mean_1	sd_1	mean_2	sd_2	mean_2-1	(mean_2-1)/1
v mean [m/s]	11.77	1.70	12.66	0.66	0.89	7.5%
v sd [m/s]	3.69	1.44	3.86	0.86	0.17	4.7%
a_ACN [m/s <sup>2</sup> ]	0.542	0.157	0.620	0.047	0.078	14.3%
a_MVG [m/s <sup>2</sup> ]	0.048	0.020	0.049	0.006	0.001	1.4%
a_pos_SW_ANT [%]	32.12%	2.73%	35.36%	2.68%	0.032	10.1%
a_neg_SW_ANT [%]	38.17%	3.27%	42.46%	2.46%	0.043	11.2%
v_still_SW_ANT [%]	6.12%	6.73%	4.28%	4.16%	-0.018	-30.1%
v_cruis_SW_ANT [%]	24.30%	6.33%	18.95%	3.27%	-0.054	-22.0%
v_creep_SW_ANT [%]	0.054	0.062	0.032	0.040	-0.022	-40.1%
Stops	0.88	0.83	0.91	0.30	0.03	3.9%

## Kenngrößenveränderung Wiener Straße, Fahrtrichtung Süd: SP Abend

parameter	mean_1	sd_1	mean_2	sd_2	mean_2-1	(mean_2-1)/1
v mean [m/s]	11.91	1.31	11.58	1.14	-0.33	-2.8%
v sd [m/s]	3.54	1.08	3.95	0.98	0.42	11.8%
a_ACN [m/s <sup>2</sup> ]	0.516	0.083	0.630	0.096	0.115	22.2%
a_MVG [m/s <sup>2</sup> ]	0.044	0.012	0.056	0.014	0.011	25.4%
a_pos_SW_ANT [%]	35.23%	1.95%	34.98%	3.38%	-0.003	-0.7%
a_neg_SW_ANT [%]	37.98%	3.19%	42.55%	3.61%	0.046	12.0%
v_still_SW_ANT [%]	4.55%	6.19%	4.97%	6.40%	0.004	9.2%
v_cruis_SW_ANT [%]	23.03%	4.18%	18.64%	2.80%	-0.044	-19.1%
v_creep_SW_ANT [%]	0.038	0.058	0.038	0.055	0.001	2.0%
Stops	1.00	0.93	1.30	1.34	0.30	30.0%

### Kenngrößenveränderung Wiener Straße, Fahrtrichtung Süd: SP Nacht

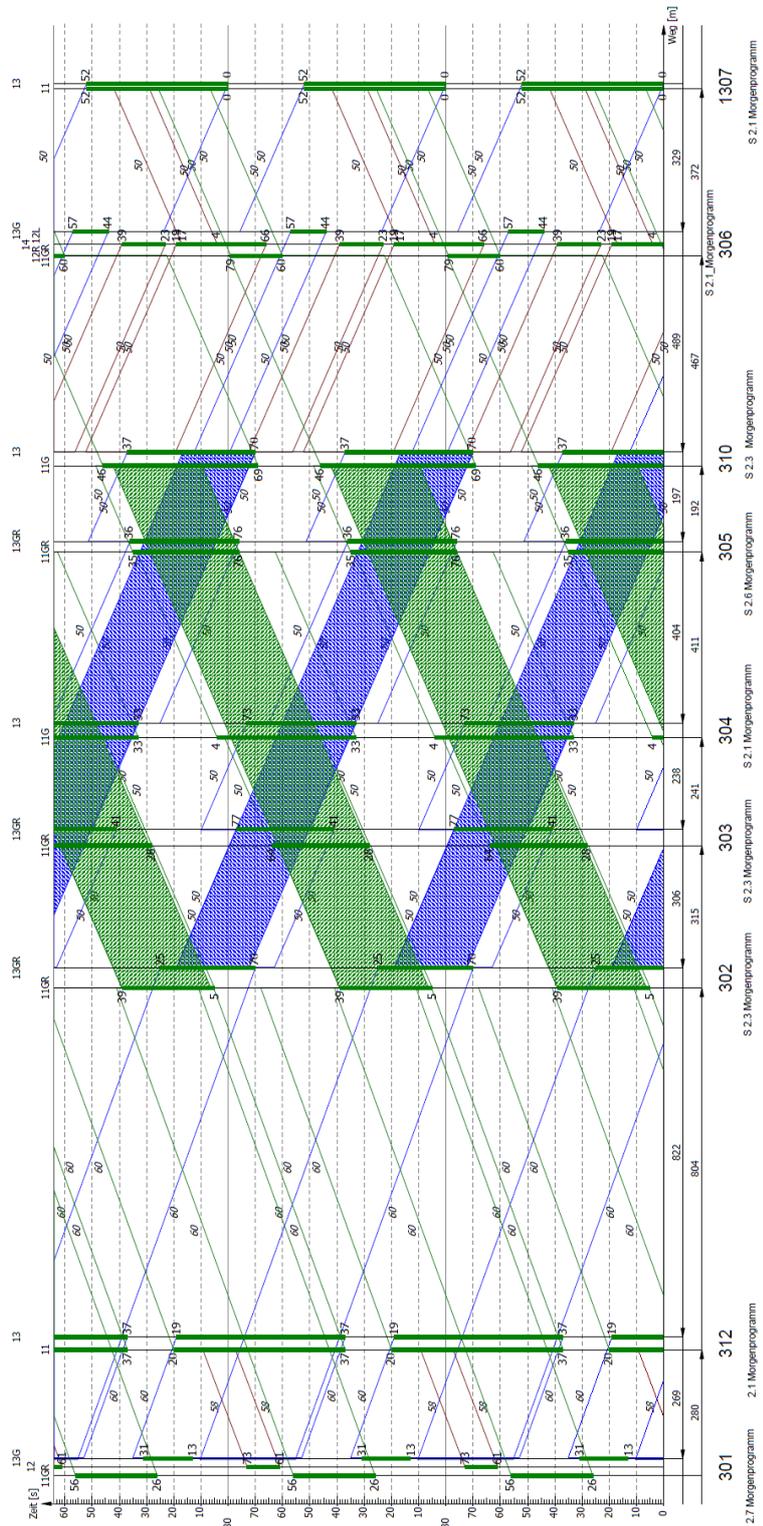
parameter	mean_1	sd_1	mean_2	sd_2	mean_2-1	(mean_2-1)/1
v_mean [m/s]	11.12	0.72	13.23	1.21	2.11	19.0%
v_sd [m/s]	5.81	0.72	3.72	0.87	-2.09	-36.0%
a_ACN [m/s <sup>2</sup> ]	0.600	0.061	0.546	0.113	-0.054	-9.1%
a_MVG [m/s <sup>2</sup> ]	0.054	0.008	0.042	0.012	-0.012	-22.4%
a_pos_SW_ANT [%]	26.90%	3.22%	32.57%	2.94%	0.057	21.1%
a_neg_SW_ANT [%]	30.99%	1.25%	40.42%	4.00%	0.094	30.4%
v_still_SW_ANT [%]	18.06%	5.13%	2.98%	3.26%	-0.151	-83.5%
v_cruis_SW_ANT [%]	25.83%	2.80%	25.12%	6.93%	-0.007	-2.8%
v_creep_SW_ANT [%]	0.163	0.048	0.019	0.024	-0.144	-88.4%
Stops	1.88	0.35	0.90	0.88	-0.98	-52.0%

