



Graz University of Technology

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Methodiken zur Verkehrslageschätzung für das hochrangige Straßennetz auf Basis von Mobilfunkdaten

MASTERARBEIT

vorgelegt von

Michael Brandstätter, BSc.

bei

Univ. Prof. Dr. Ing. Martin Fellendorf

Technische Universität Graz

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Graz, am 23. Oktober 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, _____

Michael Brandstätter, 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, _____

Michael Brandstätter, BSc.

Aufgabenstellung für die Masterarbeit

von Michael Brandstätter

Graz, 10. Mai 2012

Methodiken zur Verkehrslageschätzung für das hochrangige Straßennetz auf Basis von Mobilfunkdaten

Problemstellung

Aktuelle Verkehrsdaten des Streckennetzes spielen eine immer wichtiger werdende Rolle in unserer heutigen Gesellschaft, sowohl für den Nutzer als auch für den Betreiber eines Infrastrukturnetzes. So ist der Betreiber bestrebt, den auf seinem Netz vorhandenen Verkehr möglichst zügig abzuwickeln, bzw. auftretende Störungen des Verkehrsablaufs wie z.B. Stauereignisse noch vor dem Entstehen zu detektieren und entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Generell existieren verschiedenste Methoden zur Verkehrsdatenerfassung. Die meisten infrastrukturseitigen Maßnahmen, wie zum Beispiel Querschnittsdatenerfassung per Induktionsschleifen oder Infrarotsensoren sind kostenintensiv, sind mit lokalen baulichen Veränderungen verbunden und daher nur für ausgewählte Streckenabschnitte geeignet. Im Gegensatz dazu liefern Floating-Cars (FC) örtlich unabhängig Daten, welche zur verkehrlichen Auswertungen herangezogen werden können. Um detaillierte Aussagen zu treffen ist jedoch ein gewisser Mindestausstattungsgrad notwendig.

Eine neue Qualität von Verkehrsdaten liegen in der Form von Mobilfunkdaten vor. Dabei können durch das Tracking von anonymisierten Usern Einzelpositionen ermittelt werden. Aufgrund des hohen Ausstattungsgrades an mobilfunkfähigen Endgeräten kann in weiterer Folge durch Analyse der Bewegungsmuster solcher anonymisierten Daten die aktuelle Verkehrslage abgeschätzt werden.

Aufgabenstellung

In dieser Masterarbeit wird versucht auf Basis von Mobilfunkdaten geeignete Methoden zur Abschätzung der Verkehrslage zu finden. Mithilfe jener Methoden sollte es möglich sein die aktuell vorherrschende Verkehrssituation am hochrangigen Straßennetz geeignet abzubilden.

Weiters sollen Testfahrten unternommen werden, um die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich Reisezeit, mittlerer Geschwindigkeit, Staumeldungen, etc. zu validieren. Es sollen die Reisezeiten, welche durch Mobilfunkdaten ermittelt wurden, mit tatsächlich vor Ort gemessenen Reisezeiten verglichen und statistisch ausgewertet werden. Die örtliche Reisezeitmessung soll mittels GPS-Vergleichsfahrten realisiert werden. Auch ein Abgleich von Staumeldungen durch TMC (OE3) mit den Mobilfunkdaten ist hierbei angedacht.

Die folgende Liste enthält wesentliche Bearbeitungspunkte der Masterarbeit; Abweichungen mit fortschreitendem Erkenntnisstand während der Bearbeitung können nicht ausgeschlossen werden:

- Literaturrecherche zum Thema Verkehrsdaten (Erfassung, Trajektorienermittlung aus Mobilfunk- bzw. Floating-Car-Daten, Verkehrslagemodellierung) sowie zum Thema Grundlagen des Mobilfunks
- Entwicklung von Methoden zur Ermittlung verkehrlicher Kenngrößen und des Verkehrszustandes aus den Mobilfunkdaten, also Verkehrslagemodellierung mittels Mobilfunkdaten
- Entwurf und Erstellung von Versuchsplänen für GPS-Referenzmessfahrten
- GPS-Messfahrten und Analyse hinsichtlich verkehrsrelevanter Daten
- Statistische Bewertung, Gegenüberstellung und Vergleich der aus der Methodik gewonnenen Daten mit den gemessenen Werten
- Vergleich von Staumeldungen: Mobilfunkdaten – TMC-Meldungen (OE3)
- Bewertung der Verwendbarkeit von Mobilfunkdaten zum Zwecke der Verkehrslageerfassung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf

Tel. 0316 873 6220

martin.fellendorf@tugraz.at

Betreuer

DI BSc. Michael Haberl

Tel. 0316 873 6722

michael.haberl@tugraz.at

Mitbetreuender Assistent

Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Reiter Thomas

Tel. 0316 873 6723

reiter@tugraz.at

Mitbetreuender Assistent

Kurzfassung

Methodiken zur Verkehrslageschätzung für das hochrangige Straßennetz auf Basis von Mobilfunkdaten

Kenntnisse über die aktuelle Verkehrssituation sind von immer größerer werdender Bedeutung in unserer Gesellschaft. Übliche Methoden zur Ermittlung von Verkehrsinformationen sind entweder lokal begrenzt (lokale Querschnittsmessungen) oder nicht ausreichend weit verbreitet (Verkehrsdaterfassung mittels Floating Cars) um hinreichend gute, zeitaktuelle Aussagen über die Situation im gesamten Netz tätigen zu können.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Generierung von verkehrlichen Informationen auf Basis von Mobilitätsdaten aus dem Mobilfunknetz. Vor allem bei aktiver Nutzung eines mobilfunkfähigen Endgerätes fallen viele solcher ortsbezogenen Mobilitätsdaten an, welche für verkehrliche Anwendungen aufgegriffen werden können. In Kombination mit der hohen Verbreitung von Mobilfunkgeräten (auf 2 Personen kommen im Schnitt rund 3 mobilfunkfähige Endgeräte) und der Quasi-Echtzeitverfügbarkeit der anonymisierten Informationen scheinen Mobilfunkdaten daher als Datenquelle zur Schätzung der aktuellen Verkehrssituation geeignet zu sein. Neben einem kurzen Überblick bereits bestehender Forschungsprojekte zum Thema Mobilfunkdaten als Verkehrslagedatenquelle werden drei verschiedene Methoden vorgestellt, wie die vorhandenen Daten in Echtzeit genutzt werden können. Der Kernbereich liegt dabei in der Ermittlung ortsabhängiger Geschwindigkeiten bzw. bei der aus dem Geschwindigkeitsfeld ermöglichten Verkehrslageschätzung. Ebenfalls werden in unterschiedlichen Bereichen GPS-Referenzfahrten getätigt und hinsichtlich verkehrsrelevanter Daten analysiert. Nachdem diese Arbeit vor allem das hochrangige Straßennetz in Vordergrund stellt, werden in weiterer Folge reale Beispielfälle vor allem an einem solchen kalibrierten Streckenabschnitt vollzogen. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den erstellten Methoden werden mittels Querschnittsmessungen und Traffic-Message-Channel (TMC)-Daten verglichen. Zusätzlich findet sich auch eine Analyse im urbanen Bereich, wobei dort aufgrund fehlender Vergleichsdaten vor allem auf die Ermittlung von Streckengeschwindigkeiten sowie die Routenanalyse eingegangen wird.

Abstract

Traffic data estimation methods for major road network based on cellular network data

Knowledge of the current traffic situation is of ever increasing importance in our society. Common methods for the determination of traffic information are either specific to a locality (local cross-section measurements) or not sufficiently widespread (traffic data acquisition by means of floating cars) to be adequate for making real-time statements on the situation in the entire network.

The present work deals with the generation of traffic information on the basis of mobility data from the mobile network. Many forms of location-based mobility data accrue especially with the active use of mobile wireless devices, which data can be utilized for traffic applications. In combination with the high prevalence of mobile devices (for every 2 people there are on average around 3 mobile wireless devices) and quasi real-time availability of anonymous information, mobile wireless data appears to be a suitable data source for estimating the current traffic situation. In addition to a brief overview of existing research projects on the topic of mobile wireless data as a source of traffic data, three different methods will be presented as to how the existing data could be used in real-time. The core area is located in the determination of location-dependent speeds, or in the estimation of traffic conditions enabled via the velocity field. Additionally GPS referencing operations will be made in varying areas and analysed in accordance with traffic-related data. In that particularly the high-level road network is the essay's focus, subsequently real-world case examples will be completed on a calibrated route section. The findings from these developed methods will be compared by means of cross-section measurements and Traffic Message Channel (TMC) data. There will also be an analysis within the urban area, where due to lack of comparative data mainly a determination of line speeds and a route analysis will be dealt with.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
Abkürzungen	vi
1 Einführung	1
1.1 Motivation und Ziele	1
1.2 Gliederung der Arbeit	2
2 Stand der Technik	4
2.1 Verkehrstechnische Grundlagen	4
2.1.1 Kenngrößen und Erfassungsmethoden.....	4
2.1.2 Zusammenhang der erfassten Kenngrößen.....	9
2.1.3 Qualität des Verkehrsablaufs	12
2.1.4 Infrastruktureitige Sensorik.....	14
2.2 Grundlagen – Floating-Objects-Data	16
2.2.1 Floating Car Data – FCD.....	16
2.2.2 Extended Floating Car Data – xFCD.....	17
2.2.3 Floating Phone Data – FPD.....	18
2.3 Gegenüberstellung der Methoden.....	18
2.4 Grundlagen im Mobilfunk	19
2.4.1 Global System for Mobile Communications - GSM.....	19
2.4.2 Universal Mobile Telecommunication Systems – UMTS.....	24
2.4.3 Ortungsmethoden.....	27
2.5 Traffic Message Channel – TMC	30
2.6 Methodische Grundlagen.....	30
2.6.1 Graphentheorie.....	30
2.6.2 Algorithmische Geometrie.....	32
2.6.3 Koordinatenberechnungen und – transformation.....	33
2.7 Map Matching Methoden	37
2.8 Bestehende und abgeschlossene Forschungsprojekte	39
3 Methoden	41
3.1 Systemüberblick	41
3.2 Datenbasis	42
3.3 Datenimport - iTrafficReader	45
3.4 Berechnung der realen Basisstationsstandorte	45

3.5 Standortfilterung.....	48
3.5.1 Geographische Bereichseinschränkung.....	48
3.5.2 Ermittlung relevanter Basisstationen.....	51
3.6 Aktivitätsanalyse.....	52
3.6.1 Löschen stationärer IDs.....	52
3.6.2 Datenauswertung.....	53
3.7 Mastendynamik.....	53
3.8 Geschwindigkeits- und Reisezeitanalyse.....	53
3.8.1 Vorfilterung.....	54
3.8.2 Trajektorienbildung.....	55
3.8.3 Matching der Trajektorien.....	57
3.8.4 Schätzung der aktuellen Reisezeit.....	59
3.9 Zusammenfassung.....	60
4 Anwendungen.....	62
4.1 Vergleichsdaten.....	62
4.1.1 GPS-Messfahrten.....	62
4.1.2 Querschnittsdaten.....	64
4.1.3 Traffic Message Channel – TMC.....	65
4.2 Validierung mittels GPS-Messfahrten.....	65
4.3 Kalibrierung auf freier Strecke.....	73
4.4 Beispielfälle.....	81
4.4.1 Analysen auf Freilandstrecken.....	81
4.4.2 Analysen im urbanen Bereich.....	93
5 Diskussion und Ausblick.....	99
5.1 Zusammenfassung und Bewertung der Methoden.....	99
5.2 Zukünftige Forschungsfragen.....	100
Literaturverzeichnis.....	102
Anhang A.....	107
Anhang B.....	114
Anhang C.....	115

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	zeitlich- räumliche Ausdehnung von Erfassungsmethoden [Listl, 2003].....	4
Abbildung 2:	Beispielhaftes Geschwindigkeitsprofil und –ganglinie eines Einzelfahrzeuges nach [Leutzbach, 1972]	7
Abbildung 3:	Teilflächen konstanter Verkehrsdichte (links) bzw. konstanter Verkehrsstärke (rechts) nach [Listl,2003].....	9
Abbildung 4:	Typisches Fundamentaldiagramm [Schick, 2003]	10
Abbildung 5:	Magnetfeldänderung bei Durchquerung eines Fahrzeuges [Kühnel, 2011]	15
Abbildung 6:	xFCD-Systemarchitektur nach [Leitzke, 2012].....	17
Abbildung 7:	GSM-Systemarchitektur (ohne GPRS) [Conningtech.Wordpress, 2012]	19
Abbildung 8:	Idealisierte Zellstruktur in Mobilfunknetzen	21
Abbildung 9:	Schirmzellenprinzip [Linauer, 2005]	22
Abbildung 10:	Handover aufgrund Power-Budget [Walke, 2000]	23
Abbildung 11:	GSM/GPRS-Systemarchitektur [Conningtech.Wordpress, 2012]	24
Abbildung 12:	UMTS-Systemarchitektur (Release 99) [Conningtech.Wordpress, 2012]	25
Abbildung 13:	Zellatmung und Signalrauschen in UMTS-Netzen [Katrein, 2013]	26
Abbildung 14:	E-OTD-Location (circular) [ETSI – GSM 03.71, 1996].....	29
Abbildung 15:	E-OTD -Location (hyperbolic) [ETSI – GSM 03.71, 1996].....	29
Abbildung 16:	Grundprinzip - Angle of Arrival AOA [BSI, 2008]	29
Abbildung 17:	Grafisches Beispiel zur Kreuzungszahl.....	32
Abbildung 18:	Beispielhafter Schnitt eines Polygonzuges mit einer Gerade.....	33
Abbildung 19:	Schematische Darstellung des Geoids und des Ellipsoids [IVV-Geo, 2013].....	34
Abbildung 20:	Koordinatentransformation mit gegebenen Parametern	36
Abbildung 21:	Gesamtsystemüberblick über die Abarbeitungsblöcke.....	42
Abbildung 22:	iTraffic-Plattform [Telekom Austria Group, 2013].....	43
Abbildung 23:	Analyse der Gültigkeitsdauer anonymisierter IDs für den Großraum Graz.....	44
Abbildung 24:	Geometrische Abhängigkeitsbedingungen symmetrischer Keulenformationen	47
Abbildung 25:	Häufigkeiten zugeordneter Basisstationen anhand radiusbezogener Distanzen - triangulare Formation (links) und quadratische Formation (rechts).....	48
Abbildung 26:	Prinzip der Bereichs-eingrenzung durch Rechteckspunkte	49
Abbildung 27:	Übersichtsbeispiel der Bereichseinschränkungsarten.....	51
Abbildung 28:	Systemüberblick über die Geschwindigkeits- und Reisezeitanalyse	54
Abbildung 29:	Ping-Pong-Handover-Filter	55
Abbildung 30:	Map-Matching-Beispiel	58
Abbildung 31:	Fahrtroute der Messfahrten Graz-Salzburg.....	62
Abbildung 32:	Fahrtroute der Messfahrten Klagenfurt-Graz bzw. retour	64
Abbildung 33:	Gegenüberstellung der GSM- bzw. GPS- Geschwindigkeitsverläufe eines Probanden der Messfahrt am 09.05.2012	66
Abbildung 34:	ungefilterte (links) sowie gefilterte Mobilfunk-Datensätze (rechts) der Messfahrten zwischen Klagenfurt und Wolfsberg.....	70
Abbildung 35:	Vergleich der innerstädtischen Mobilfunk-Routen mit deren GPS-Tracks – Originaldaten (links), BTS-zugewiesene Daten (rechts)	73
Abbildung 36:	Übersicht über den betrachteten Abschnitt der A4 Ostautobahn.....	74

Abbildung 37: Boxplots der ermittelten Geschwindigkeitskennwerte aller Kombinationssets – tageszeitgruppiert	76
Abbildung 38: Boxplots der ermittelten Geschwindigkeitskennwerte aller Kombinationssets – gruppiert nach Wochentagen.....	77
Abbildung 39: Boxplots der Verkehrsstärkenkennwerte ($q_{\text{Mobilfunk}}$ vs. $q_{\text{Messquerschnitt}}$) bzw. deren Verhältnisfaktors - tageszeitgruppiert.....	78
Abbildung 40: Boxplots der Verkehrsstärkenkennwerte ($q_{\text{Mobilfunk}}$ vs. $q_{\text{Messquerschnitt}}$) bzw. deren Verhältnisfaktor – gruppiert nach Wochentagen.....	79
Abbildung 41: absolute Eventhäufigkeiten an der A4 in Fahrtrichtung Ungarn am 07.05.2012.....	83
Abbildung 42: relative Eventhäufigkeiten an der A4 in Fahrtrichtung Ungarn am 07.05.2012	84
Abbildung 43: Eventhäufigkeiten – Vergleich zwischen 5km-gefilterten Bereich und trajektorien-auslösenden Events – 07.05.2012	85
Abbildung 44: Geschwindigkeitscontourplot der A4 in Fahrtrichtung Ungarn – 07.05.2012	86
Abbildung 45: Geschätzte Reisezeit zwischen ASt. Fischamend und ASt. Bruck/West in Fahrtrichtung Ungarn – 07.05.2012	87
Abbildung 46: Contourplot normierter Geschwindigkeiten bzgl. Historischer Daten – A4 in Fahrtrichtung Ungarn – 07.05.2012	87
Abbildung 47: Einzeltrajektorienplot aus Mobilfunkdaten (jede zweite Trajektorie) – A4 in Fahrtrichtung Ungarn – 07.05.2012	88
Abbildung 48: Geschwindigkeitsganglinien aus Mobilfunkdaten sowie aus QS-Messung – MQ_A04_1_026.585 – 07.05.2012.....	89
Abbildung 49: Korrelation zwischen realer Querschnittsmessung MQ_A04_1_026.585 und berechneten Mobilfunkdaten	89
Abbildung 50: Kreuzkorrelation der Daten des 07.05.2012 – A4 in Fahrtrichtung Ungarn.....	90
Abbildung 51: Mastendynamik-Auswertung normiert – Autobahn A4 in Fahrtrichtung Ungarn am 07.05.2012	91
Abbildung 52: Geschwindigkeitscontourplot der A4 in Fahrtrichtung Wien – 23.04.2012	92
Abbildung 53: Übersicht über den innerstädtischen Analysebereich	93
Abbildung 54: Geschwindigkeitsganglinien und Scatterplot valider Geschwindigkeiten – Bergmannngasse/Weinzöttlstraße – 24.05.2012 – ohne BTS-Zuweisung.....	94
Abbildung 55: Geschwindigkeitsganglinien und Scatterplot valider Geschwindigkeiten – Bergmannngasse/Weinzöttlstraße – 24.05.2012 – nach BTS-Zuweisung	94
Abbildung 56: Norm-Basisstationsroute bzgl. der Voronoi-Zellen entlang Bergmannngasse/Weinzöttlstraße - Graz.....	96
Abbildung 57: Innerstädtische BTS-Übergänge ohne-, mittels adaptiertem Jaccardkoeffizienten- und per herkömmlicher Filterung.....	97