### Veränderung der Verkehrsstärken

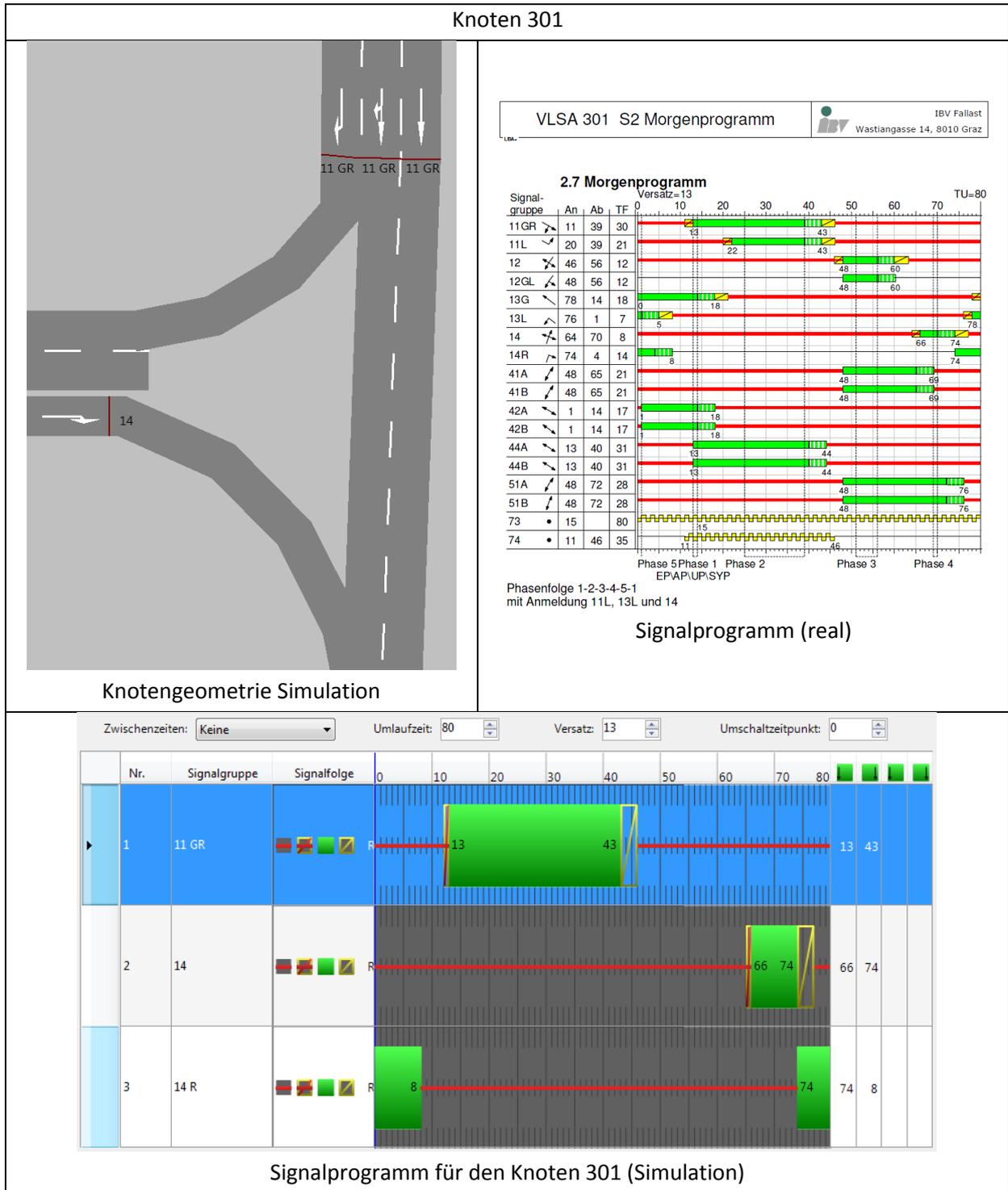
Signalpr.	Q_mean [Kfz/h]				Messung 2-1			
	Messung 1		Messung 2		Diff_Q Absolut		Diff_Q Relativ	
	R. Süd	R. Nord	R. Süd	R. Nord	R. Süd	R. Nord	R. Süd	R. Nord
Morgen	1262	702	1327	809	64	107	4.86%	13.17%
Tag	937	791	1016	820	78	29	7.73%	3.51%
Abend	1139	1366	1193	1295	54	-71	4.50%	-5.47%
Nacht	542	604	609	650	66	46	10.90%	7.03%
Total	970	866	1036	893	66	28	6.35%	3.08%

# Anhang C: Simulation

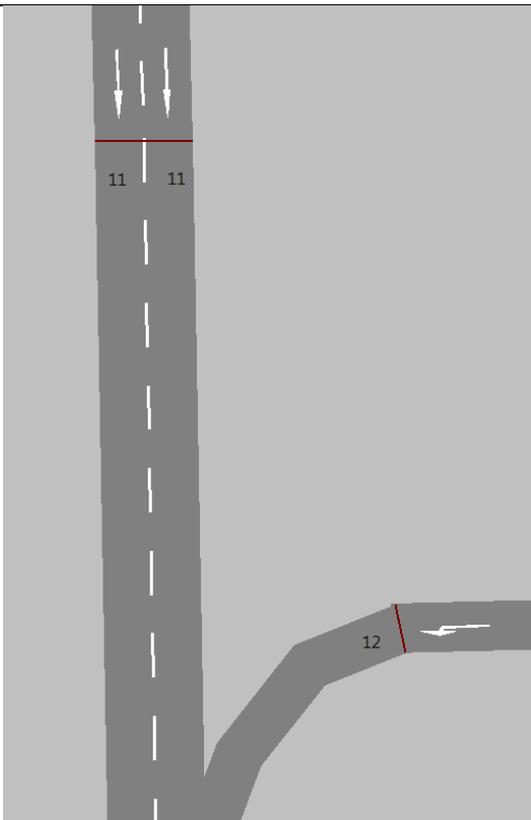
## Grünzeitenband Wiener Straße, Morgenprogramm



## Knotengeometrie, Belastungen und VLSA-Signalzeiten



Knoten 312

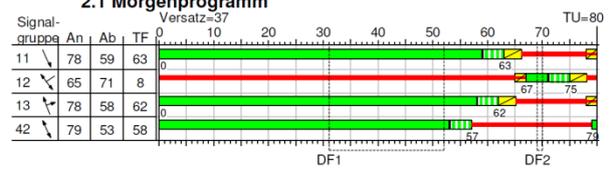


Knotengeometrie Simulation

VLSA 312 S2, S5, S8 mit  $t_u=80$

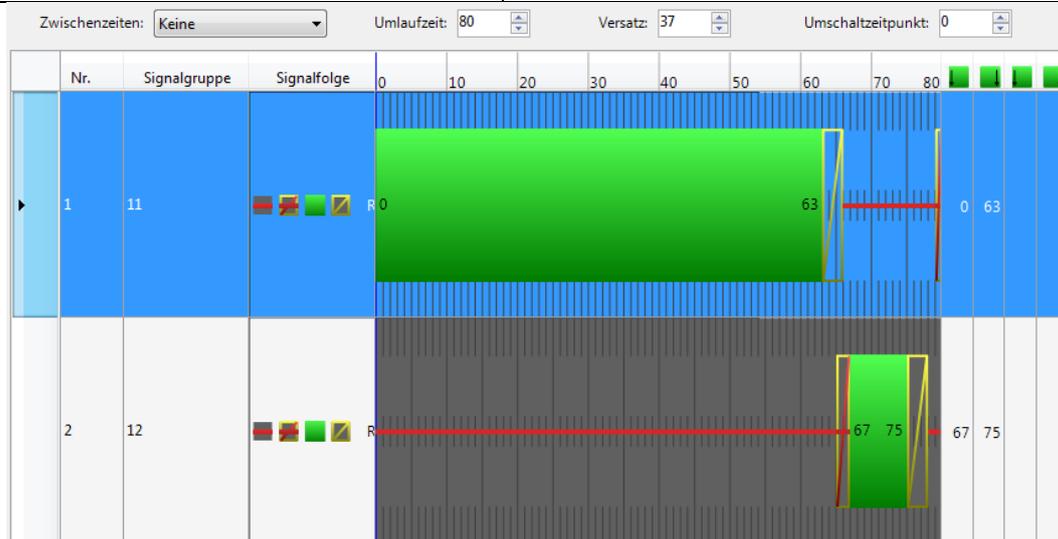
IBV Fallast  
Wastiangasse 14, 8010 Graz

2.1 Morgenprogramm



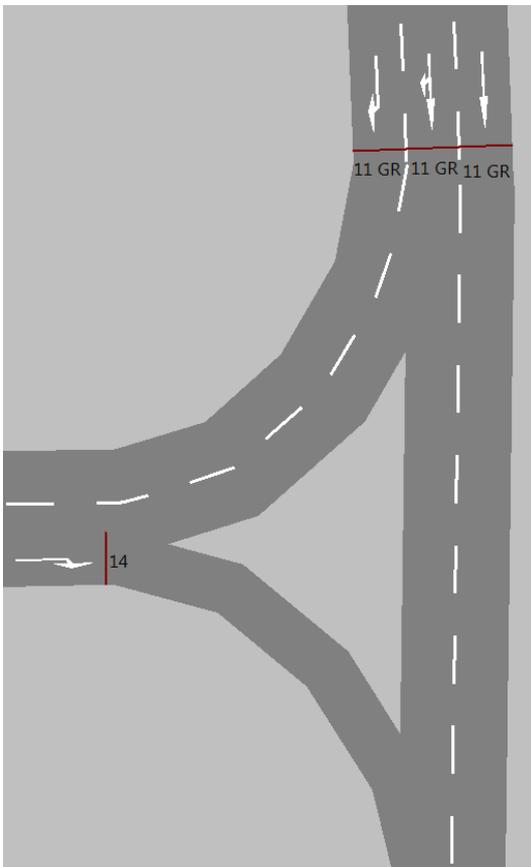
Phasenfolge: 1-2  
mit Anmeldung 12

Signalprogramm (real)



Signalprogramm für den Knoten 312 (Simulation)