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Qualitätskriterien für verschiedene Verkehrsanlagen nach HBS (2001) und HCM (2000).....	12
Tabelle 2:	Allgemeine Qualitätsstufen nach HBS (2001).....	13
Tabelle 3:	Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes auf Autobahnen bei ebener Strecke ohne Geschwindigkeitsbeschränkungen nach HBS (2001).....	13
Tabelle 4:	Fahrzeuggrundklassen nach TLS [BAST, 2002]	14
Tabelle 5:	Fahrzeugklassifizierungsgruppen nach TLS [BAST, 2002]	14
Tabelle 6:	Helmert Parameter für die Transformation von WGS-84 nach MGI-Austria	37
Tabelle 7:	Winkelbezüge des Bereichs-rechtecks in Abhängigkeit des Quadranten	49
Tabelle 8:	Auszüge aus dem Messfahrtsprotokoll der Mobilfunknutzung	63
Tabelle 9:	Metadaten valider Messfahrten Klagenfurt-Graz bzw. retour.....	63
Tabelle 10:	Metadaten valider innerstädtischer Messfahrten.....	64
Tabelle 11:	Traffic Message Channel (TMC) – Spaltenbezeichnungen und deren Bedeutung	65
Tabelle 12:	Vergleich der mittleren Geschwindigkeiten und der gefahrenen Gesamtdistanz zwischen GPS- und GMS-Trajektorien	67
Tabelle 13:	Häufigkeiten auftretender Events aller Messfahrten zwischen Klagenfurt und Graz ...	68
Tabelle 14:	Vergleich der mittleren Geschwindigkeiten der Messfahrten zwischen Klagenfurt und Graz.....	70
Tabelle 15:	Häufigkeiten der auftretenden Events aller innerstädtischen Messfahrten.....	71
Tabelle 16:	mittlere Abweichungen zwischen GPS- und Mobilfunk-Position bei auftretenden Events	72
Tabelle 17:	Mittlere Geschwindigkeiten der innerstädtischen Messfahrten mit bzw. ohne BTS-Zuweisung.....	72
Tabelle 18:	TMC-Daten des Ereignisses auf der A4 am 07.05.2012.....	82
Tabelle 19:	ausschlaggebende, eventspezifische, maximale Häufigkeiten im Untersuchungszeitraum – relativ zur Norm, sowie in Absolutform	84
Tabelle 20:	TMC-Daten der A4 vom 23.04.2012 in Fahrtrichtung Wien.....	92
Tabelle 21:	Geschwindigkeitskennwerte der Streckenauswertung Bergmannngasse/Weinzöttelstraße – 24.05. 2012	95
Tabelle 22:	Zellübergangsdaten im untersuchten urbanen Bereich.....	98

Abkürzungen

A-GPS	Assited Global Positioning System
AOA	Angle of Arrival
ASFINAG	Autobahnen- und Schnellstraßen- Finanzierungs- Aktiengesellschaft
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BSC	Base Station Controler
BSS	Base Station Subsystem
BTS	Base Transceiver Station (dt: Basisstation)
CDMA	Code Division Multiple Access
CN	Core Network
CSV	Comma Separated Values
E-OTD	Enhanced Observed Time Difference
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCD	Floating Car Data
FPD	Floating Phone Data
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GIS	Geographische Informationssysteme
GK	Gauss Krüger
GMSC	Gateway Mobile Switching Center
GPRS	General Radio Pocket Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communication
GTD	Geometric Time Difference
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
HCM	Highway Capacity Manual
HO	Handover
HSPA	High Speed Packet Access
IMEI	International Mobile Station Equipment Identity
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
KFZ	Kraftfahrzeug
KH	Konvexe Hülle
KNN	künstliches neuronales Netz (engl. artificial neural netwrok - ANN)
LA	Location Area
LKW	Lastkraftwagen
LMU	Location Measurement Unit

LOS	Level of Service
LTE	Long Term Evolution
ME	Mobile Equipment
MEX	Matlab Executable
MIMO	Multiple Input, Multiple Output
MQ	Messquerschnitt
MQV	Maß für die Qualität des Verkehrsablaufs
MS	Mobile Station
MSC	Mobile Switching Center
NSS	Network Switching Subsystem
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSM	Open Street Map
OTD	Observed Time Difference
PKW	Personenkraftwagen
QS	Querschnitt
RDS	Radio Data System
RNC	Radio Network Controller
RSS	Received Signal Strength
RTD	Real Time Difference
SD	Standard Deviation (dt. Standardabweichung)
SIM	Subscriber Identity Module
SGSN	Serving GPRS Support Node
TA	Timing Advance
TMC	Traffic Message Channel
TDMA	Time Division Multiple Access
TDOA	Time Difference of Arrival
TLS	Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen
TOA	Time of Arrival
UDP	User-Datagram-Protocol
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UTC	Coordinated Universal Time (dt. Koordinierte Weltzeit)
UTM	Universal Transverse Mercator
VBA	Verkehrsbeeinflussungsanlage
VLR	Visitor Location Register
WGS84	World Geodetic System 1984
XFCD	Extended Floating Car Data

1 Einführung

1.1 Motivation und Ziele

Die Kenntnis über das aktuelle Verkehrsgeschehen im Straßennetz ist von immer größer werdender Bedeutung. So ist der Betreiber einer Verkehrsinfrastruktur besonders an einem reibungslosen Ablauf des Verkehrs interessiert. Anomalien sollten möglichst rasch entdeckt werden, um auf diese in geeigneter Form, wie beispielsweise durch Stauwarnungen oder der Bekanntgabe von Alternativrouten, reagieren zu können. Davon wiederum profitieren die Benutzer des Straßennetzes, welche aufgrund dieser zusätzlichen Informationen auf die geänderte Situation reagieren können. Derzeit werden die dafür benötigten Eingangsdaten hauptsächlich an stationären Messquerschnitten per Induktionsschleifen, Infrarot- oder Radarsensoren gesammelt und ausgewertet. Weiters bilden stationäre Detektoren nur den Verkehrszustand an exakt jenem Querschnitt ab. Um einen größeren Bereich abzubilden ist es daher notwendig mehrere Querschnitte in nicht zu großer Entfernung zu haben, aus denen die Verkehrslage errechnet werden kann. Die Installation solcher Detektoren ist im Allgemeinen mit sehr hohen Investitions- und Betriebskosten verbunden und ist daher nur für ausgewählte Bereiche eine wirtschaftlich vertretbare. Eine alternative Möglichkeit der Verkehrsdatenerfassung liegt in der Nutzung von im Verkehr mitschwimmenden Detektoren, sogenannten Floating Cars. Diese mobilen Detektoren liefern fortlaufend Daten, aus denen Kennzahlen wie Reisezeit oder –geschwindigkeit über den Streckenverlauf extrahiert werden können. Herkömmliche Floating Cars sind mit GPS-Sensoren ausgestattet und senden ihre Ortungsinformationen in regelmäßigen Abständen. Um aus diesen Daten eine vernünftige Verkehrslageschätzung abgeben zu können, bedarf es einer gewissen Mindestanzahl an Floating Cars in einem Gebiet, welche in manchen Regionen nicht erreicht werden können. Hier könnten Mobilfunkdaten eine geeignete Alternative darstellen. Diese liefern eine große Anzahl von ortsbezogenen Daten und sind aufgrund des guten Netzausbaus sowie der hohen Penetrationsrate für ganz Österreich flächendeckend und in Echtzeit verfügbar und daher potenziell zur Verkehrslagebestimmung geeignet.

Anhand jener Mobilfunkdaten wird in dieser Arbeit versucht geeignete Methoden zur Abschätzung der Verkehrslage zu entwickeln, wobei die Echtzeitfähigkeit besonders von Bedeutung ist. Aufgrund der enormen Datenmengen ist ein für den Beobachtungsbereich optimierter Einsatz erforderlich. Daher soll auch die standortbasierte Filterung sowie die effiziente Verarbeitung der Daten nicht unberücksichtigt bleiben. Im Bereich der Verkehrslageschätzung steht vor allem die Detektion von Anomalien im Verkehrsablauf sowie deren Auflösung im Vordergrund. Eine große Rolle spielt dabei die Ermittlung valider aktueller Geschwindigkeiten bzw. Reisezeiten aus den Mobilfunkdaten, welche durch taugliche Filtermethoden gewonnen und in geeigneter Weise Punkten der Straßenachse zugeordnet werden sollen. Im nächsten Schritt werden jene Methoden anhand von realen Beispielfällen mittels diverser Vergleichsdaten validiert, wobei auch der Ansatz der Miteinbeziehung historischer Daten eine Rolle spielen sollte. Zusätzlich sollen Erkenntnisse aus Testfahrten dargestellt und mit jenen aus den Methodiken verglichen werden. Schlussendlich sollen die Machbarkeiten aber auch die Grenzen der Methoden aufgezeigt sowie weiteren Forschungsbedarf dargelegt werden.

1.2 Gliederung der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in fünf Kapitel. Das erste Kapitel beinhaltet die Einleitung inklusive der Ausgangslage, sowie die Ziele dieser Arbeit.

Kapitel 2 enthält theoretische Grundlagen im Bereich der Verkehrstechnik, der Mobilfunktechnik, der Graphentheorie, sowie der Karteneinpassung von Trajektorienpunkten. Dabei wird im Zusammenhang mit der Verkehrstechnik besonderes Augenmerk auf relevante Kenngrößen, sowie deren Zusammenhänge und Erfassung gelegt. Dabei wird auch auf die typische Sensorik zur Ermittlung von Verkehrskenngrößen eingegangen. Nach einer Einführung zum Thema „Floating Objects Data“ werden die Systeme einander gegenübergestellt und verglichen. Mobilfunkseitig werden die verwendeten Standards erläutert. Insbesondere wird auf das GSM-Netz mit seinem zellularen Aufbau und seinen Teilsystemen eingegangen. Weiters werden typische Zusammenhänge im Bereich der Mobilfunkmobilität erklärt. Danach erfolgt eine kurze Erläuterung des „Traffic Message Channels“ (TMC). Folgend werden diverse grundlegende Techniken der Graphentheorie beschrieben. Da für diese Arbeit des Öfteren Koordinatenberechnungen bzw. Transformationen in andere Koordinatensysteme erforderlich werden, sind diese grundlegend beschrieben. Daraufhin beschäftigt sich diese Arbeit mit Karteneinpassungsmethoden (Map-Matching-Methoden). Zum Abschluss des Kapitels wird noch auf prägende, schon bestehende Forschungsprojekte zum Thema Mobilfunk als Verkehrsdatenquelle eingegangen.

In Kapitel 3 werden alle erstellten Methoden vorgestellt. Begonnen wird mit einem Systemüberblick, der alle notwendigen Ablaufschritte aufzählt und dadurch den Blick auf die Gesamtheit der Struktur zulässt. In weiterer Folge wird auf die einzelnen Ablaufschritte näher eingegangen. Dabei werden zuerst die verwendeten Mobilfunkdaten sowie deren Aufbereitung näher beschrieben. Folgend werden die Schritte zur Ermittlung der realen Basisstationsmittelpunkte erläutert, welche für spätere Mobilitätsanalysen von Bedeutung sind. Im weiteren Verlauf wird auf die räumliche Bereichseinschränkung besonderen Wert gelegt, da damit das Datenaufkommen deutlich reduziert werden kann und somit eine Auswertung schneller erfolgen kann. Dabei gilt es zu unterscheiden, ob der beobachtete Bereich digital in Form von Streckenpunkten vorhanden ist. Die räumliche Bereichseinschränkung sowie die folgende Einschränkung auf relevante Basisstationen dienen vor allem der Drosselung der Datenmenge und somit der erleichterten Bearbeitung. Auf Basis dieses gefilterten Datensatzes folgt die Beschreibung der drei eigenständigen Kennwertberechnungen (Reisezeit- und Geschwindigkeitsermittlung, Aktivitätsanalyse sowie der Berechnung der Mastenaktivität). Dabei wird im Speziellen auf diverse Filtertechniken zur Verbesserung der Qualität der ermittelten Trajektorien eingegangen.

Nachdem bereits im dritten Kapitel die Methoden vorgestellt wurden, beschäftigt sich Kapitel 4 mit den praktischen Anwendungen dieser Methoden. Zuvor wird allerdings noch genauer auf die verwendeten Vergleichsdaten (GPS-Messfahrten, zur Verfügung stehende Querschnittsdaten, Traffic-Message-Channel-Daten) eingegangen. Im Folgenden wird per GPS-Messfahrten, welche in unterschiedlichen Regionen aufgenommen wurden, eine Validierung der Methoden durchgeführt. Im nächsten Schritt folgt die Kalibrierung der Methoden an einer definierten freien Strecke (idgF. der niederösterreichische Abschnitt der A4 in Fahrtrichtung Ungarn). Auf ebendiesem Abschnitt des

österreichischen, hochrangigen Straßennetz werden zwei Beispielfälle betrachtet. Zum Abschluss des Kapitels wird eine Auswertung eines innerstädtischen Bereiches durchgeführt.

Im Kapitel 5 befinden sich die Schlussfolgerungen der Arbeit, sowie Perspektiven und Anregungen über weitere Forschungen und Anwendungen auf Basis dieser Untersuchung.

2 Stand der Technik

Im folgenden Kapitel werden jene Grundlagen, welche im Zusammenhang mit dieser Arbeit stehen angeführt. Begonnen mit den verkehrstechnischen Grundlagen, welche sich insbesondere mit den straßenverkehrlichen Kenngrößen, deren Beschaffung und Zusammenhang, beschäftigt folgen Informationen über Mobilfunkkommunikation. Nach der kurzen Erläuterung des Traffic Message Channels (TMC) werden diverse methodische Grundlagen erläutert, welche für die Anwendung in dieser Arbeit von Bedeutung sind. Der nächste Abschnitt beschäftigt sich mit diversen Methoden, welche zur Zuordnung von allgemeinen Positionsdaten zur Straßenachse notwendig sind (Map-Matching). Der letzte Abschnitt dieses Kapitels gibt einen Auszug aus bestehenden bzw. bereits abgeschlossenen Forschungen im Bereich der Nutzung von Mobilfunkdaten im Verkehrswesen.

2.1 Verkehrstechnische Grundlagen

2.1.1 Kenngrößen und Erfassungsmethoden

Das Verkehrsgeschehen im Straßennetz bzw. auf einem Streckenabschnitt kann durch mehrere Kenngrößen quantitativ repräsentiert werden, wobei selbige in den meisten Fällen mathematisch miteinander in Verbindung gebracht werden können. Welche Kenngrößen gemessen bzw. welche berechnet werden können, hängt von der verwendeten Erfassungsmethode ab. Grundsätzlich kann zwischen lokaler, momentaner, bewegter und räumlicher Beobachtung unterschieden werden.