Knoten 302

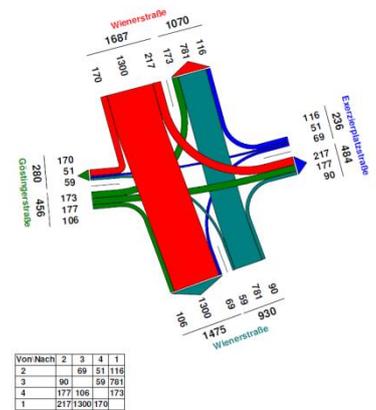


Knotengeometrie Simulation

VLSA 302 Strombelastungsplan

IBV Fallst  
Wastiangasse 14, 8010 Graz

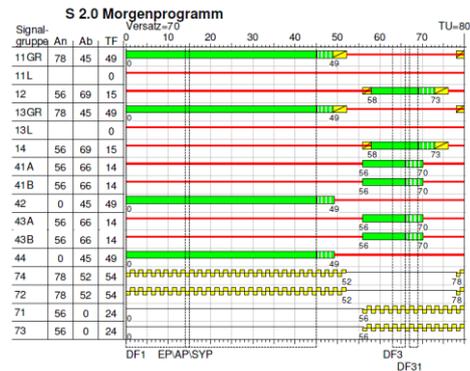
Morgenspitze 2011



Knotenströme (Eingangsgrößen)

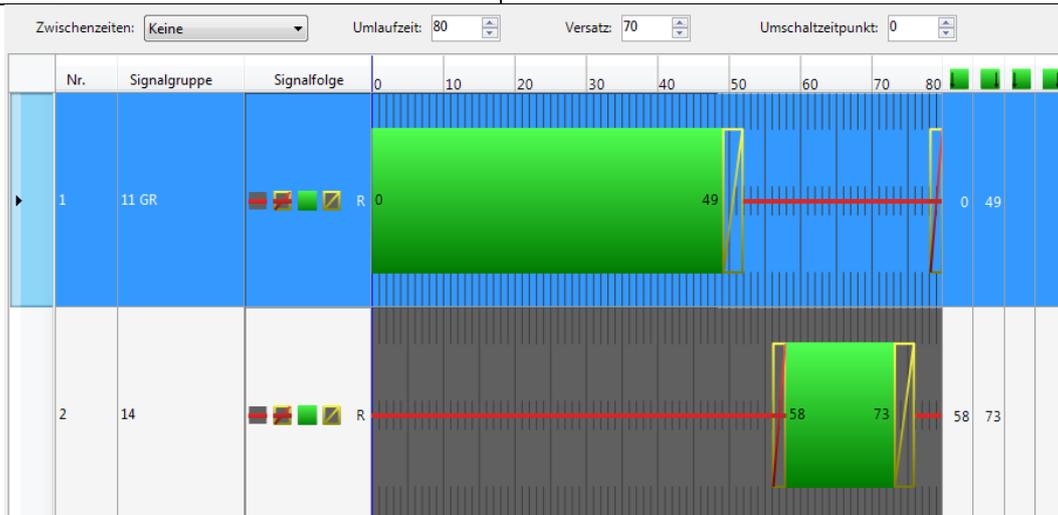
VLSA 302 S2 Morgenprogramm

IBV Fallst  
Wastiangasse 14, 8010 Graz



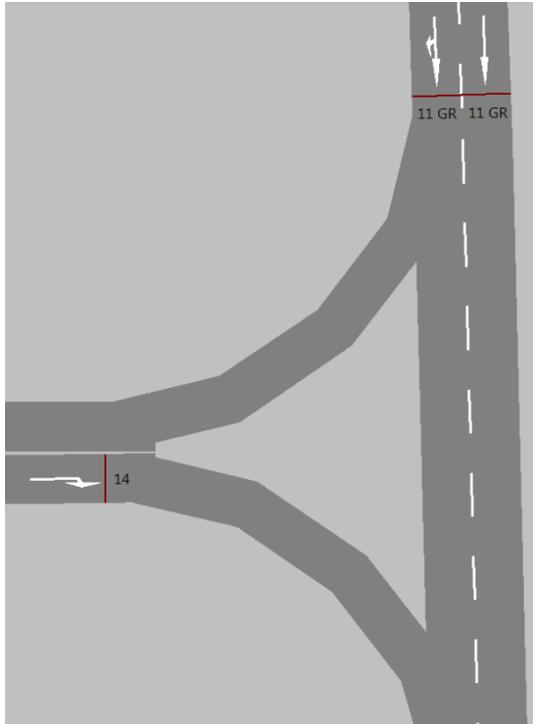
Phasenfolge 1 - 3 - 1  
ohne Anforderungen

Signalprogramm real



Festzeitprogramm für den Knoten 302 (Simulation)

### Knoten 303

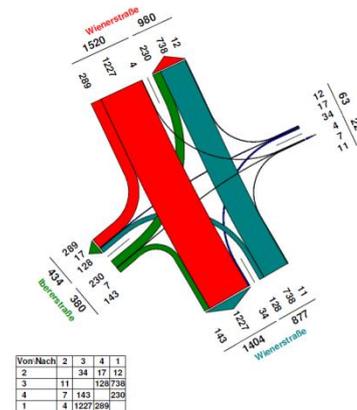


Knotengeometrie Simulation

#### VLSA 303 Strombelastungsplan

IBV Fallast  
Wastlangasse 14, 8010 Graz

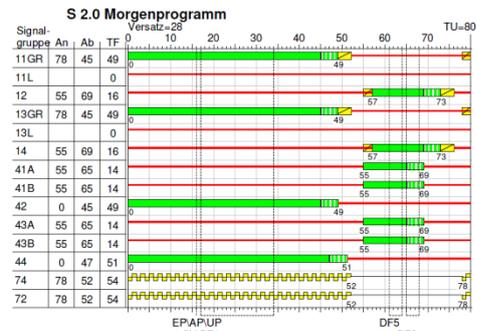
Morgenspitze 2011



Knotenströme (Eingangsgrößen)

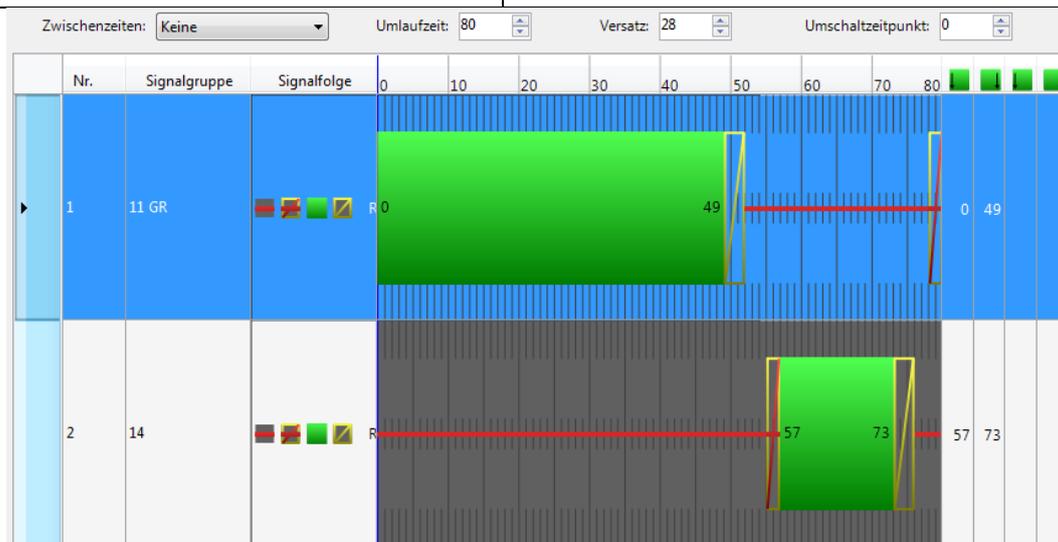
#### VLSA 303 S2 Morgenprogramm

IBV Fallast  
Wastlangasse 14, 8010 Graz



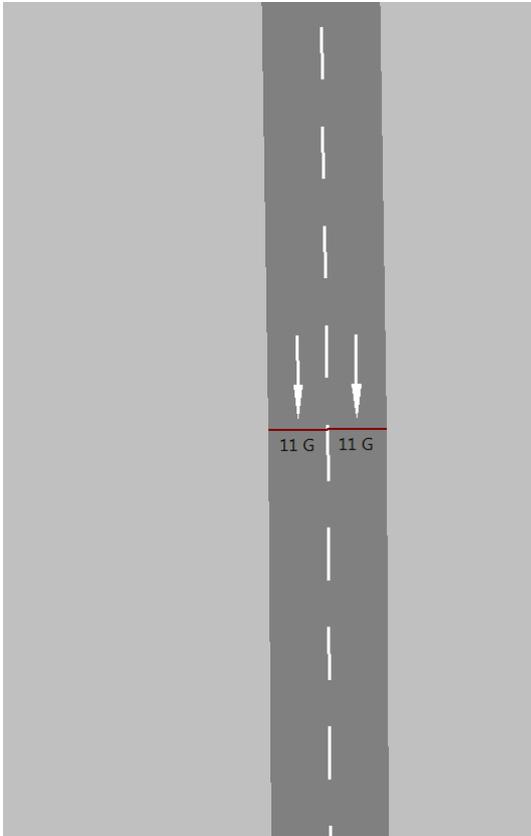
Grundstruktur  
Ohne Anmeldung 11L oder 13L

Signalprogramm (real)



Signalprogramm für den Knoten 303 (Simulation)

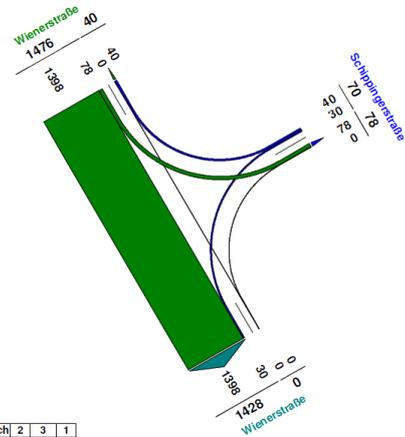
### Knoten 304



Knotengeometrie Simulation

VLSA 304 Strombelastungsplan IBV Fallast  
Wastiangasse 14, 8010 Graz

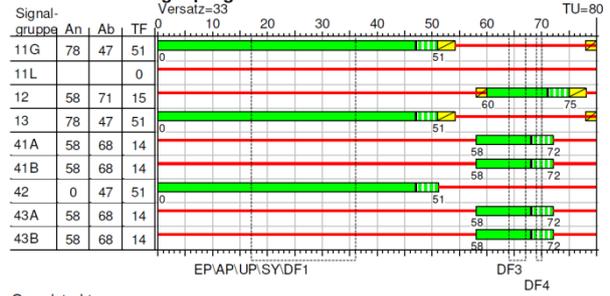
Morgenspitze 2011



Knotenströme (Eingangsgrößen)

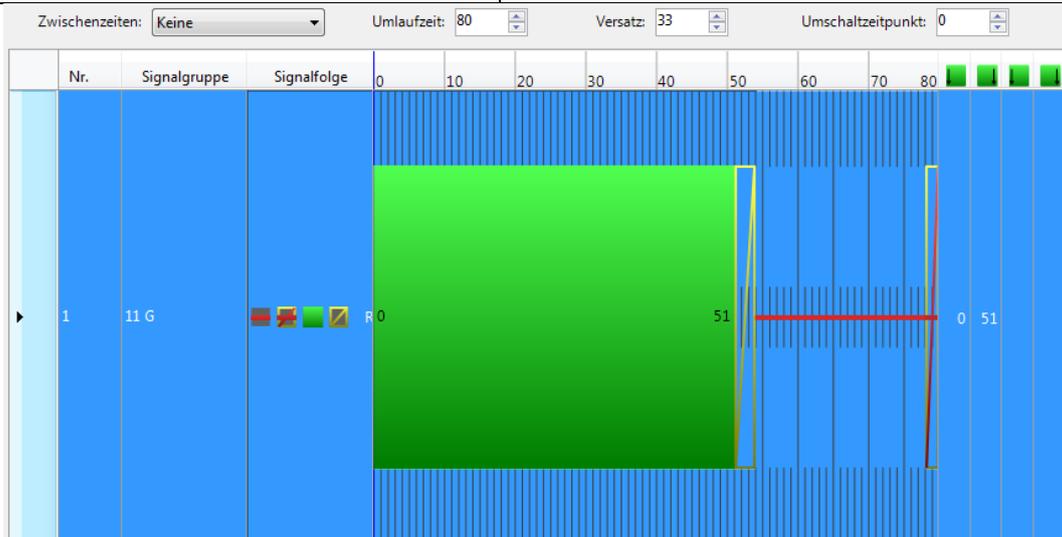
VLSA 304 S2 Morgenprogramm IBV Fallast  
Wastiangasse 14, 8010 Graz