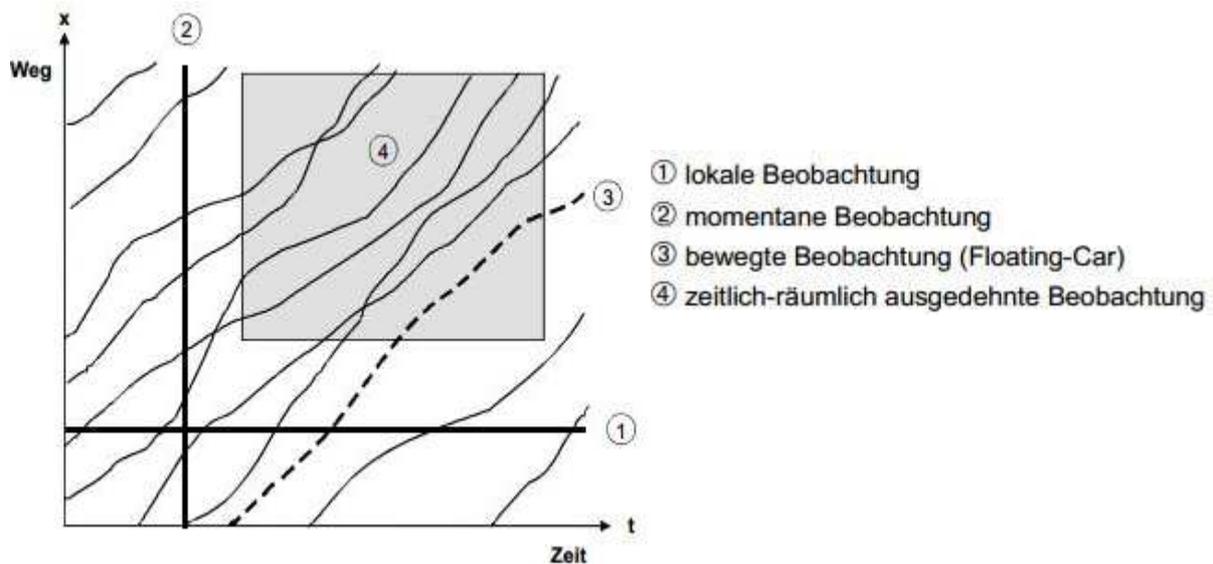


Abbildung 1: zeitlich- räumliche Ausdehnung von Erfassungsmethoden [Listl, 2003]

Lokale Beobachtung

Die lokale Beobachtung ist die einfachste und daher auch häufigste Art der Verkehrsdatenerfassung. Sie liefert Daten bezüglich eines Straßenquerschnitts, wobei jedes Fahrzeug erfasst wird, welches diesen Querschnitt passiert. Üblicherweise liefert eine Querschnittserfassung Zähldaten von durchquerenden Fahrzeugen pro definiertem Zeitintervall Δt . Die Zeitintervalle betragen häufig 1 min, 5 min, 15min oder 60 min. Somit ergibt aus der Division der Anzahl der lokal gemessenen Fahrzeuge n_{lokal} durch das jeweilige Zeitintervall Δt die Verkehrsstärke q . Da die Verkehrsstärke

meist in Fahrzeugen pro Stunde angegeben wird, müssen Daten aus nicht passenden Zeitintervallen auf Stundenwerte aggregiert werden.

$$q = \frac{n_{\text{lokal}}}{\Delta t} \quad [\text{Fz/h}] \quad (2.1)$$

Eine weitere wichtige Kenngröße im Zusammenhang mit stationären Messungen ist die mittlere Zeitlücke $\bar{\tau}$. Diese Kenngröße beschreibt die mittlere Zeitdifferenz zwischen zwei Fahrzeugen. Manche Sensoren sind in der Lage Zeitlücken zu messen. In diesem Fall erhält man den Wert durch Mittelwertbildung der einzelnen Werte über das Zeitintervall, ansonsten ergibt sich der Wert aus dem Kehrwert der Verkehrsstärke q . Bei dieser Form der Zeitlücke handelt es sich um die mittlere Bruttozeitlücke.

$$\bar{\tau} = \frac{\Delta t}{n_{\text{lokal}}} = \frac{1}{q} \quad [\text{s}] \quad (2.2)$$

Neben der Verkehrsstärke ist die lokale Geschwindigkeit die wichtigste querschnittsbezogene Kennzahl. Nach [Kühnel, 2011] werden die Augenblicksgeschwindigkeiten in der Regel an zwei kurz hintereinander folgenden Querschnitten gemessen, daher ist in diesem Fall auch von einer quasi-lokalen Messung die Rede. Die Geschwindigkeit $v_{i,\text{lokal}}$ eines Fahrzeuges errechnet sich somit durch Division der Streckenlänge x durch die Zeitdifferenz Δt_i zwischen dem erstem und dem zweiten Querschnitt.

$$v_{i,\text{lokal}} = \frac{x}{\Delta t_i} \quad [\text{km/h}] \quad (2.3)$$

Die mittlere lokale Geschwindigkeit \bar{v}_{lokal} an einem Querschnitt kann dann in weiterer Folge durch die arithmetische Mittelwertbildung über alle Geschwindigkeiten der Einzelfahrzeuge im jeweils betrachteten Zeitintervall errechnet werden.

$$\bar{v}_{\text{lokal}} = \frac{1}{n_{\text{lokal}}} \cdot \sum_{i=1}^n v_{i,\text{lokal}} \quad [\text{km/h}] \quad (2.4)$$

Momentane Beobachtung

Bei der momentanen Beobachtung handelt es sich um eine Erfassung aller Fahrzeuge n_{mom} auf einer Strecke bzw. innerhalb eines bestimmten Streckenabschnittes Δx zu einem präzisen Zeitpunkt t . Wie bei der stationären Messung können auch hier einige Kenngrößen des Verkehrs abgeleitet werden. Eine davon stellt die Verkehrsdichte k dar. Dabei handelt es sich per Definition um die momentane Anzahl der Fahrzeuge n_{mom} auf einem Streckenabschnitt der Länge Δx (meistens in km) zu einem bestimmten Zeitpunkt t .

$$k = \frac{n_{mom}}{\Delta x} \quad [Fz/km] \quad (2.5)$$

Eine weitere Kenngröße, welche direkt aus den obigen Eingangsdaten ermittelt werden kann, ist die mittlere Bruttoweglücke $\bar{\zeta}$. Sie ergibt sich als der Kehrwert der Verkehrsdichte.

$$\bar{\zeta} = \frac{1}{k} = \frac{\Delta x}{n_{mom}} \quad [m] \quad (2.6)$$

Ähnlich der stationären Beobachtung kann die Geschwindigkeit bei einer momentanen Messung ebenfalls nur schwer direkt zu einem fixen Zeitpunkt ermittelt werden. Per Luftaufnahmen zu zwei kurz aufeinander folgenden Zeitpunkten mit dem Abstand Δt können die örtlichen Veränderungen Δx_i der Fahrzeuge erkannt und daraus auf deren momentanen Geschwindigkeitswert $v_{i,mom}$ geschlossen werden. Die mittlere momentane Geschwindigkeit \bar{v}_{mom} errechnet sich wiederum als das arithmetische Mittel der momentanen Einzelgeschwindigkeiten.

$$v_{i,mom} = \frac{\Delta x_i}{\Delta t} \quad [km/h] \quad (2.7)$$

$$\bar{v}_{mom} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_{i,mom} \quad [km/h] \quad (2.8)$$

Bewegte Beobachtungen

Bei dieser Erfassungsmethode handelt es sich um Daten aus Fahrzeugen, welche im Verkehrsgeschehen „mitschwimmen“. Im Unterschied zu den beiden vorherigen Methoden können hierbei nur Fahrzeuge erfasst werden, welche über die notwendige Ausstattung (GPS, Mobilfunk, etc.) verfügen. Diese Form der Daten nennt sich Floating Car Daten und wird im Kapitel 2.2 noch detaillierter beschrieben.

In Abhängigkeit des Detaillierungsgrades der gesendeten Daten, können diverse Kenngrößen in unterschiedlicher Qualität erfasst werden. Eine oft benötigte Kenngröße stellt die Reisezeit dar. Auf einen Streckenabschnitt bezogen definiert sich die Reisezeit als die Dauer Δt , welche benötigt wird um den jeweiligen Teilabschnitt Δx zu durchfahren. Bei sehr feinen Auflösungen kann durch Bildung des Differentialquotienten auch auf die momentane Geschwindigkeit geschlossen werden. Selbiges gilt für die momentane Beschleunigung $a_{mom,i}$, wobei diese per Definition die Änderung der Geschwindigkeit pro Zeiteinheit darstellt.

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} = v_{mom,i} \quad [km/h] \quad (2.9)$$

Bei der Ermittlung von Bewegungsprofilen von Einzelfahrzeugen sind zwei Betrachtungsweisen denkbar. Betrachtet man die Geschwindigkeit über die Zeit t spricht man von der Geschwindigkeitsganglinie $v(t)$, eine Darstellung über den Weg x wird als Geschwindigkeitsprofil $v(x)$ bezeichnet. Schlagend wird diese Unterscheidung insbesondere für die Bildung von mittleren

Geschwindigkeiten. So ergibt sich die mittlere Streckengeschwindigkeit \bar{v}_x aus einer wegbezogenen, die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_t aus einer zeitbezogenen Mittelwertbildung.

$$\bar{v}_x = \frac{1}{X} \cdot \int_0^X v(x) dx \quad [km/h] \quad (2.10)$$

$$X = \sum_{i=1}^n \Delta x_i$$

Bei der mittleren Streckengeschwindigkeit gehen Halte ($v=0$) nicht in die Berechnung ein. Für diverse zeitbezogenen Beurteilungen ist damit die mittlere Streckengeschwindigkeit \bar{v}_x ungeeignet. Die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_t errechnet sich wie folgt:

$$\bar{v}_t = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(t) dt \quad [km/h] \quad (2.11)$$

$$T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$$

Abbildung 2 verdeutlicht den Unterschied der Verläufe der strecken- bzw. zeitbezogenen Geschwindigkeiten an einem Beispiel für ein Einzelfahrzeug.

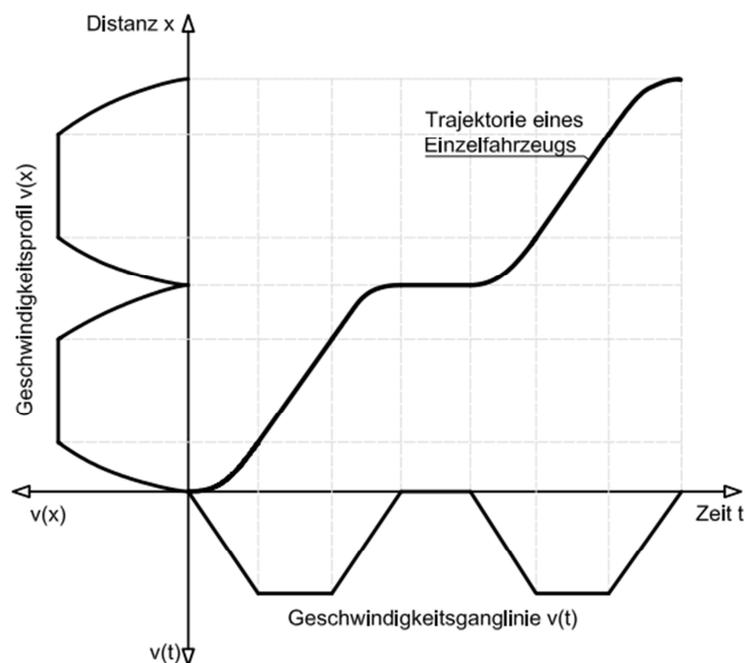


Abbildung 2: Beispielhaftes Geschwindigkeitsprofil und -ganglinie eines Einzelfahrzeuges nach [Leutzbach, 1972]

Räumlich-zeitliche Beobachtung

Bei der räumlich-zeitlichen Betrachtung handelt es sich um eine spezielle Form der Beobachtung. Bei der Betrachtung des Weg-Zeit-Diagramms wird im Gegensatz zu den vorangegangenen Methoden keine linienmäßige sondern eine flächenbezogene Beobachtung getätigt. Im Grunde kann aus der räumlich-zeitlichen Beobachtung jede Kenngröße der vorigen Methoden berechnet werden. Nach [Kühnel, 2011] ist die Form der Beobachtungsebene nicht relevant, jedoch wird in der Praxis häufig ein Rechteck mit den Kantenlängen X und T verwendet. Somit ergibt sich für die Beobachtungsfläche A_{rz} folgender Zusammenhang

$$A_{rz} = X \cdot T \quad [kmh] \quad (2.12)$$

Zur Ermittlung der räumlich-zeitlichen Verkehrsstärke q_{rz} bedient man sich der Bildung von n Teilflächen mit konstanter Verkehrsstärke, wie in Abbildung 3 (links) dargestellt. Der raum-zeitliche Wert errechnet sich in weiterer Folge durch die Bildung des gewichteten arithmetischen Mittelwertes der n konstanten Teilflächen.

$$q_{rz} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{Tf}} q_i \cdot \Delta x_i}{\sum_{i=1}^{n_{Tf}} \Delta x_i} \quad [Fz/h] \quad (2.13)$$

Nachdem sich die Verkehrsstärke der Teilfläche i aus der Anzahl n_{Fz} der Fahrzeuge im betrachteten zeitlichen Bereich T und die räumliche Distanz X aus Summe aus allen Teildistanzen Δx_i ergeben, kann der Zusammenhang folgendermaßen vereinfacht werden:

$$q_{rz} = \frac{1}{T \cdot X} \cdot \sum_{i=1}^{n_{Tf}} n_{Fz,i} \cdot \Delta x_i \quad [Fz/h] \quad (2.14)$$

Die Summation in obiger Formel entspricht wiederum der Summe aller zurückgelegten Distanzen der Einzelfahrzeuge, daher kann der Zusammenhang vereinfacht folgend dargestellt werden:

$$q_{rz} = \frac{1}{T \cdot X} \cdot \sum_{i=1}^{n_{Fz}} x_i \quad [Fz/h] \quad (2.15)$$

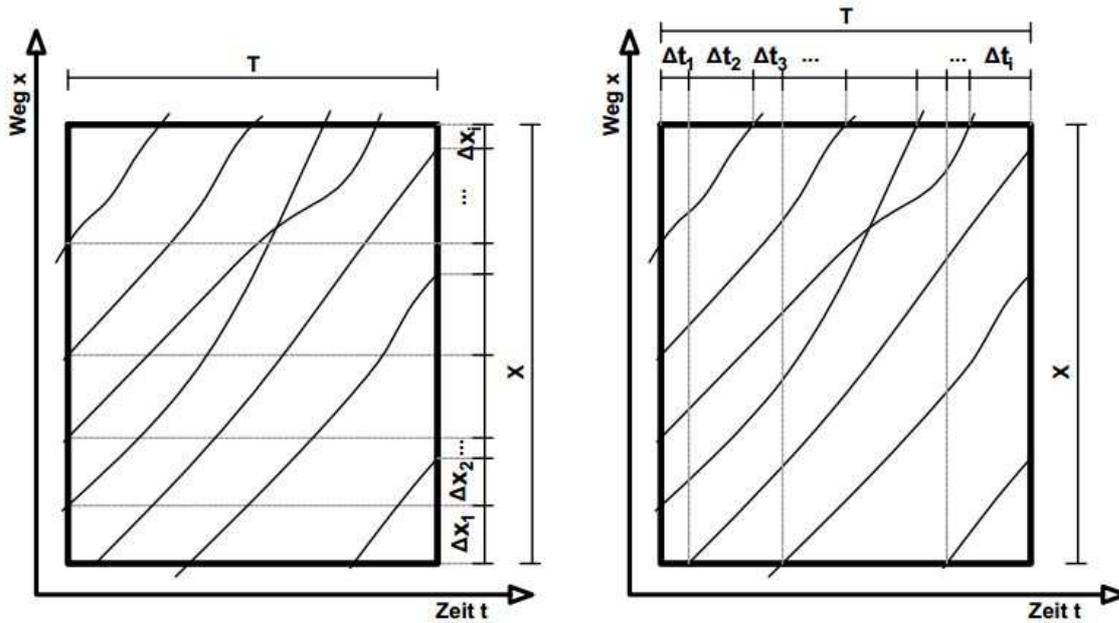


Abbildung 3: Teilflächen konstanter Verkehrsdichte (links) bzw. konstanter Verkehrsstärke (rechts) nach [Listl,2003]

Zur Bestimmung der Verkehrsdichte kann äquivalent herangegangen werden. Der Unterschied liegt darin, dass für diesen Fall n Teilflächen konstanter Verkehrsdichte (siehe Abbildung 3 - rechts) analysiert werden woraus sich folgende Beziehung ableiten lässt.

$$k_{rz} = \frac{1}{T \cdot X} \cdot \sum_{j=1}^{n_{Fz}} t_j \quad [Fz/km] \quad (2.16)$$

Die mittlere raum-zeitliche Geschwindigkeit \bar{v}_{rz} definiert sich nach [Listl, 2003] als der Quotient zurückgelegter Gesamtstrecke durch die Gesamtstreckezeit.

$$\bar{v}_{rz} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{Fz}} x_i}{\sum_{j=1}^{n_{Fz}} t_j} \quad [km/h] \quad (2.17)$$

2.1.2 Zusammenhang der erfassten Kenngrößen

Wie schon zuvor erwähnt, stehen die erfassten Kennwerte in einer Beziehung zueinander. Für viele Analysen ist es erforderlich einen Zusammenhang der meist lokal gemessenen Werte in Momentanwerte umzurechnen. Wie schon [Wardrop, 1952] erkannte, lässt sich bei stationärem Verkehrsablauf aus den einzelnen lokalen Geschwindigkeiten v_{lokal} der n Fahrzeuge der Mittelwert der momentanen Geschwindigkeit \bar{v}_{mom} ermitteln.

$$\bar{v}_{mom} = \frac{n}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{v_{lokal,j}}} \quad [km/h] \quad (2.18)$$

Den wohl wichtigsten Zusammenhang schildert das Fundamentaldiagramm. Es beschreibt die Beziehung der lokalen Kenngröße Verkehrsstärke zu den momentanen Kenngrößen Geschwindigkeit und Verkehrsdichte, woraus sich folgende Zustandsgleichung ableiten lässt:

$$q = \bar{v}_{mom} \cdot k \quad [Fz/h] \quad (2.19)$$

Im Grunde handelt es sich bei einem Fundamentaldiagramm um eine dreidimensionale Punktwolke [Kühnel, 2011] mit den Achsen q , v und k , welche durch Projektion in drei zweidimensionale Diagramme (Abbildung 4) zerlegt werden kann. Deren Form hängt von den Randbedingungen ab. [Schick, 2003] gibt dafür folgende Bedingungen an:

- Wunschgeschwindigkeit bei freiem Verkehr v_{frei}
- Kapazität C (entspricht der maximalen Verkehrsstärke q_{max} bei optimaler Geschwindigkeit v_{opt} und optimaler Verkehrsdichte k_{opt})
- Maximale Verkehrsdichte im stehenden Verkehr

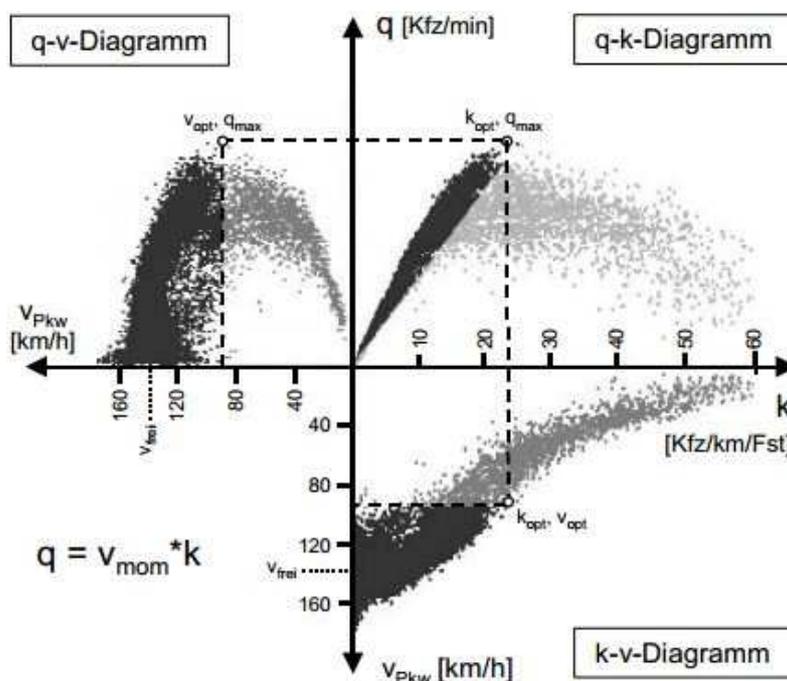


Abbildung 4: Typisches Fundamentaldiagramm [Schick, 2003]

Kontinuitätsgleichung homogener Streckenabschnitte

Analog zur Hydrodynamik kann der Verkehrsfluss einer Fahrtrichtung (genau genommen fahrstreifenfein) als eindimensionales Kontinuum betrachtet werden. Unter Verwendung der zuvor ermittelten Zusammenhänge ergibt sich folgende hydrodynamische Flussbeziehung:

$$\mathbf{q}(x, t) = \mathbf{k}(x, t) \cdot \mathbf{v}(x, t) \quad (2.20)$$

Bei fahrstreifenfeiner Auflösung der Eingangsdaten kann obige Beziehung durch Mittelwertbildung errechnet werden. Gemäß [Treiber; Kesting, 2010] sollte die Berechnung der Mittelwerte bei extensiven Größen, diese ändern sich mit der Größe des Systems, wie Fluss oder Dichte, durch das arithmetische Mittel erfolgen. Im Gegensatz dazu wird bei der Berechnung intensiver Größen, wie beispielsweise bei Geschwindigkeitsdaten, ein gewichtetes Mittel empfohlen

Bei Betrachtung homogener Streckenabschnitte (Abschnitte ohne Zu- oder Abfahrten und gleichbleibender Fahrstreifenanzahl) können sich Veränderungen der Fahrzeuganzahl im betrachteten Abschnitt nur durch Zuflüsse q_{in} und Abflüsse q_{aus} ergeben. Die Änderung der Anzahl der Fahrzeuge im betrachteten Abschnitt ergibt sich somit zu:

$$\frac{dn}{dt} = q_{in}(t) - q_{aus}(t) = \mathbf{q}(x, t) - \mathbf{q}(x + \Delta x, t) \quad (2.21)$$

Aus obiger Beziehung folgt eine sich ergebende Dichteänderung in der betrachteten Umgebung. Mit dem Grenzübergang $\Delta x \rightarrow 0$ lässt sich folgender Zusammenhang ableiten:

$$\frac{\partial \mathbf{k}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x} = \mathbf{0} \quad (2.22)$$

Kinematische Wellen

Unter Berücksichtigung, dass an jeder Stelle x die Verkehrsstärke q eine Funktion der Dichte k ist, ergibt sich unter der Kombination mit der Kontinuitätsgleichung aus Formel 2.20 und unter Anwendung der Kettenregel nachstehende Form, welche auch unter dem Namen Lighthill-Whitham-Richards-Modell (LWR-Modell) bekannt ist.

$$\frac{\partial \mathbf{k}}{\partial t} + \frac{d\mathbf{q}(k)}{dk} \cdot \frac{\partial \mathbf{k}}{\partial x} = \mathbf{0} \quad (2.23)$$

Gemäß [Lighthill; Whitham, 1955] kann bei kleinen Änderungen der Dichte k der Ausdruck dq/dk mit der Ausbreitgeschwindigkeit von Dichteschwankungen c ersetzt werden. Die Lösung der Differentialgleichung besteht aus einer Menge an Geraden. Dabei ist c die Tangente an den aktuellen Zustand in der q-k-Zustandskurve.

Schockwellen

Schockwellen entstehen, wenn einem Verkehrsstrom ein weiterer mit geringerer Dichte nachfolgt, da bei geringen Verkehrsdichten höhere Wellengeschwindigkeiten auftreten als bei höheren Verkehrsdichten. Dieser Dichteübergang schreitet entlang einer Schockfront mit der Schockwellengeschwindigkeit u voran.

$$u = \frac{q_2 - q_1}{k_2 - k_1} = \frac{\Delta q}{\Delta k} \quad [km/h] \quad (2.24)$$

2.1.3 Qualität des Verkehrsablaufs

Um über die Verkehrssituation auch qualitativ eine Aussage treffen zu können, existieren mehrere Ansätze zur Ermittlung der Verkehrsqualität. Die zwei gebräuchlichsten Ansätze finden sich zum einen im deutschen Regelwerk „Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen“ (HBS) und zum anderen im „Highway Capacity Manual“ (HCM), einer Publikation des US-amerikanischen Transportation Research Boards. Das Prinzip der Einteilung des Verkehrsablaufes in die sechs unterschiedliche Qualitätsstufen (Level-of-Service – LOS) A bis F des HCM wurde auch im HBS übernommen. Nachstehend wird auf die beiden Konzepte näher eingegangen.

Abhängig vom Anlagentyp werden in beiden Regelwerken unterschiedliche Kriterien, sog. Maße für die Qualität des Verkehrsablaufes (MQV), zur Bewertung des Verkehrsablaufes herangezogen. Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über die verwendeten Kriterien bezogen auf den jeweiligen Straßentyp.

Tabelle 1: Qualitätskriterien für verschiedene Verkehrsanlagen nach HBS (2001) und HCM (2000)

Art der Verkehrsanlage	HBS (2001)	HCM (2000)
Autobahnabschnitte (freie Strecke)	Auslastungsgrad [-]	Verkehrsdichte [Fz/km]
Planfreie Knotenpunkte-Rampe, Ein- und Ausfahrten	Auslastungsgrad [-]	Verkehrsdichte [Fz/km]
Planfreie Knotenpunkte-Verflechtungsstrecken	Auslastungsgrad [-]	Geschwindigkeit [km/h]
Landstraße	Verkehrsdichte [Fz/km]	Geschwindigkeit [km/h]; Zeitanteil in Kolonnen [-]
Stadtstraße	-	Geschwindigkeit [km/h]
Knotenpunkt mit LSA	Wartezeit [s]	Wartezeit [s]
Knotenpunkt ohne LSA	Wartezeit [s]	Wartezeit [s]

Das LOS-Konzept beschreibt die Qualität eines Verkehrsablaufes als Gütebeurteilung in Form von Qualitätsstufen A bis F. Stufe A repräsentiert die beste, Stufe F die schlechteste Beurteilung. Die Einteilung der Stufen erfolgt anhand des Bedürfnisses des Verkehrsteilnehmers nach Bewegungsfreiheit. Abhängig vom Anlagentypus können im Allgemeinen zwischen folgenden Stufen unterschieden werden:

Tabelle 2: Allgemeine Qualitätsstufen nach HBS (2001)

Stufe A:	Die Verkehrsteilnehmer werden äußerst selten von anderen beeinflusst. Sie besitzen die gewünschte Bewegungsfreiheit in dem Umfang, wie sie auf der Verkehrsanlage zugelassen ist. Der Verkehrsfluss ist frei.
Stufe B:	Die Anwesenheit anderer Verkehrsteilnehmer macht sich bemerkbar, bewirkt aber nur eine geringe Beeinträchtigung des Einzelnen. Der Verkehrsfluss ist nahezu frei.
Stufe C:	Die individuelle Bewegungsmöglichkeit hängt vielfach vom Verhalten der übrigen Teilnehmer ab. Die Bewegungsfreiheit ist spürbar eingeschränkt. Der Verkehrszustand ist stabil.
Stufe D:	Der Verkehrsablauf ist gekennzeichnet durch hohe Belastungen, die zu deutlichen Beeinträchtigungen in der Bewegungsfreiheit der Verkehrsteilnehmer führen. Interaktionen zwischen ihnen finden nahezu ständig statt. Der Verkehrszustand ist noch stabil.
Stufe E:	Es treten ständig gegenseitige Behinderungen zwischen den Verkehrsteilnehmern auf. Bewegungsfreiheit ist nur in sehr geringem Umfang gegeben. Geringfügige Verschlechterungen der Einflussgrößen können zum Zusammenbruch des Verkehrsflusses führen. Der Verkehr bewegt sich im Bereich zwischen Stabilität und Instabilität. Die Kapazität wird erreicht.
Stufe F:	Die Nachfrage ist größer als die Kapazität. Die Verkehrsanlage ist überlastet.

Diese in Tabelle 2 genannten Formulierungen sind allgemein gehalten. Da es sich in dieser Arbeit hauptsächlich um das höchstrangige Straßennetz handelt, spezifiziert folgende Tabelle die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes (QSV) für Autobahnabschnitte außerhalb von Knotenpunkten.

Tabelle 3: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes auf Autobahnen bei ebener Strecke ohne Geschwindigkeitsbeschränkungen nach HBS (2001)

QSV	mittlere Reisezeit der PKW [min/100km]	mittlere Reise- geschwindigkeit der PKW [km/h]	Verkehrsdichte [Kfz/km]	Auslastungsgrad α [-]
A	≤ 46	≥ 130	≤ 8	≤ 0.30
B	≤ 48	≥ 125	≤ 16	≤ 0.55
C	≤ 52	≥ 115	≤ 23	≤ 0.75
D	≤ 60	≥ 100	≤ 32	≤ 0.90
E	≤ 75	≥ 80	≤ 45	≤ 1.00
F	> 75	< 80	> 45	-

2.1.4 Infrastruktureitige Sensorik

Wie in Kapitel 2.1.1 schon erwähnt, existieren diverse Erfassungsmethoden hinsichtlich der verschiedenen Verkehrskennzahlen. Abgesehen von den bewegten Detektoren (Floating Cars), werden die meisten Daten infrastruktureitig erfasst. Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die eingesetzten Sensoren und deren Arbeitsweise. Viele Sensoren erfassen zusätzlich zur Anzahl durchfahrender Fahrzeuge auch deren Fahrzeugklassen gemäß den technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS) 2002, wie sie in folgender Tabelle ersichtlich sind.

Tabelle 4: Fahrzeuggrundklassen nach TLS [BAST, 2002]

Grundklasse	Kurzbezeichnung	Erläuterung
Motorräder	Krad	Motorräder, auch mit Beiwagen, keine Fahrräder, keine Mofas
Pkw	Pkw	Pkw vom Kleinwagen bis zur Großraumlimousine einschließlich der Offroadfahrzeuge
Lieferwagen	Lfw	Lieferwagen $\leq 3,5$ t zul. Gesamtgewicht
Pkw mit Anhänger	PkwA	Kfz bis 3,5 t zul. Gesamtgewicht mit Anhänger (auch Lieferwagen)
Lkw	Lkw	$> 3,5$ t
Lkw mit Anhänger	LkwA	Lkw $> 3,5$ t mit Anhänger
Sattelfahrzeuge	Sattel-Lkw	alle Sattelfahrzeuge
Bus	Bus	Fahrzeuge mit mehr als 9 Sitzplätzen zur Personenbeförderung; auch mit Anhänger
nicht klassifizierbare Kfz	nk Kfz	Alle Kfz, bei denen die Fahrzeugart nicht bestimmbar war oder die keiner der anderen Klassen angehören

Nicht jeder Sensor kann alle der oben genannten Fahrzeuggrundklassen unterscheiden. Aus diesem Grund wird im folgendem zwischen diversen Klassifizierungsgruppen unterschieden:

Tabelle 5: Fahrzeugklassifizierungsgruppen nach TLS [BAST, 2002]

1 Klasse	2 Klassen	5+1 Klassen	8+1 Klassen
Kfz	Pkw-ähnlich	nk Kfz	nk Kfz
		Pkw	Krad
			Pkw
	Lieferwagen		
	Lkw-ähnlich	PkwA	PkwA
		Lkw	Lkw
		LkwA	LkwA
			Sattel-Kfz
Bus	Bus	Bus	

Induktionsschleifen

Eine Induktionsschleife ist eine im Boden verlegte Kabelschleife, welche an einer Wechselspannung hängt. Dadurch entstehen hochfrequente Schwingkreise, welche im unbeeinflussten Zustand die Induktivität L besitzt. Überquert ein Fahrzeug diese Schleife, ändert sich die Induktivität messbar und deren Frequenz. Anhand dieser Änderungen werden Fahrzeuge detektiert, wobei abhängig von der Dimension und der Form der Änderung auf diverse Fahrzeugklassen geschlossen werden kann. So müssen z.B. laut [ASFINAG, 2013] 8+1 Fahrzeugklassen für Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA) auf österreichischen Autobahnen unterschieden werden können.

Mit Induktionsschleifen können aber nicht nur Fahrzeuge gezählt, bzw. der gestaute Verkehrszustand (anhand andauernder Störung der Induktivität) erkannt werden, sondern auch Geschwindigkeiten gemessen werden. Dafür sind allerdings mehrere (üblicherweise 3) Induktionsschleifen hintereinander notwendig. Anhand des Zeitversatzes der Störung jeder einzelnen Schleife kann auf die Geschwindigkeit des Fahrzeuges geschlossen werden. Die Richtlinie gibt im Grunde hierfür eine Forderung von einer unterscheidbaren Geschwindigkeit im Bereich von 1 km/h an.

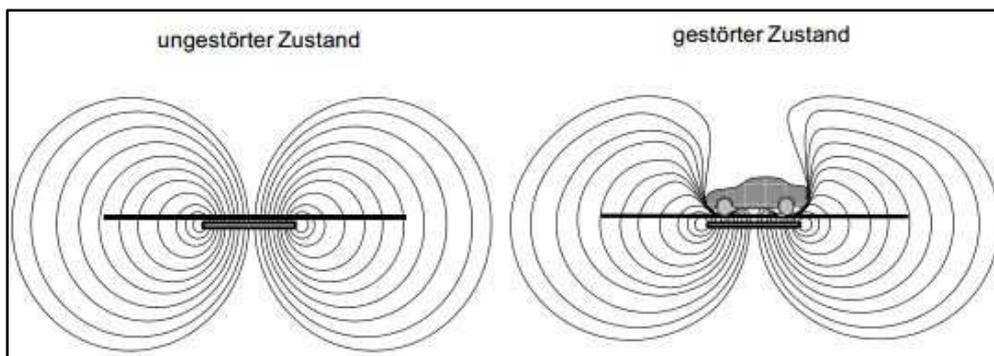


Abbildung 5: Magnetfeldänderung bei Durchquerung eines Fahrzeuges [Kühnel, 2011]

Passive Infrarotsensoren

Passive Infrarotsensoren erfassen Wärmestrahlung im Infrarotbereich, welche von allen Objekten abgegeben wird. Solche IR-Sensoren emittieren keine Strahlung. Im Grunde gibt jeder Körper Wärmestrahlung ab, sofern seine Temperatur über dem absoluten Nullpunkt (0 K ident $-273,15^\circ\text{C}$) liegt. Die emittierte Strahlungsintensität hängt dabei von der Oberflächentemperatur und dem Emissionsgrad des strahlenden Körpers ab. Der Emissionsgrad beschreibt, wie viel Strahlung ein Körper im Verhältnis zum idealen Wärmestrahler, dem schwarzen Körper, emittiert [Baehr; Stephan, 2010].

Laut [Listl, 2003] setzen sich IR-Sensoren aus einem Sensor, einer optischen Einrichtung und einer mikroprozessorgesteuerten Auswerteeinheit zusammen. Die Wärmestrahlung wird durch eine Linse in die Brennebene geleitet und dort in elektrische Signale umgewandelt. Durchquert ein Fahrzeug den Wahrnehmungsbereich des Sensors, wird durch die veränderte Wärmestrahlung das elektrische Signal verändert. Anhand der Änderung kann wieder auf das Vorhandensein eines Fahrzeuges und dessen Fahrzeugklasse geschlossen werden.

IR-Sensoren stellen eine Form der lokalen Querschnittsmessung dar. Heute eingesetzte Sensoren verfügen meist über Mehrkanalsensoren mit deren Hilfe mehrere Detektionszonen überwacht werden können und somit nicht nur die Anwesenheit sondern auch die Geschwindigkeit der Fahrzeuge ermittelt werden können.

Radarsensoren

Bei Radarsensoren handelt es sich um aktive Sensoren, da sie aktiv Signale, üblicherweise auf einer Frequenz von 24,125 GHz, aussenden. Die Detektion von Fahrzeugen basiert auf dem Dopplereffekt. Dieser besagt, dass sich durch eine Relativbewegung bezüglich Sender und Empfänger die Frequenz verschiebt (Dopplerverschiebung Δf). Radarsensoren emittieren ein kontinuierliches Signal (continuous wave – CW-Doppler) mit einer konstanten Frequenz, welches von einem Fahrzeug reflektiert wird. Anhand der Frequenzverschiebung des zurückgeworfenen Signals kann die Geschwindigkeit des Fahrzeuges ermittelt werden. Fährt das Fahrzeug nicht direkt sondern in einem Winkel auf das Gerät zu, so muss dieser Winkel mitberücksichtigt werden.

CW-Doppler-Geräte können nur Fahrzeuge detektieren, wenn sie in Bewegung sind ($v > 0$). Zur Erfassung ruhiger Objekte wird eine Frequenzmodulation (FMCW – frequency modulated continuous wave) eingesetzt.