S 2.0 Morgenprogramm



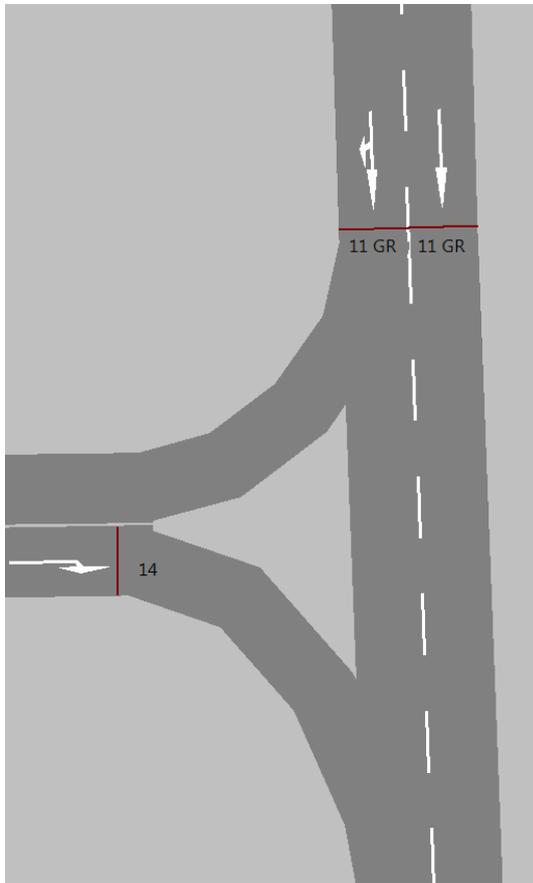
Grundstruktur  
Ohne Anmeldung 11L

Signalprogramm (real)



Signalprogramm für den Knoten 304 (Simulation)

Knoten 305

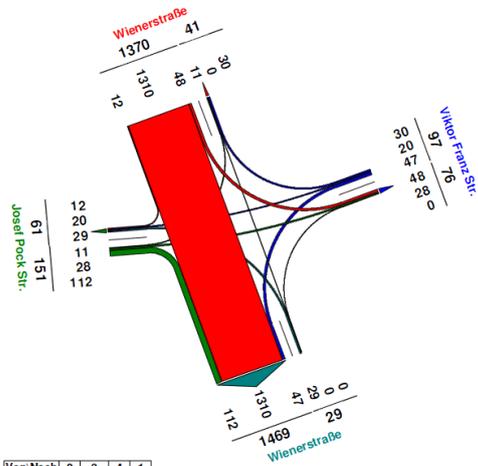


Knotengeometrie Simulation

VLSA 305 Strombelastungsplan

IBV Fallast  
Wastlangasse 14, 8010 Graz

Morgenspitze 2011



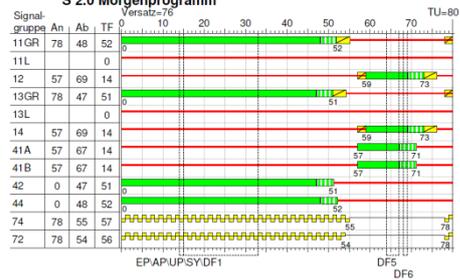
Von:Nach	2	3	4	1
2		47	20	30
3	0		29	0
4	28	112		11
1	48	1310	12	

Knotenströme (Eingangsgrößen)

VLSA 305 S2 Morgenprogramm

IBV Fallast  
Wastlangasse 14, 8010 Graz

S 2.0 Morgenprogramm



Grundstruktur  
Ohne Anmeldung 11L oder 13L

Signalprogramm (real)