Automatic Number Plate Recognition – ANPR

Bei ANPR-Systemen handelt es sich um eine Videoüberwachungsmethode, welche KFZ-Kennzeichentafeln mithilfe optischer Zeichenerkennung (optical character recognition – OCR) erkennen kann. Die Erfassung erfolgt über hochauflösende, stationäre Videokameras. Zur Verkehrsdatenerfassung werden sie hauptsächlich zu Reisezeitmessungen verwendet, woraus in weiterer Folge eine mittlere Abschnittsgeschwindigkeit berechnet werden kann. Weitere Anwendung finden solche Systeme bei Mautsystemen, in denen zur Abrechnung keine On-Board-Units (OBU) verwendet werden, bei Zugangskontrollen zu Parksystemen o.Ä. oder zur Erkennung von Gefahrguttabellen.

2.2 Grundlagen – Floating-Objects-Data

Im folgenden Kapitel wird auf die unterschiedlichen Floating-Objects-Data (Daten fließender Objekte) in Bezug auf das Verkehrsgeschehen eingegangen.

2.2.1 Floating Car Data – FCD

Der Begriff „Floating Car Data“ beschreibt Daten, welche aus aktuell im Verkehr mitschwimmenden Fahrzeugen stammt. FC-Daten beinhalten zumindest Orts- und Zeitinformationen des Fahrzeuges, welche in einem zyklischen Abstand aufgenommen und weitergeleitet werden. Zu diesem Zweck sind diese Fahrzeuge mit GPS-Geräten ausgestattet. Abhängig von den eingesetzten GPS-Empfängern können noch weitere Daten wie zum Beispiel die Anzahl der aktuell empfangenen Satelliten oder errechnete Geschwindigkeiten durch Ausnutzung des Dopplereffektes mitüberliefert werden.

Abhängig vom jeweiligen Auswertegrund können diese Daten entweder gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt aufbereitet und analysiert werden (Rekonstruktion) oder sie werden in Echtzeit benötigt. In diesem Fall werden die Daten via GSM oder UMTS an eine FCD-Zentrale übertragen. Dort werden diese Positionsdaten auf ihre Plausibilität überprüft und im Folgenden auf digitale

Straßenkarten angepasst. Aus diesen einzelnen Positionsdaten können nun Trajektorien zur Analyse von Reisezeiten bzw. Geschwindigkeiten für die durchfahrenen Strecken berechnet werden. Gemäß [Körner, 2011] kann durch Vergleich der aktuellen Reisezeiten mit dem Erwartungswert des Straßenabschnittes in weiterer Folge die aktuelle Situation abgeschätzt bzw. Störungen im Verkehrsfluss detektiert werden.

FCD bilden nur eine Stichprobe des Gesamtverkehrsaufkommens, daher kann der tatsächliche Verkehrszustand nicht genau erfasst werden, sondern vielmehr zu einer gewissen Wahrscheinlichkeit abgeschätzt werden. Zur Ermittlung der aktuellen Verkehrslage mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ist es notwendig einen Mindeststichprobenumfang detektiert zu haben. Erst wenn die erforderliche Stichprobengröße erreicht oder überschritten ist, kann eine Aussage mit der definierten Wahrscheinlichkeit getroffen werden.

Als Detektoren werden Fahrzeuge mit einer hohen Fahrleistung herangezogen wie z.B. Taxiflotten oder Zustelldienste. Nach [Leitzke, 2012] können Taxidaten mitunter die Daten verfälschen, da Taxis in einigen Städten Fahrstreifen benutzen dürfen, welche eigentlich für den ÖPNV reserviert sind. Mittlerweile übermitteln sogar manche Navigationsgeräte FCD an ihre Hersteller, wo sie entweder in Echtzeit verarbeitet werden oder für spätere Analysen gespeichert werden. Der Benutzer erhält im Gegenzug aktuelle Verkehrsinformationen bzw. alternative Routenvorschläge um evtl. Stauereignisse umgehen zu können.

2.2.2 Extended Floating Car Data – xFCD

Bei xFCD handelt es sich im Grunde um eine Erweiterung der FCD. Zusätzlich zu den üblichen Standortinformationen, wie sie bei normalen FCD übermittelt werden, werden bei diesem Ansatz gemäß [Leitzke, 2012] auch noch Zustandsinformationen diverser Sensoren der einzelnen Fahrzeuge übertragen. Aus diesen zusätzlichen Informationen des Fahrzeuges wie z.B. Regensensor-, ABS- oder ESP-Daten (siehe Abbildung 6) können zusätzlich zu den üblichen Auswertungen bezüglich Reisezeit und Geschwindigkeiten auch Informationen diverser Umfeldverhältnisse, wie z.B. Regen oder Glätte, extrahiert werden. Eine weitere mögliche Informationsquelle stellen Stereokamerasysteme dar, wie sie bei [Quintero et al., 2011] beschrieben sind. Hierbei geht es um die automatische Erfassung der Fahrzeuge in der Umgebung des Messfahrzeuges. Jene Daten in Kombination mit den zuvor erwähnten können gute Aufschlüsse zur aktuellen Situation liefern.

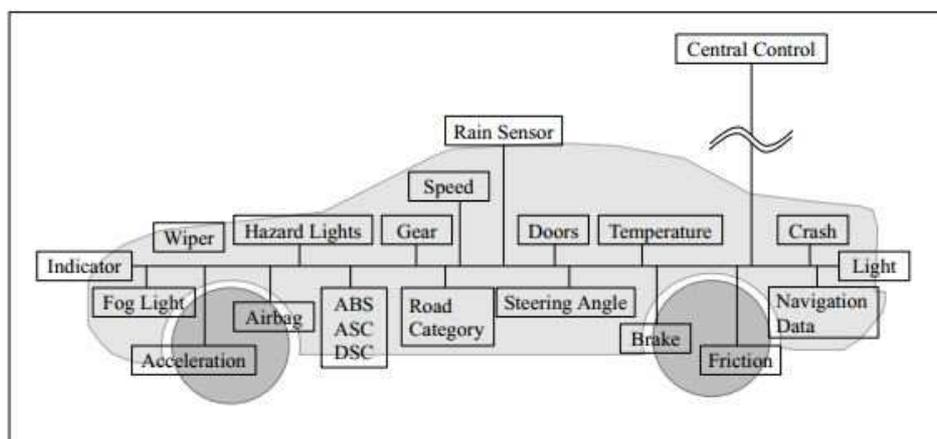


Abbildung 6: xFCD-Systemarchitektur nach [Leitzke, 2012]

2.2.3 Floating Phone Data – FPD

Bei FPD handelt es sich ähnlich wie bei den FCD um nutzergenerierte Verkehrsdaten. Im Allgemeinen besteht der große Unterschied jedoch bei der Genauigkeit der Positionsbestimmung. Während FCD wie auch xFCD direkte und detaillierte GPS-Positionsangaben mit hoher Genauigkeit überliefern, sind FPD in der Regel nur auf zellularer oder Senderpositionsebene (siehe Kapitel 2.4.) bekannt. Abhängig vom Zweck der Analysen können unterschiedliche Ebenen betrachtet werden. Auf der obersten Ebene werden Bewegungen von Benutzern sehr grob aufgelöst betrachtet, allerdings sind lediglich eingeschaltete Endgeräte erforderlich. Andere Analysen können evtl. auch aktive Nutzung des Gerätes (Gesprächs- oder Datendieneste) voraussetzen, welche bei größeren Positionsänderungen sogenannte Handoverprozeduren (Übergabe einer aktiven Gesprächs- oder Datenverbindung von einer Funkzelle in eine andere) auslösen.

Der große Vorteil gegenüber den beiden vorigen Varianten besteht in der hohen Ausstattungsrate mit mobilfunkfähigen Endgeräten, welche gemäß [RTR Telekom Montor, 2012] im zweiten Quartal 2012 bereits eine Penetration von 157% der Bevölkerung erreicht hat. Diese Mobilfunkpenetrationsrate ist eine Kennzahl und beschreibt wie viele aktivierte SIM-Karten jeder Österreicher im Schnitt besitzt. Sie lässt sich aus der Anzahl der aktivierten SIM-Karten dividiert durch die Bevölkerungszahl ermitteln. Allerdings werden auch Unternehmens-SIM-Karten und Machine-2-Machine-SIM-Karten (M2M) auch in die Berechnung miteinbezogen. Dennoch gibt diese Kennzahl einen guten Überblick über das Potenzial mobilfunkgenerierter Daten.

Weitere Möglichkeiten zur Nutzung von FPD sind in der Verwendung verbesserter Ortungsmethoden (siehe Abschnitt 2.4.3) zu finden. Da diese Daten meistens nicht vom Betreiber gesammelt werden, müssen die benutzten Endgeräte für diesen Fall speziell ausgestattet werden. Somit können wiederum nur die ausgestatteten Mobiltelefone detektiert werden.

2.3 Gegenüberstellung der Methoden

Induktionsschleifen gehören zu den verbreitetsten Methoden der Verkehrserfassung. Ihre Beliebtheit verdanken sie unter anderem ihrer hohen Erfassungsqualität sowie der Vielzahl möglicher Anwendungen. Da die Schleifen eine unterirdische Verlegung erforderlich macht, sind deren Kosten höher als bei anderen lokalen Messmethoden. Radarsensoren sind vor allem aufgrund ihrer geringen Kosten beliebt und werden beispielsweise auch zur Geschwindigkeitsüberwachung eingesetzt. ANPR-Systeme hingegen haben dzt. aufgrund ihrer hohen Investitionskosten noch keine hohe Verbreitung, wobei deren Potenzial wegen der Kombination aus lokaler und streckenbezogener Verkehrserfassung auf jeden Fall gegeben ist. Alternativ werden zur Ermittlung streckenbezogener Daten lieber auf Floating-Objects-Daten zurückgegriffen. Herkömmliche FC sind bereits in vielen Regionen unterwegs und liefern Daten, welche entweder in Echtzeit oder für spätere Analysen herangezogen werden können. Im Gegensatz zu den lokalen Methoden, welche jedes Fahrzeug erfassen und somit den Verkehrszustand im lokalen Bereich genau erfassen können, geben FC immer nur Informationen über ihre Umgebung zum aktuellen Zeitpunkt wieder. Daraus folgt, dass zu einer vollständigen Überwachung einer Region ständig FC unterwegs sein müssen. Ebenso verhält es sich bei xFCD. Da diese viel mehr an Informationen liefern können, können auch mit weniger Daten gute Ergebnisse erzielt werden. Im Gegenzug müssen die Fahrzeuge dementsprechend ausgerüstet sein um die Daten in sinnvoller Qualität liefern zu können. FPD können hier Aushilfe schaffen. Abhängig vom Untersuchungsgegenstand bzw. der gewünschten Genauigkeit der Informationen kann schon

das eingeschaltete Mobiltelefon als mobiler Sensor angesehen werden. Im Idealfall sind mehrere Datenquellen vorhanden. Sofern diese aus unterschiedlichen Erfassungsmethoden stammen, müssen diese Daten fusioniert werden. Geeignete Fusionsalgorithmen sind z.B. bei [Treiber, Kesting, 2010] zu finden.

2.4 Grundlagen im Mobilfunk

Laut [LNT/TUM, 2013] stand in Deutschland bereits 1958 das erste analoge Netz in Betrieb. In den 1970er und 80er Jahren bildeten sich in etlichen europäischen Ländern diverse Standards zur mobilen Kommunikation. Vor allem geringe Kapazitäten und uneinheitliche europäische Systeme charakterisierten diese Standards. Daher wurde 1982 die erste GSM-Arbeitsgruppe einberufen, deren Ziel ein globaler Mobilfunkstandard war.

Seit dem Jahr 2000 wird der Fortschritt bei der Entwicklung von GSM über GPRS, UMTS bis hin zu LTE vom „3rd Generation Partnership Project (3GPP)“ betrieben. Dieses vereint sechs Entwicklungsorganisationen, welche in vier technischen Spezifizierungsgruppen an neuen Standards zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit im Mobilfunknetz arbeiten. Diese Änderungen und Vorschläge werden gesammelt und später als „Release“ veröffentlicht [3GPP, 2013].

Um sich nun von der Funktionsweise eines Mobilfunknetzes ein besseres Bild machen zu können, soll der folgende Abschnitt einen groben Überblick über die technischen Hintergründe sowie die Systemarchitektur eines Mobilfunknetzes geben.

2.4.1 Global System for Mobile Communications - GSM

GSM (Global System for Mobile Communications bzw. bis 1991: Groupe Spécial Mobile) ist ein Standard im Bereich der digitalen zellularen Telefonie. Es ist der erste Standard der zweiten Generation (2G). Weltweit wird der Großteil aller mobilen Verbindungen auf diesem Standard aufbauend ausgeführt. Das GSM-Netz selbst besitzt eine hierarchische Systemarchitektur und besteht aus den drei Teilbereichen: Mobile Station (MS), Base Station Subsystem (BSS) und dem Network Switching Subsystem (NSS).

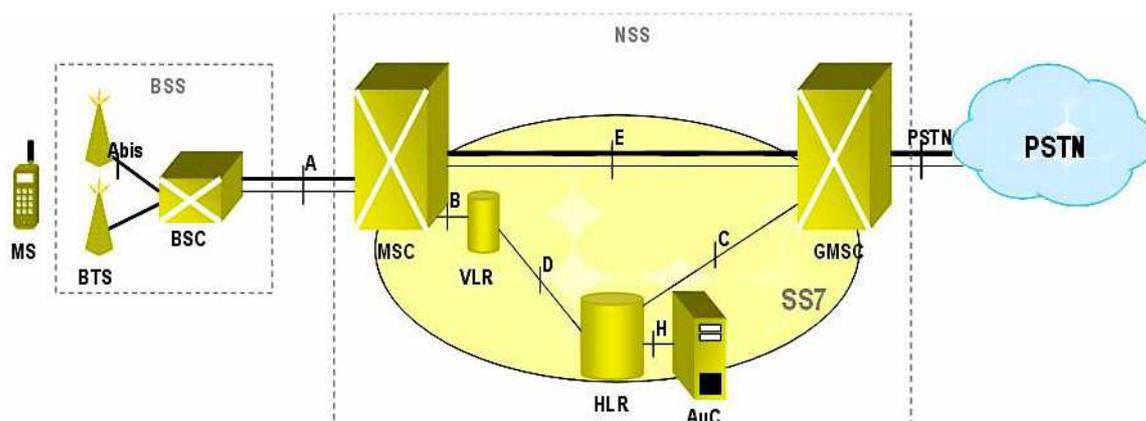


Abbildung 7: GSM-Systemarchitektur (ohne GPRS) [Conningtech.Wordpress, 2012]

Mobile Station

Bei der Mobile Station handelt es sich um die Kombination aus dem Mobile Equipment ME (Handy, Smartphone) und dem Subscriber Identity Module (SIM). Bei dem SIM handelt es sich eigentlich um

eine Prozessorchipkarte, welche netzspezifische Informationen enthält und dazu dient den Nutzer im Netz identifizieren zu können. Für diese Identifikation ist auf dem SIM die sogenannte International Mobile Subscriber Identity (IMSI) gespeichert. Dabei handelt es sich um eine maximal 15-stellige Nummer, welche weltweit genau einmal vergeben wird. Auch das ME besitzt eine eindeutige Kennung: die International Mobile Station Equipment Identity (IMEI).

Base Station Subsystem

Das Base Station Subsystem ist verantwortlich für den Umgang mit den Daten und der Signalisierung zwischen der Mobile Station und dem Network Subsystem. Das BSS besteht aus zwei Elementen: der Base Transceiver Station (BTS) und dem Base Station Controller (BSC).

Die BTS ist die Funkbasisstation. Sie beinhaltet die Ausrüstung zum Empfangen und Übertragen von Radiowellen, da die Kommunikation zwischen MS und BTS über die Um-Schnittstelle (Luft-Schnittstelle) erfolgt. Eine BTS besitzt (meist) 3 Sektorantennen, welche einen Bereich von jeweils 120° abdecken. Die Reichweite hängt von ihrem Standort bzw. ihrer Sendeleistung ab. In städtischen Gebieten kann dies ein paar hundert Meter, in dünn besiedelten, ländlichen Gebieten kann die Reichweite bis zu 35 km betragen (technische Grenze). Die Fläche, welche von einer einzelnen BTS abgedeckt wird, nennt sich Funkzelle. Sie ist die gleichzeitig die kleinste Einheit im GSM-Netz. Mehrere Funkzellen werden zu einer Location Area (LA) zusammengefasst, wobei meistens alle Funkzellen eines BSC zu einer LA vereint werden. Der BSC überwacht die Funkverbindungen der an ihm angeschlossenen BTS und steuert diese. Die Kommunikation zwischen BTS und BSC erfolgt über die A-bis-Schnittstelle

Network Switching Subsystem

Das NSS ist ein Teil des GSM-Systems, welches Gesprächs- und Datenverbindungen verbindet und für das Mobilitätsmanagement zwischen einzelnen BSS zuständig ist. Die Hauptkomponenten des NSS sind: das Mobile Switching Centre (MSC), das Visitor Location Register (VLR) und das Home Location Register (HLR).

Das MSC ist das zentrale Element des NSS. Es agiert als digitale Vermittlungsschnittstelle zwischen dem eigenen Funk- und dem Festnetz bzw. fremden Funknetzen. Dafür führt es alle notwendigen Funktionen aus, um leistungsvermittelnde Dienste von und zu den ihm unterstellten BSS zu führen. Zusätzlich übernimmt das MSC die Aufgaben der Authentifizierung und Registrierung der Benutzer und die Detektion von Ortsveränderungen (Location Updates). Die Kommunikation zwischen MSC und dem BSC läuft über die A-Schnittstelle.

Die zwei wichtigsten Datenbanken im GSM-Netz sind das Visitor Location Register (VLR) und das Home Location Register (HLR). Das HLR ist eine zentrale Datenbank in dem jeder Teilnehmer mit seinen statischen (IMSI, Rufnummer, etc.) und den relevanten temporären Daten (aktuelle VLR und MSC) gespeichert wird. Jedem MSC ist eine VLR zugeordnet. Im VLR sind die HLR-Daten aller MS gespeichert, welche sich momentan im Verwaltungsgebiet des ihm zugewiesenen MSC aufhalten. Zusätzlich steuert das VLR die Zuordnung der Roamingnummern der MS und der TMSI. Wechselt ein Nutzer den Aufenthaltsbereich (LA) innerhalb eines MSC, so wird auch das VLR aktualisiert. Grundsätzlich dient das VLR zur Entlastung des HLR. In manchen Mobilfunknetzen existiert noch eine weitere Datenbank: das Equipment Identification Register (EIR). In dieser Datenbank können IMEIs von gestohlenen MEs gespeichert werden. Beim Anmeldeversuch eines Nutzers kann nun dessen

IMEI überprüft werden. Bei Übereinstimmung kann diesem Teilnehmer der Zugang zum Netz verweigert werden.

Zwei weitere Elemente des NSS sind das Authentication Center (AuC) und das Gateway Mobile Switching Centre (GMSC). Das AuC ist für die Authentikation des SIM im GSM-Netz sowie in weiterer Folge für die Verschlüsselung der Kommunikationsdaten zuständig. Beim GMSC handelt es sich um die Vermittlungsstelle zwischen dem eigenen Netz und dem Festnetz bzw. den anderen Mobilfunknetzen.

Zellen und deren Struktur

Wie schon zuvor erwähnt, ist das GSM-Netz zellular aufgebaut. Eine Funkzelle entspricht in der Regel jenem Bereich, welcher von einer Basisstation aus abgedeckt wird. Handelt es sich bei dem Sender um eine Sektorantenne (Regelfall), kann die einzelne Funkzelle zusätzlich noch nach ihrem Zellsektor unterteilt werden. Mit dieser sektoriellen Gliederung können von einer Basisstation richtungsabhängig unterschiedliche Sendeleistungen betrieben werden.

Der Versorgungsbereich einer Basisstation und somit die Größe einer Funkzelle hängt im GSM-Netz vor allem von der Sendeleistung, den geographischen Verhältnissen und den Beziehungen zu den benachbarten Basisstationen ab. Zur übersichtlichen und einfachen Darstellung und zum besseren Verständnis eines Mobilfunknetzes wird dieses gerne durch Sechsecke dargestellt, welche sich aus der Überlappung der einzelnen Reichweitenradien der Basisstationen ergeben (siehe Abbildung 8 - rechts).

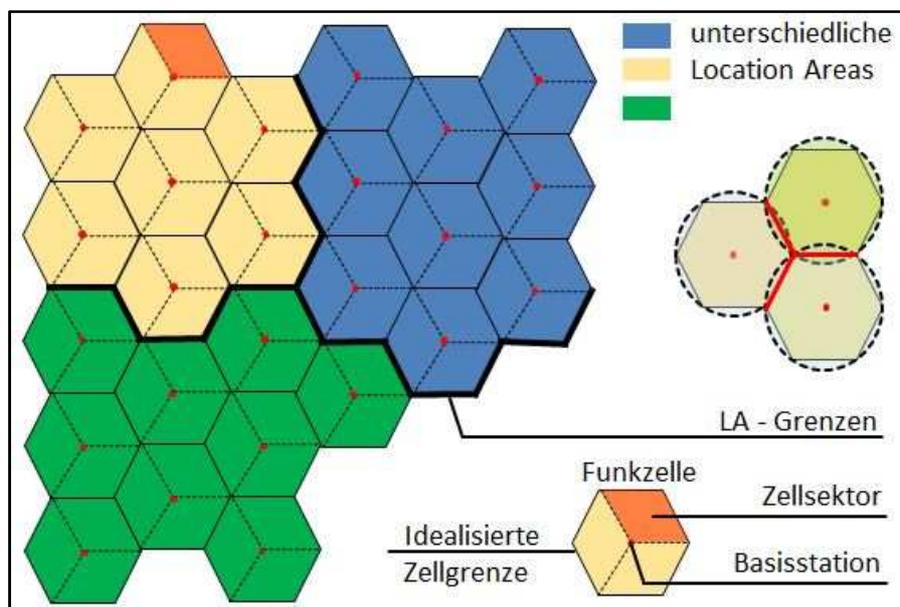


Abbildung 8: Idealisierte Zellstruktur in Mobilfunknetzen

Generell kann zwischen drei verschiedenen Zelltypen unterschieden werden: Makro-, Mikro und Picozellen. Makrozellen besitzen die größte Reichweite (1 - 35 km Horizontalradius). Diese werden oft zur Abdeckung von wenig besiedelten Gebieten eingesetzt. Mikrozellen sind deutlich kleiner als Makrozellen (Reichweite bis 2km) und werden vor allem in urbanen Gebieten aufgrund der höheren Bevölkerungsdichte eingesetzt. Der kleinste Zelltypus ist die Picozelle (Reichweite bis 200m). Diese werden hauptsächlich in Bereichen sehr hoher Belastungen, wie diese z.B. in Kaufhäusern vorkommen, verwendet.

Bewegen sich Nutzer im Netz, werden sie automatisch von jener Basisstation versorgt, welche hinsichtlich Signalqualität- und –stärke für am Idealsten ist. Befindet sich ein Nutzer im aktiven Modus (dedicate mode), so ist für die Zellübergabe (Handover) aus einer Funkzelle in die nächste viel Kommunikation im Netz notwendig. Diese notwendige Kommunikation vervielfacht sich für sehr schnell bewegte MSs, insbesondere in Mikro- oder Picozellbereichen. Um in weiterer Folge die notwendige Kommunikation im Netz zu minimieren, werden solche User auf übergeordnete Schirmzellen (umbrella cells) übergeben (siehe Abbildung 9). Nach Beendigung der aktiven Nutzung bzw. Rückkehr in den idle-mode wird der User wieder in die nächstbeste Mikrozelle übergeben.

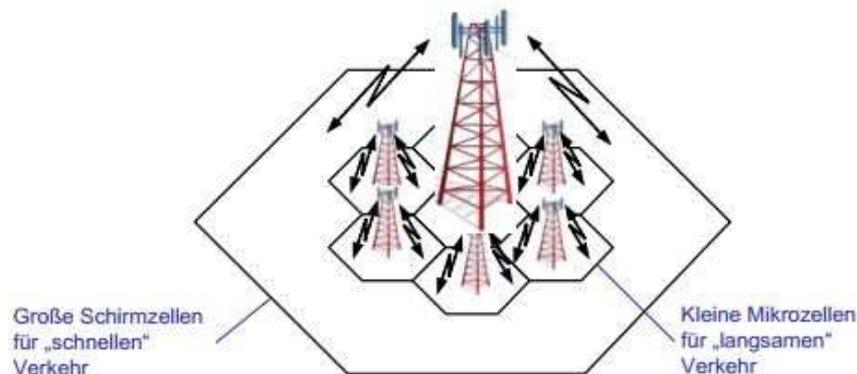


Abbildung 9: Schirmzellenprinzip [Linauer, 2005]

Handover

Das Verfahren der Übergabe einer aktiven Gesprächs- oder Datenverbindung aus einer Funkzelle in eine andere nennt sich Handover (bzw. Hand-off). Der Grund für solch eine notwendige Übergabe liegt in der Verschlechterung der Stärke und/oder der Qualität des Signales, meist im Zusammenhang mit einer bewegten MS. Zur Feststellung einer solchen Abnahme werden im GSM-Netz vom mobilen Endgerät ständig Messungen der Empfangsstärke des sog. Broadcast Control Channel (BCCH) der jeweils aktuellen und der benachbarten Zellen durchgeführt und an die eigene BTS zurückgesendet.

Diese Messungen enthalten Informationen über die Qualität und die Stärke des empfangenen Signals der Home-BTS sowie die Pegel der benachbarten Zellen. Die Home-BTS hängt ihrerseits noch Informationen über Entfernung zur MS (über Timing Advance siehe Kapitel 2.4.3) und Interferenzlevels an und gibt laut [HUT, 2002] diese Informationen an die BSC weiter.

Handover können nach ihrer Art bzw. den beteiligten Netzelementen unterschieden werden, wobei nur mit Ausnahme des Intra-Cell Handovers (Wechsel der Frequenz oder des Zeitschlitzes innerhalb der gleichen Zelle um Gleichkanalstörungen zu umgehen) immer ein Wechsel in eine neue Zelle erfolgt.

Fällt die Signalstärke und/oder –qualität unter ein Mindestkriterium, kann die vorhandene Verbindung nicht mehr aufrechterhalten werden. Existiert zu diesem Zeitpunkt eine alternative BTS in Reichweite, welche ein besseres Signal bietet, wird die Verbindung an diese übergeben.

Ein weiteres Kriterium ist das Power-Budget-Kriterium. Falls die Signalstärke (RXLEV) der BTS einer Nachbarzelle eine um ein Mindestmaß (HO_MARGIN) bessere Signalstärke aufweist, kann die Handoverprozedur eingeleitet werden. Dafür muss das Signal der aktuellen BTS nicht zwangsläufig das Minimalkriterium erreichen. Trifft das Mindestmaß auf mehrere BTS zu, wählt das MSC die beste neue BTS. Abbildung 10 soll diesen Vorgang verdeutlichen.

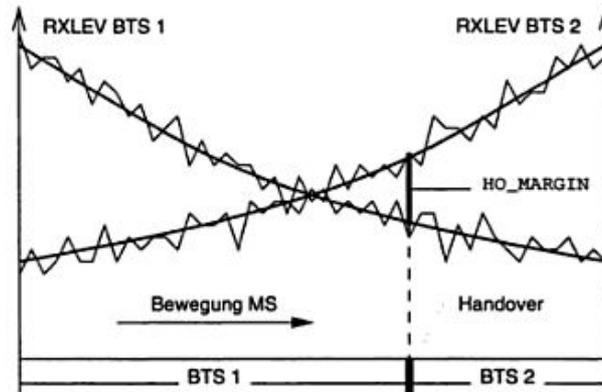


Abbildung 10: Handover aufgrund Power-Budget [Walke, 2000]

Ein Problem welches relativ häufig vorkommt, nennt sich Pingpong-Handover. Hierbei wechselt die MS gemäß [Walke, 2000] die Zelle und kehrt innerhalb kurzer Zeit ($< 10 \text{ sec}$) wieder zurück. Verantwortlich dafür ist meist das Power-Budget-Kriterium. Im Normalbetrieb beträgt das Mindestmaß der Pegeldifferenz HO_MARGIN ca. 5 – 10 dB. Abschattungen aufgrund von Hindernissen führen jedoch zu Pegeleinbrüchen von bis zu 30 dB. Sei nun eine MS in einem ansonst gut versorgten Gebiet und wird nun ein Hindernis die Signalstärke der aktuellen, nicht jedoch einer alternativen BTS, stark eingeschränkt, wird ein Handover durchgeführt. Verlässt die MS diesen Abschattungsbereich wieder, wird die MS wieder zurück an die alte Zelle übergeben.

General Pocket Radio Service – GPRS

Bei GPRS, welches auch oft als das 2.5G-Netz bezeichnet wird, handelt es sich um eine Erweiterung des GSM-Netzes. Zur Nutzung von GPRS sind keine zusätzlichen Basisstationen notwendig. Der größte Unterschied zum leitungsorientierten GSM-Netz liegt in der paketorientierten Datenübertragung. D.h. der Übertragungskanal wird nicht in mehrere Teile unterteilt und den Benutzern fest zugeordnet. Stattdessen werden die Daten hintereinander über denselben Übertragungskanal gesendet. Dies ermöglicht zwar nur einem Benutzer das Übertragen der Daten, im Gegenzug kann jener aber auf die volle Bandbreite des Übertragungskanals zugreifen, somit deutlich schneller Daten übermitteln und den Kanal wieder freigeben. Da es bei diesem System keine festen Kanaluweisungen gibt, muss jedes Datenpaket Informationen über seinen Sender und einen Empfänger beinhalten.

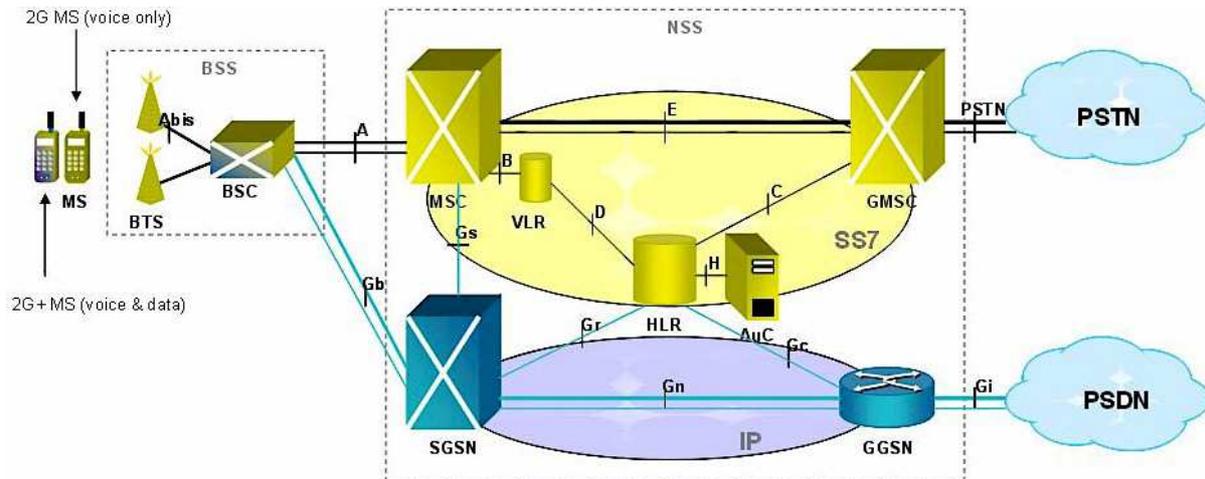


Abbildung 11: GSM/GPRS-Systemarchitektur [Conningtech.Wordpress, 2012]

Wie in Abbildung 11 zu erkennen ist, muss das GSM-Netz um zwei Komponenten erweitert werden: dem Serving GPRS Support Node (SGSN) und dem Gateway GPRS Support Node (GGSN). Der SGSN ist das GPRS-Pendant zum GSM-MSC. Er verwaltet den Datenverkehr für die unter seiner Obhut stehenden BSC, arrangiert das Einbuchen für GPRS-Dienste, entscheidet über den Wechsel von Funkzellen und organisiert das Routing der Daten von bzw. zur MS. Der GGSN ist das Bindeglied zwischen dem GPRS-Netzwerk und dem Internet. Er ist zuständig für den Aufbau der Verbindung und der Vergabe der IP-Adressen.

GPRS und GSM teilen sich die acht Time-Slots einer Frequenz einer Basisstation. Somit ist die Datenübertragungsrate auch von der Anzahl der genutzten bzw. zugeteilten Sprachkanäle abhängig. Die Zuweisung ist betreiberabhängig bzw. kann laut [Sauter, 2011] auch dynamisch erfolgen. Eine Anwendung, welche durch GPRS erstmals ermöglicht wurde, ist der Multimedia Messaging Service (MMS). MMS galt als der Nachfolger des Short Message Service (SMS). Die beiden Systeme unterscheiden sich jedoch grundlegend. Während das SMS im GSM-Netz integriert sind, baut das MMS auf dem IP-Protokoll auf und kann somit über jedes andere IP-Transportmedium übertragen werden.

Eine weitere Methode zur Steigerung der Datenübertragungsrate nennt sich Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE). Die Netzarchitektur von EDGE ist im Wesentlichen dieselbe wie die des GPRS-Standards. Der einzige relevante Unterschied besteht in der Einführung eines zusätzlichen Modulationsverfahrens.

2.4.2 Universal Mobile Telecommunication Systems – UMTS

UMTS ist der nächste Schritt bei der Entwicklung mobiler Kommunikationsnetzwerke. Bei UMTS handelt es sich um eine Vereinigung von leitungsvermittelnden Sprach- und paketorientierten Datendiensten. Allerdings baut UMTS im Gegensatz zu GPRS nicht mehr vollständig auf dem GSM-Netz auf.

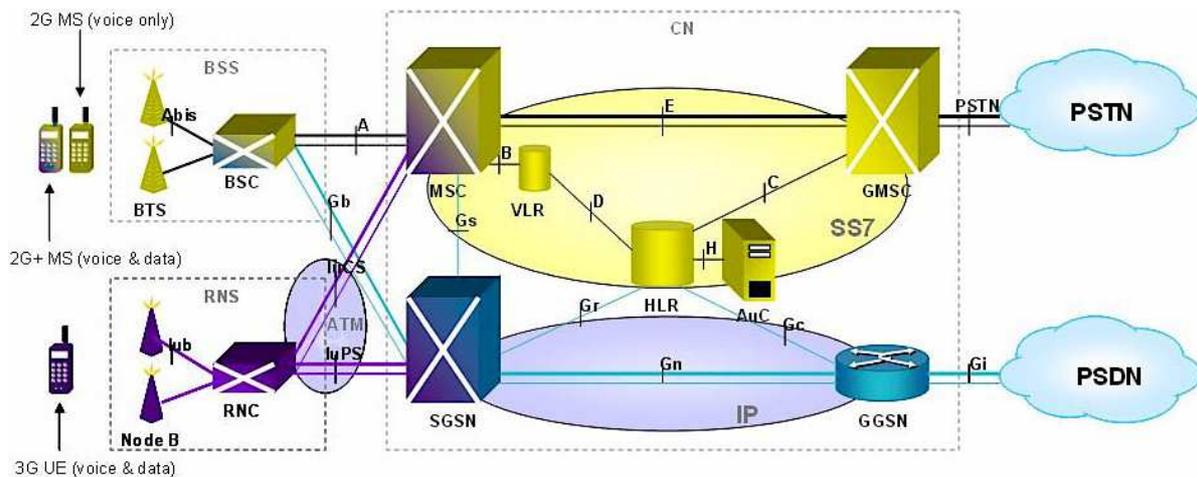


Abbildung 12: UMTS-Systemarchitektur (Release 99) [Conningtech.Wordpress, 2012]

Das Kernnetzwerk (Core Network – CN) entspricht bei UMTS dem ursprünglichen GSM-GPRS-Netzwerk und wird (zumindest für die ersten UMTS-Veröffentlichungen des 3gpp-Standards) nur softwareseitig adaptiert. Der zentrale Unterschied liegt im völlig neu gestalteten Zugangnetz (UMTS Terrestrial Radio Network – UTRAN). Das Konzept von Basisstationen mit den verwaltenden Controllern wurde übernommen, doch im Gegensatz zu GSM, welches auf einem Zeit- und Frequenzmultiplexverfahren aufbaut, benützt UMTS ein Codemultiplexverfahren (Code Division Multiple Access – CDMA). Bei diesem Verfahren können alle Teilnehmer auf derselben Frequenz zeitlich unabhängig senden und empfangen. Zur Unterscheidung der Daten werden die zu übertragenden Informationen je nach Nutzer mit einem sogenannten Spreizfaktor multipliziert. Bei Kenntnis des Spreizcodes können die ursprünglichen Daten wieder identifiziert werden. Die Daten anderer Nutzer scheinen bloß als Hintergrundrauschen auf.