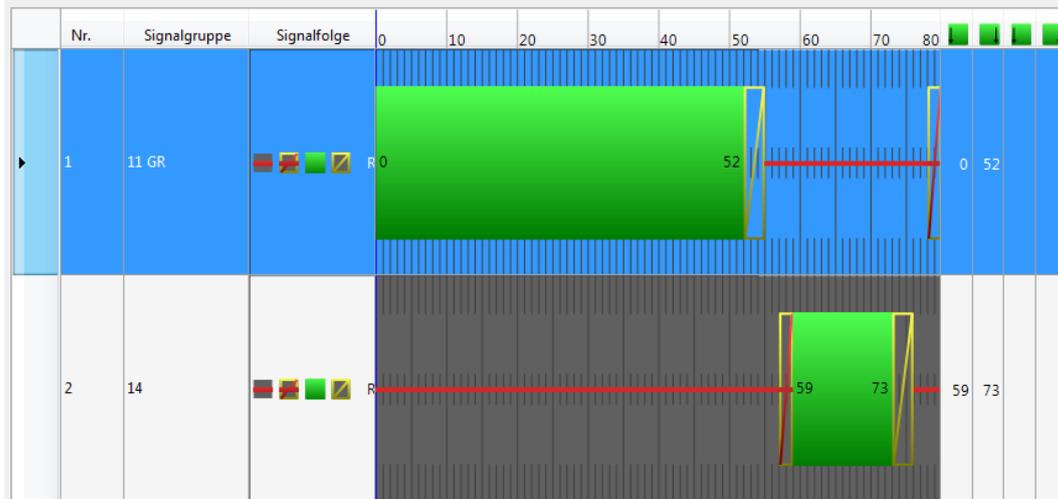
Name: S 2.0 Morgenprogramm

Zwischenzeiten: Keine

Umlaufzeit: 80

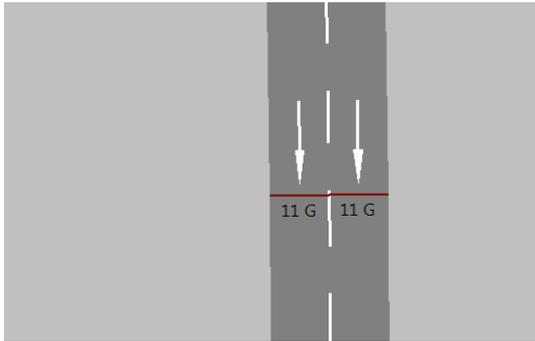
Versatz: 76

Umschaltzeitpunkt: 0



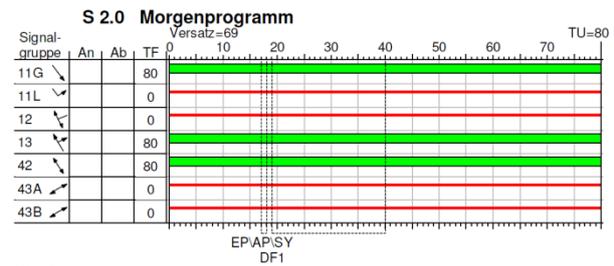
Signalprogramm für den Knoten 305 (Simulation)

### Knoten 310



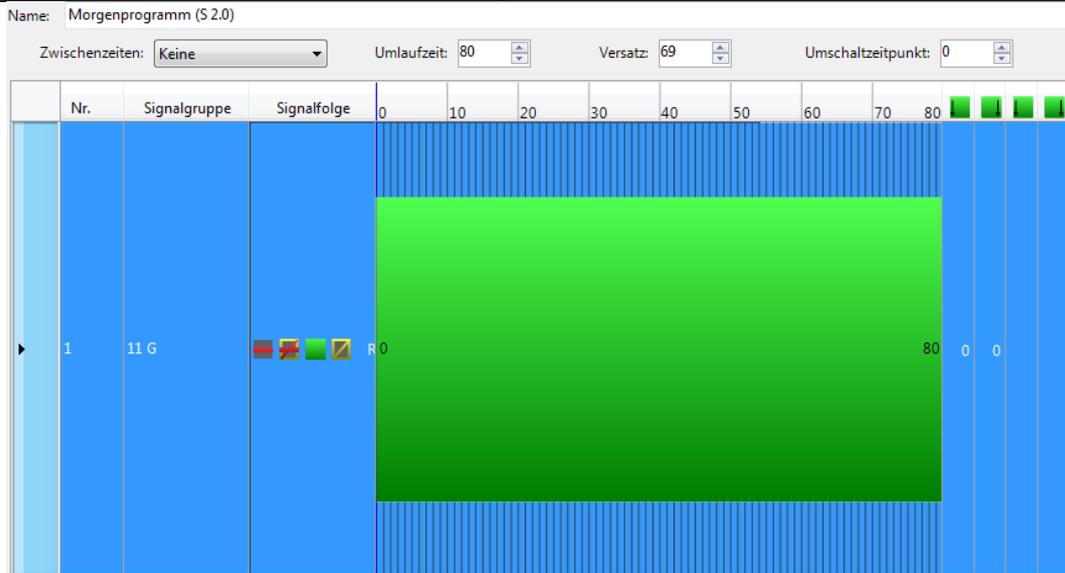
Knotengeometrie Simulation

VLISA 310 S2 Morgenprogramm IBV Fallst  
Wastlingasse 14, 8010 Graz



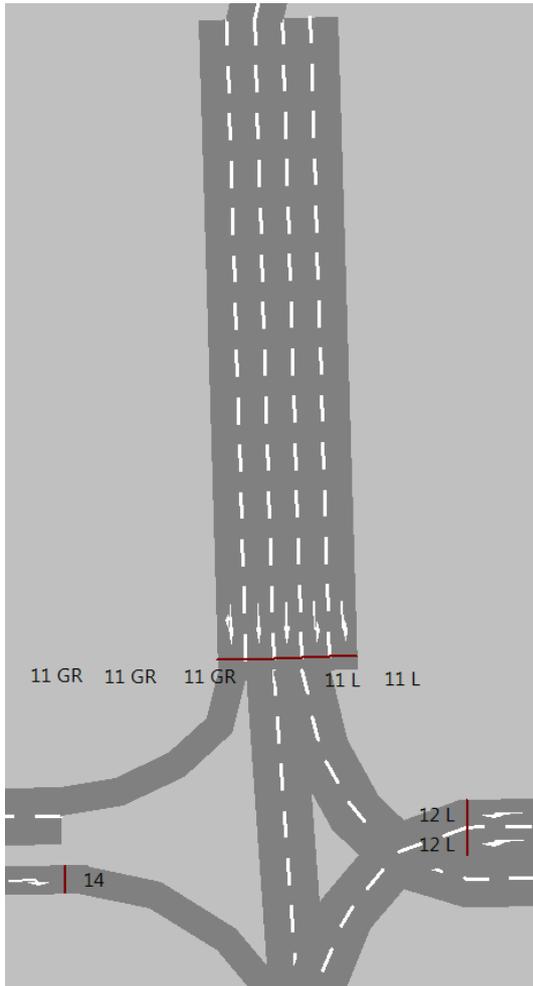
Struktur ohne Anforderungen

Signalprogramm (real)



Signalprogramm für den Knoten 310 (Simulation)