Wie schon erwähnt, wird das Grundprinzip von Basisstationen und dem übergeordneten Controller übernommen. Node-B stellt hierbei die Äquivalenz zur GSM-Basisstation dar. Das UMTS-Gegenstück zur Mobile Station ist das User Equipment (UE). Das Pendant zum SIM im GSM-Netz ist hier das Universal Subscriber Identity Module (USIM). Der Kern des UMTS-Netzwerkes ist der Radio Network Controller (RNC), welcher als Gegenstück zum BSC im GSM-Netz fungiert und im Großen dieselben Aufgaben übernimmt. Des Weiteren übernimmt der RNC die Verwaltung der CDMA-Codes und die Handoversteuerung. Eine weitere Neuerung gegenüber dem GSM-Netz stellt die Möglichkeit der Vernetzung einzelner RNCs über die Iur-Schnittstelle dar. Dies ermöglicht den sogenannten Soft-Handover (SHO). Dabei handelt es sich um eine Funktionsfähigkeit im UMTS-Netz, welche es einem Nutzer während eines Gesprächs erlaubt in mehreren Zellen gleichzeitig angemeldet zu sein. Somit kann ein Verbindungsabbruch bei fortschreitender Bewegung aufgrund Zellwechsels in jedem Fall ausgeschlossen werden.

Ein weiteres Thema, welches für CDMA-basierte Netze, insbesondere für das UMTS-Netz von Bedeutung ist, betrifft die Leistungssteuerung. Da die Nutzer im UMTS-Funknetz auf der gleichen Frequenz kommunizieren, überlagern sich die Daten der einzelnen Teilnehmer. Je mehr Teilnehmer mit der Basisstation kommunizieren, desto größer werden die Interferenzen auf der verwendeten Frequenz. Dies würde die Zuordnung der Datenquelle bzw. -ziele erschweren und zu erhöhten Fehlerraten führen. Um diesem Problem zu entgegnen wird die erforderliche Sendeleistung für weiter entfernte Nutzer erhöht. Nun hebt sich deren Signal wieder deutlicher vom Rauschen ab. Dieser Effekt wird Near-Far-Effekt genannt. Die Sendeleistung kann aber nicht beliebig erhöht

werden (Maximale Sendeleistung von UMTS-Geräten in Europa auf 0.25 Watt limitiert). Somit hat dies zur Folge, dass mit Zunahme der Teilnehmer im Netz und der damit einhergehenden notwendigen Zunahme der erforderlichen Sendeleistung für entferntere Nutzer, der Umgebungsradius, welcher mit maximaler Sendeleistung eines UMTS-Gerätes abgedeckt werden kann, schrumpft. Folglich haben UMTS-Zellen im Gegensatz zum GSM-Netz keine scharfen Zellgrenzen. Dieser Umstand wird gemäß [Sauter, 2011] auch als Zellatmung (cell breathing) bezeichnet. Abbildung 13 verdeutlicht diesen Vorgang. Mit zunehmender Anzahl von Benutzern sinkt die Reichweite progressiv, während gleichzeitig das Signalrauschen ebenfalls progressiv zunimmt.

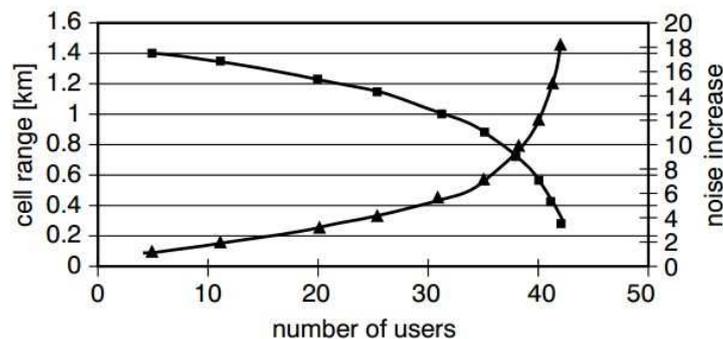


Abbildung 13: Zellatmung und Signalrauschen in UMTS-Netzen [Katrein, 2013]

High Speed Packet Access – HSPA

Eine weitere Entwicklung des UMTS-Standards stellt HSPA dar und wurde zur Steigerung der Datenübertragungsraten entwickelt. Hierbei wird zwischen dem „High Speed Uplink Packet Access (HSUPA)“, also der Kommunikation zur Basisstation hin, und in Gegenrichtung dem „High Speed Downlink Packet Access (HSDPA)“ unterschieden.

HSDPA wurde bereits ab dem 3gpp-Release 5 im ersten Quartal 2002 vorgestellt. Bei HSDPA wurde gemäß [Sauter, 2011] dem UMTS-Netz ein neuer Transportkanal hinzugefügt (High Speed Physical Downlink Shared Channel HS-PDSCH) auf dem der Datentransfer stattfindet. Zur Steigerung der Übertragungsgeschwindigkeit sind mehrere Methoden spezifiziert. Eine Methode betrifft die Modulation der Signale. Schon im UMTS-Standard (Release 99) wurde die QPSK-Modulation eingeführt, welche es erlaubt zwei Bits pro Übertragungsschritt zu übermitteln. Bei HSDPA wird die „Quadrature Amplitude Modulation“ (QAM) verwendet. Dabei handelt es sich um eine Kombination aus Phasen- und Amplitudenmodulation, also der Veränderung der Amplitudenhöhen und der Phasenverschiebung des Signales zur Übertragung mehrerer Bits pro Übertragungsschritt. HSDPA verwendet 16- und 64-QAM, somit können 4 bzw. 6-Bits gleichzeitig übertragen werden. Eine weitere Neuerung in HSDPA ist die Möglichkeit eines Nutzers auf einer Frequenz zeitgleich mehrere Datenströme senden zu können (Multiple Input, Multiple Output MIMO). Die in Realität erreichbaren Übertragungsraten hängen davon ab, welche dieser oben genannten Spezifizierungen das Endgerät unterstützt.

HSUPA wurde erstmals im 3gpp-Release 6 im vierten Quartal 2004 spezifiziert. HSUPA führt einen neuen Transportkanal ein, den „Enhanced dedicated channel“ (E-DCH). Ebenso führt HSUPA ein neues Verfahren der dynamischen Bandbreitenregelung ein. Im Unterschied zum Downlink werden im Uplink aufgrund der geringeren Sendeleistung 1-bit-Modulationsverfahren verwendet.

Long Term Evolution – LTE

Im Grunde ist LTE der Nachfolger von UMTS und wird oft als 3.9G bezeichnet. Da sich CDMA nicht für größere Bandbreiten (UMTS-Bandbreite 5 MHz) eignet, verwendet LTE ein neues Übertragungsverfahren, das sogenannte „Orthogonal Frequency Division Multiplexing“ (OFDM). Nach [Sauter, 2011] wird dabei der Datenstrom mit hoher Datenrate in langsamere Teildatenströme aufgeteilt. Diese werden wie zuvor beschrieben moduliert und danach separat übertragen. Ein entscheidendes Kriterium für die richtige empfängerseitige Demodulation ist hierbei die Orthogonalität der Trägerfunktionen.

Eine weitere Neuerung im LTE-Netz stellt die Verwendung des paketvermittelnden Internet-Protokolls (IP) auch im sprachvermittelnden Kernnetz (CN) dar. Lediglich der SMS-Dienst bleibt weiterhin leitungsvermittelnd.

Die Verwendung von LTE setzt auch endgerätseitig viel voraus. War z.B. das MIMO-Konzept in UMTS endgeräteseitig optional, ist diese Fähigkeit im LTE-Netz eine Voraussetzung, wie auch die Unterstützung der schnellen 64-QAM. Des Weiteren müssen (wie bei den zuvor beschriebenen Standards auch) die Geräte universell einsetzbar sein und daher auch alle älteren Generationen ab 2G unterstützen.

LTE-Advanced stellt eine optimierte Version von LTE dar und wird häufig als das „echte“ 4G bezeichnet. Ein Hauptziel von LTE-Advanced ist die Optimierung der spektralen Effizienz, also dem Verhältnis der Datenübertragungsrate zur Frequenz und somit die Steigerung der Übertragungsraten. Dies kann z.B. durch die asymmetrische Nutzung der Frequenz für Down- und Uplink erfolgen. Die LTE-Advanced-Spezifizierung erfolgte im Release 10 im ersten Quartal 2011.

2.4.3 Ortungsmethoden

Zur Ortung von Mobiltelefonen im GSM-Netz existieren diverse Ansätze, welche über unterschiedliche Eingangsdaten verfügen. Das folgende Kapitel soll einen Überblick über die diversen technisch möglichen Methoden geben.

Zellortung

Die einfachste Ortung im Bereich des Mobilfunks ist die Zellortung. Wie schon in Abschnitt 2.4.1 erwähnt, ist das GSM-Netz zellular aufgebaut. Während aktiver Verbindungen (dedicated mode) ist netzseitig die Base Transceiver Station und somit die Cell-ID bekannt. Anhand der Kenntnis über die Sendereichweite kann der Standort des GSM-Endgerätes zellgenau bestimmt werden. Im Falle eines inaktiven GSM-Endgerätes (idle mode) findet der Austausch der Zellinformationen nur im Abis-Interface statt. Am A-Interface ist lediglich die aktuelle Location Area bekannt.

Signalstärkenmessung

Bei diesem Verfahren, dem sogenannten Received Signal Strength (RSS) Verfahren, werden die Signalstärken zu den in der Nähe befindlichen Basisstationen gemessen. Mit steigender Entfernung nimmt die empfangene Feldstärke quadratisch ab. Anhand der gemessenen RSS-Werte kann auf die Entfernung zur Basisstation geschlossen werden, wobei die abgestrahlte Leistung der Basisstation gemäß [Lipinski, 2012] bekannt sein muss. Wenn die Signalstärken an bekannten Referenzpunkten bekannt ist, kann die Genauigkeit erhöht werden.

Signallaufzeitmessungen

Timing Advance (TA)

Eine weitere Methode mobile Endgeräte zu orten ermöglicht die Signallaufzeit zwischen der Mobile Station und den Basisstationen. Diese muss berechnet werden, da bei GSM-Verbindungen Zeitmultiplexverfahren (TDMA) Anwendung finden, d.h. jeder Kanal wird in acht Zeitschlitze zu je $577\mu\text{s}$ eingeteilt, damit auf der gleichen Frequenz mehrere User gleichzeitig senden bzw. empfangen können. Dabei ist festgelegt, dass die Antwort der Mobile Station auf das Signal der Basisstation drei Zeitschlitze später erfolgt. Nachdem sich der User aber in unterschiedlichen Abständen zur Basisstation befinden kann, muss diese Entfernung über die Signallaufzeit (Hin und Retour) eingerechnet werden, damit die Antwort der Mobile Station eben genau diese drei Zeitschlitze später an der Basisstation ankommt und weitergeleitet werden kann. Dieser Wert nennt sich Timing Advance (TA). Er kann einen Wert zwischen 0 und 63 erreichen, wobei dies gemäß [3GPP TS 05.10, 2003] einem Vielfachen der Bitdauer von $48/13\mu\text{s}$ entspricht. In Entfernungen ausgedrückt ergeben sich somit Entfernungsklassen in 550m Schrittweiten.

Time of Arrival (TOA)

Eine alternative Methode nennt sich Time of Arrival (TOA). Hierbei wird ein synchrones Signal von mindestens drei Basisstationen zur selben Zeit an die Mobile Station gesendet. Aufgrund der unterschiedlichen Entfernungen zwischen der Mobile Station und der Basisstation kommen die Signale etwas zeitversetzt an. Anhand des Zeitunterschiedes zwischen dem Senden und Empfangen des Signals und Division durch die Signalausbreitungsgeschwindigkeit ergibt sich die Entfernung zu den einzelnen Basisstationen, woraus wiederum auf den Aufenthaltsort geschlossen werden kann. Der größte Nachteil dieser Methode liegt darin, dass zusätzlich zu den Basisstationen auch die Mobile Stations synchronisiert sein müssen. Außerdem muss sich die Mobile Station im aktiven Zustand befinden.

Time Difference of Arrival (TDOA)

Eine verbesserte Methode im Vergleich zu TOA stellt Time Difference of Arrival (TDOA) dar. Im Unterschied zur TOA-Methode sendet hier das mobile Endgerät ein Signal aus, welches von mindestens drei unterschiedlichen Basisstationen empfangen wird. Diesmal wird der Zeitunterschied zwischen den Ankünften des Signals an den einzelnen Basisstationen gemessen und daraus die geschätzte Position ermittelt. Der große Vorteil im Bezug zu TOA liegt darin, dass in diesem Fall nur die Basisstationen synchronisiert sein müssen.

Enhanced Observed Time Difference (E-OTD)

Ein ebenfalls auf Zeitdifferenzen basierender Ansatz ist die Enhanced Observed Time Difference (E-OTD) Methode. Unter E-OTD fallen im Grunde zwei unterschiedliche Methoden: hyperbolisch bzw. circular. Beide haben jedoch gemein, dass sie mindestens drei verschiedene Basisstationen in ihrer Reichweite haben. Die hyperbolische Methode gliedert sich in drei Teile. Zum einen misst die MS Zeitdifferenzen zwischen den ankommenden Signalen zweier BTS (Observed Time Difference – OTD). Der Wert RTD (Real Time Difference) gibt die reale Zeitverschiebung der Signale im Netz an. In einem synchronisierten Netz hat RTD den Wert 0. Durch Subtraktion der RTD von OTD wird der Wert GTD (Geometric Time Difference) errechnet. Ein konstanter GTD-Wert definiert eine hyperbolische Form.

Der Schnittpunkt zweier Hyperbeln ergibt den Aufenthaltsort der MS. Bei der circularen Methode werden die Zeiten zwischen der Ankunft der Signale von BTS zur MS und zu den einzelnen LMUs (Location Measurement unit), welche an den BTS angebracht sind, gemessen. Es ergibt sich nun ein Gleichungssystem mit je einer Gleichung pro Basisstation. Bei Vorhandensein von mindestens drei Gleichungen ergeben sich Distanzen kreisförmig um die einzelnen Basisstationen. Im Schnittpunkt der drei Kreise befindet sich die geschätzte Position der MS.

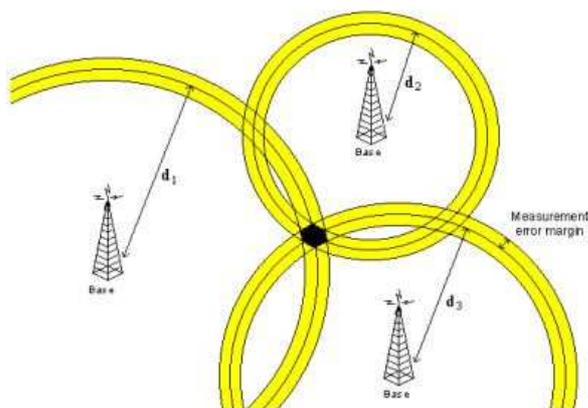


Abbildung 14: E-OTD-Location (circular)
[ETSI – GSM 03.71, 1996]

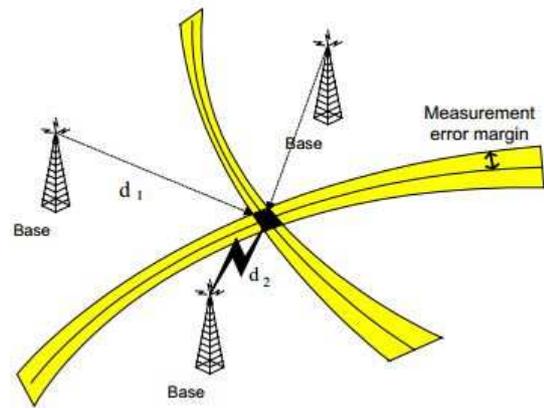


Abbildung 15: E-OTD-Location (hyperbolic)
[ETSI – GSM 03.71, 1996]

Signalwinkelmessung

Die Ortung per Winkelmessung (Angle of Arrival AOA) ermittelt die unterschiedlichen Eintrittswinkel des Signals. Um die Position ermitteln zu können, müssen gemäß [BSI, 2008] mindestens zwei (für den Fall, die Mobile Station befindet sich zwischen zwei Basisstationen, mindestens drei) Basisstationen in Reichweite und deren Standorte bekannt sein.