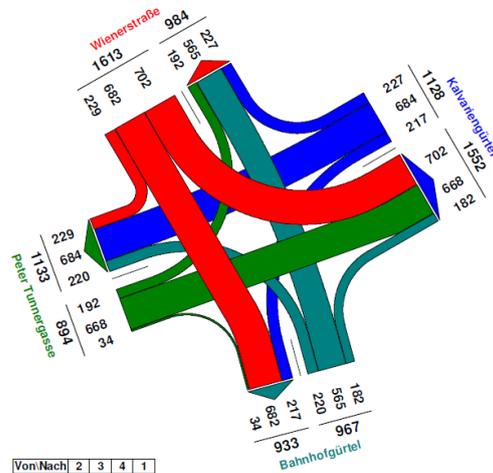
### Knoten 306



Knotengeometrie Simulation

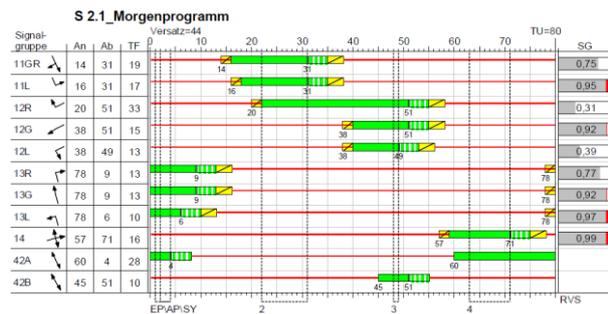
VLSA 306 Strombelastungsplan  IBV Fallast

Morgenspitze 2011



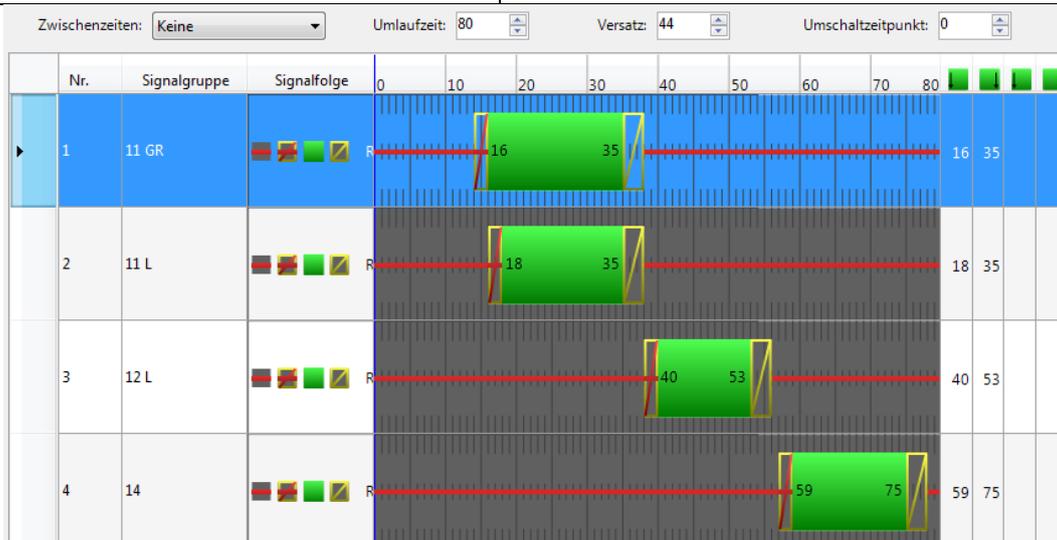
Von/Nach	2	3	4	1
2		217	684	227
3	182		220	565
4	668	34		192
1	702	682	229	

Knotenströme (Eingangsgrößen)



Phasenfolge: 1-2-3-4

Signalprogramm (real)



Signalprogramm für den Knoten 306 (Simulation)



## Anhang D: Digitale Medien

Auf der beiliegenden DVD sind die Masterarbeit selbst, sowie Daten der Masterarbeit digital abgelegt. Nachfolgend werden diese erklärend aufgezählt.

### 1\_Literatur

Dieser Ordner enthält die digital verfügbare Literatur aus dem Literaturverzeichnis.

### 2\_Realdaten

In diesem Verzeichnis sind die Messdaten aus der realen Verkehrsdatenerfassung enthalten, sowie die Daten aus den Outputs der verwendeten R-Skripte. Die R-Skripte der Realdatenaufbereitung sind ebenfalls in diesem Ordner enthalten.

Ordner	Inhalt
<b>01_Datengrundlagen</b>	Messtagebücher und Daten er Verkehrsbelastung
<b>02.1_R-Skripte</b>	R-Skripte und zugehörige Libraries; Datenoutput der jeweiligen Skripte in 02.2_Datensaetze bzw. in 02.3_Auswertungen.
<b>02.2_Datensaetze</b>	Datenoutput der einzelnen Berechnungsschritte (VBOX-Tools, R, Excel) entsprechend Abbildung 35
<b>02.3_Auswertungen</b>	Plots und Datenoutput je Kenngröße entsprechend Schritt 09 in Abbildung 35

### 3\_Simulationsdaten

Hier sind die Netzinformationen (\*.inp) und Signalprogrammdateien (\*.sig) enthalten, mit welchen die Simulation in VISSIM gestartet werden kann. Außerdem enthält das Verzeichnis die R-Skripte zur Aufbereitung der Simulationsdaten, sowie Datenoutputs der verschiedenen R-Skripte.

Ordner	Inhalt
<b>01_Simulationsdateien</b>	*.inp und *.sig-Dateien für alle untersuchten Szenarien (v08: variierende Verkehrsstärke, Wiedemann 99; v09: konstante Verkehrsstärke, variierende Lichtsignalsteuerung, Wiedemann 99; v10: variierende Verkehrsstärke, Wiedemann 74)
<b>02_R</b>	R-Skripte und zugehörige Libraries, sowie Plots und zugehörige Datensätze; Ebenfalls enthalten sind vergleichende Auswertungen mit Realdaten; Datenoutputs für Zwischenschritte nicht abgelegt wegen Speicheraufwand ~7GB.
<b>03_Auswertungen</b>	Auswertungen (Scatter- und Barplots) sortiert nach Szenario; Bestimmung erforderliche Stichprobengrößen
<b>04_Abbildungen</b>	Screenshots aus Simulation