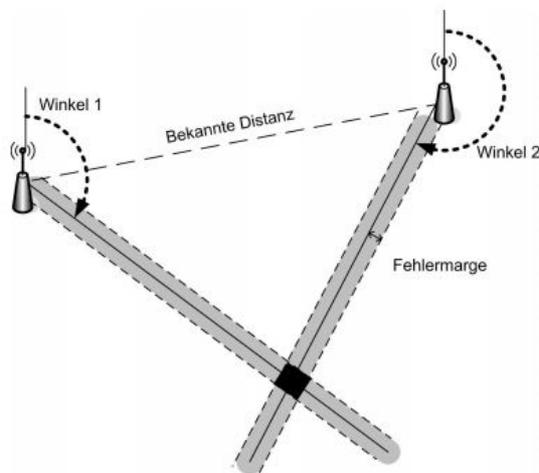


Abbildung 16: Grundprinzip - Angle of Arrival AOA [BSI, 2008]

Assisted Global Positioning System (A-GPS)

Assisted GPS bezeichnet ein Verfahren zur schnelleren Positionsbestimmung einer GPS-basierten Lokalisierung unter Zuhilfenahme von Mobilfunkhilfsdaten. Das Mobilfunknetz liefert anhand von Signallaufzeiten zur aktuellen und zu benachbarten Basisstationen dem Endgerät Daten über seinen

ungefähren Aufenthaltsort. Dadurch ist es dem Endgerät deutlich schneller möglich seine Position zu bestimmen. Insbesondere beim Start eines GPS-Empfängers bzw. bei der Bestimmung der ersten Position ist dieser Punkt von Vorteil.

2.5 Traffic Message Channel – TMC

TMC ist eine Technologie zur Verkehrsinformationsbereitstellung für Verkehrsteilnehmer, insbesondere für Autofahrer. Zur Übertragung dieser Informationen wird typischerweise das Radio Data System (RDS) verwendet. Hierbei handelt es sich um ein Kommunikationsprotokoll welches die Übertragung von Zusatzinformationen über FM-Hörfunk ermöglicht. Alternativ zum RDS ist auch die Übermittlung über GPRS möglich. Die Übertragung solcher Informationen erfolgt zumeist über diverse Radiostationen, in Österreich z.B. Ö3. Zum Empfangen von TMC-Meldungen benötigt der Nutzer gemäß [Oe3, 2013] ein TMC-fähiges Endgerät wie z.B. TMC-fähige Navigationsgeräte. In den meisten Fällen ist die Nutzung von TMC kostenlos, allerdings existieren auch kostenpflichtige Systeme wie z.B. das Produkt HD Traffic der Firma TOM TOM, welche dem Nutzer im Gegenzug mehr Informationen liefern.

Jede Verkehrsinformation wird als einzelne Meldung übertragen. Diese Nachrichten können auf verschiedensten Quellen beruhen, wie z.B. auf Basis von Informationen des Infrastrukturbetreibers, der Polizei, oder, wie in Österreich üblich, auf Basis von Informationen einzelner Verkehrsteilnehmer (Ö3ver). Kostenpflichtige Systeme hingegen basieren oft auf aktuellen FCD- oder FPD-Daten. Die Meldungen des österreichischen Radiosenders Ö3 enthalten üblicherweise eine Ereignis-ID, einen Location-Code, einen Startzeitpunkt, einen automatisch generierten, geplanten Verfallszeitpunkt, einen Statuscode und eine Versionsnummer. Ist die Verkehrsinformation nicht mehr aktuell, wird eine neue Meldung mit derselben ID, jedoch anderer Versionsnummer und einem anderen Statuscode, übertragen. Falls sich der Nutzer zum Zeitpunkt der Übertragung dieser Information nicht mehr im Sendegebiet befindet, wird die Meldung nach Ablauf der Verfallszeit empfängerseitig automatisch gelöscht.

2.6 Methodische Grundlagen

Im Folgenden Kapitel werden grundlegende Definitionen aus dem Bereich der Graphentheorie und der sphärischen Mathematik beschrieben, welche im späteren Verlauf dieser Arbeit Anwendung finden.

2.6.1 Graphentheorie

Graphen sind per Definition [Tittmann, 2011] abstrahierte mathematische Modelle zur Erfassung netzartiger Strukturen. Ein Graph besteht aus einer Menge an Knoten V (vertex) und Kanten E (edge), wobei jede Kante mindestens zwei Knoten (ggf. auch zweimal demselben) zugeordnet ist. Ein Graph wird als ungerichtet bezeichnet, wenn die Verbindung zweier Knoten richtungsunabhängig definiert ist. Im Gegenzug dazu enthalten gerichtete Graphen Richtungsinformationen zwischen den einzelnen Knotenverbindungen. Diese Art von Graphen kann zur Modellierung von Straßennetzen herangezogen werden.

Ein weiterer zu definierender Begriff in der Graphentheorie ist der Weg. Ein Weg im Sinne der Graphentheorie ist eine Abfolge von Kanten und Knoten eines Graphen, wobei jeder Knoten in dieser

Abfolge nur einmal aufscheint. Stimmen Start- und Endknoten überein spricht man von einem Kreis. Besitzt ein zusammenhängender Graph keinen Kreis handelt es sich um einen Baum.

Darstellung von Graphen

Zur Darstellung eines Graphen gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Ein Graph kann nach [Tittmann, 2011] dargestellt sein als...

- ... Zeichnung
- ... Adjazenzmatrix
- ... Adjazenzliste
- ... Inzidenzmatrix

Zeichnerische/grafische Darstellung

Die grafische Darstellung eines Graphen ist zumeist für den Betrachter am einfachsten zu verstehen. Beispiele für zeichnerisch dargestellte Graphen sind Routen- oder auch Fahrpläne von öffentlichen Verkehrsmitteln.

Die Adjazenzmatrix

Bei der Adjazenzmatrix handelt es sich um eine Matrix der Größe $n \times n$, wobei jedem Knoten V_1, \dots, V_n des Graphen G eine Zeile und eine Spalte der Matrix zugeordnet werden kann. Existiert eine Kantenverbindung E zwischen den Knoten V_i und V_j , so wird für den Eintrag $a_{i,j}$ der Adjazenzmatrix eine logische 1 eingetragen. Besteht keine Verbindung wird eine logische 0 eingetragen.

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{falls } (i,j) \in E \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.25)$$

Handelt es sich um einen ungerichteten Graphen, ergibt sich bei der Adjazenzmatrix eine symmetrische Matrix. Somit ist zur vollständigen Darstellung solcher Graphen lediglich die obere bzw. untere Dreiecksmatrix erforderlich. Gerichtete Graphen hingegen benötigen die vollständige Information. Sind die Kanten zwischen den Knoten zusätzlich mit Gewichtungen versehen, kann anstelle des logischen Wahrheitswertes auch die Gewichtung als Zahl eingetragen werden.

Adjazenzliste

Die Adjazenzliste, häufig auch Nachbarschaftsliste genannt, erzeugt für jeden Knoten eine Liste seiner benachbarten Knoten. Handelt es sich um einen gerichteten Graphen, werden in den Listen nur die nachfolgenden Knoten berücksichtigt. Adjazenzlisten haben den Vorteil, dass Sie im Vergleich zur Adjazenzmatrix einen geringeren Speicherbedarf aufweisen.

Inzidenzmatrix

Die Inzidenzmatrix ist eine $n \times m$ – Matrix der n Knoten und m Kanten eines Graphen G . Ist der Knoten i zur Kante j inzident, entspricht der Eintrag $a_{i,j}$ der Matrix einer logischen 1. Existiert keine Verbindung des Knotens mit der Kante besitzt der Eintrag den Wert 0. Bezieht sich die Inzidenzmatrix auf einen gerichteten Graphen, wird die Richtungsinformation durch die Werte 1 (Kante trifft auf Knoten) und -1 (Kante entfernt sich vom Knoten) repräsentiert.

2.6.2 Algorithmische Geometrie

Dieses Kapitel widmet sich den geometrischen Algorithmen bzw. Ansätzen welche in weiterer Folge in den verschiedenen Methoden Anwendung finden.

Punkt-in-Polygon Test mittels Kreuzungszahl

Für den Fall eines geschlossenen Polygons teilt dessen Rand den Raum in zwei disjunkte Gebiete: ein beschränktes inneres und ein unbeschränktes äußeres Gebiet. Existiert nun ein Punkt $P_i(x_i|y_i)$, stellt sich häufig die Frage ob P_i innerhalb oder außerhalb des Randes des Polygons liegt. Zur Beantwortung dieser scheinbar banalen Frage wird häufig auf die so genannte Kreuzungszahl (crossing number) zurückgegriffen. Gemäß [Sunday, 2012] beschreibt die Kreuzungszahl die kleinste Anzahl von Kantenschnitten eines Graphen G mit einem Strahl S . Dafür muss zuerst von dem zu untersuchenden Punkt aus ein Strahl erzeugt werden bzw. eine Verbindungskante zu einem weiteren Punkt $P_E(x_E|y_E)$. In weiter Folge wird überprüft wie oft sich der Strahl bzw. die neue Kante $\overline{P_i P_E}$ mit den n -Kanten des Polygons schneidet. Befindet sich P_E außerhalb des Polygons (Regelfall), dann befindet sich P_i bei einer ungeraden Anzahl von Kreuzungen innerhalb und bei einer geraden Kreuzungszahl außerhalb des Polygons.

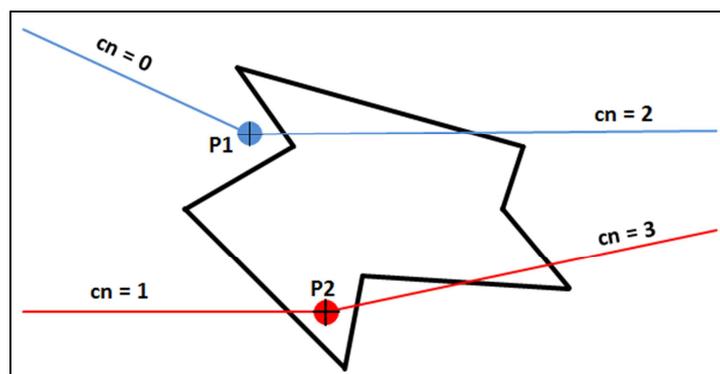


Abbildung 17: Grafisches Beispiel zur Kreuzungszahl

Schnitt eines Polygonzuges mit einer Geraden

Das Polygonzug-Geradenschnitt-Problem folgt dem obigen Schnittprinzip. Der Unterschied liegt darin, dass ein Polygonzug nicht abgeschlossen ist, und somit keine disjunkten Flächen bildet. Zur Bildung einer solchen für die Schnittbildung benötigten Fläche wird die sogenannte konvexe Hülle herangezogen. Diese Hülle entspricht per Definition [Aurenhammer et al., 1997] dem kleinsten konvexen Polygon einer Punktmenge $S \{p_1(x_1|y_1), \dots, p_n(x_n|y_n)\}$, welche alle Punkte aus S enthält. In weiterer Folge wird die Gerade mit der konvexen Hülle der Punktmenge geschnitten. Existiert ein

Schnittpunkt (Kreuzungszahl > 0), so existiert auch ein Schnittpunkt der Geraden mit dem Polygonzug. Diese Bedingung ist ebenfalls auf alle Teilpolygonzüge anwendbar und ist Voraussetzung zur Ermittlung des bzw. der Schnittpunkte(s). Hierfür wird der Polygonzug in zwei Hälften geteilt und von dort aus die Hüllenbäume generiert. Nun können die ersten Teilpolygonzüge auf Schnittpunkte überprüft werden. Konvexe Hüllen ohne Schnittpunkte werden in weiterer Folge nicht weiter berücksichtigt. Der ganze Vorgang wird solange ausgeführt, bis sich die konvexe Hülle so weit reduziert, dass der oder die Schnittpunkt(e) auf einzelne Kanten des Polygonzuges genau bestimmt werden kann.

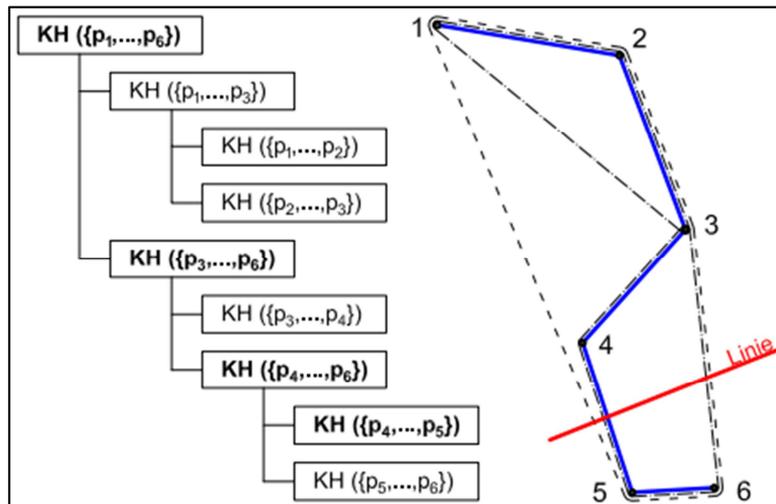


Abbildung 18: Beispielhafter Schnitt eines Polygonzuges mit einer Gerade

Beispielhaft ist dieser Polygonzug-Geradenschnitt in Abbildung 18 zu sehen. Dabei wird ein Polygonzug (blaue Linie) mit einer Gerade (roten) Linie geschnitten. Ausgehend von der gesamten konvexen Hülle (KH) der Punkte 1 bis 6 werden Teilhüllen gebildet. Im Hüllenbaum (links) sind alle möglichen Teilhüllen des Beispiels angeführt, wobei die Hüllen mit einem Schnittpunkt hervorgehoben sind. Bei diesem Beispiel würde sich der Schnittpunkt im vierten Durchlauf ergeben.

Voronoi Diagramm (im \mathbb{R}^2)

Gegeben sei eine Punktmenge $S = \{p_1(x_1|y_1), \dots, p_n(x_n|y_n)\}$ in einer Ebene. Ausgehend von diesen Punkten werden im Folgenden ungewichtete Einflussregionen der o.g. Punkte gesucht. Dieses Problem, welches auch unter dem Namen „Postamtproblem“ bekannt ist, kann durch die Bildung eines Voronoi-Diagramms gelöst werden. Dabei werden für alle Punkte aus S ausgehend von einem Startpunkt nächste Nachbarn gesucht und Streckensymmetralen auf die entstandenen Punktverbindungen gebildet. Durch den Schnittpunkt der Symmetralen entstehen die Knotenpunkte des Voronoi-Diagrammes.

2.6.3 Koordinatenberechnungen und – transformation

Im vorangegangenen Kapitel wurden Methoden für Punkte bzw. Punktmenge beschrieben. Diese Punkte werden in späterem Verlauf die Geo-Koordinaten der Mobilfunkdatenevents darstellen, daher scheint es sinnvoll kurz auf den Umgang mit geodätischen Daten einzugehen und relevante Begriffe zu definieren.

Koordinatenreferenzsystem

Die Erde kann mit keiner geometrischen Form exakt beschrieben werden. Das Geoid beschreibt die fiktive Form der Erdoberfläche, welche an jeder Stelle dasselbe Gravitationspotential aufweist. Annähernd gut beschrieben werden kann jenes Geoid durch ein Rotationsellipsoid (entsteht durch Rotation einer Ellipse an einer ihrer Achsen), sog. Referenzellipsoid. Einige dieser Ellipsoide besitzen nur in den für sie bestimmten Regionen eine gute Anpassung an das lokale Geoid, sind aber für andere Erdteile unbrauchbar. Die Dimension eines Ellipsoids wird im Allgemeinen mit den Parametern a (große Halbachse), b (kleine Halbachse), f (die Abplattung) und e (Exzentrizität) beschrieben. In weiterer Folge bestimmt gemäß [BEV, 2013] das geodätische Datum die Position, Orientierung und Skalierung des Koordinatensystems auf seiner Bezugsfläche am Referenzellipsoid. Räumlich festgelegt wird das Bezugssystem durch sog. Festpunkte, ausgehend von einem zentralen Vermessungspunkt, dem Fundamentalpunkt. Das Datum Austria (AT_MGI) bildet für Österreich das gebräuchlichste Bezugssystem, definiert durch den Fundamentalpunkt am Hermannskogel und das Bessel'sche Referenzellipsoid. Ein geodätisches Datum inklusive eines Koordinatensystems (mathematisches Beschreibungsmodell) bildet schlussendlich das Koordinatenreferenzsystem.

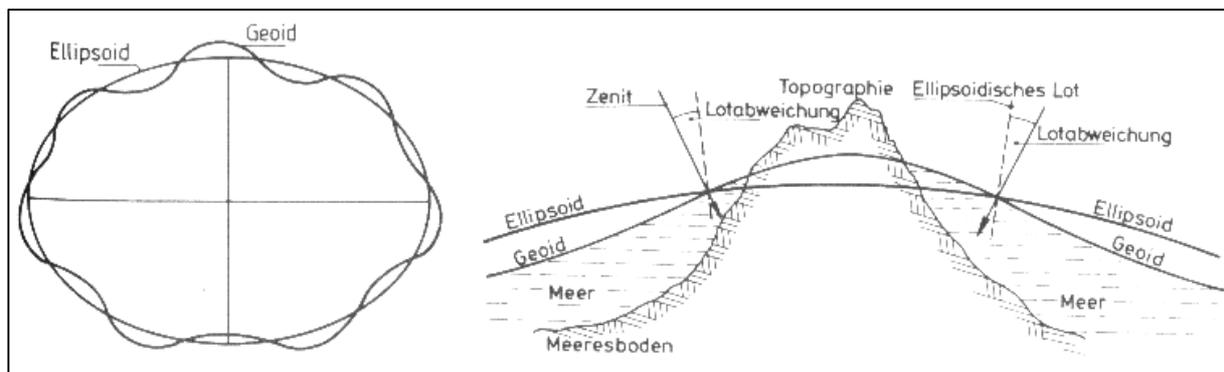


Abbildung 19: Schematische Darstellung des Geoids und des Ellipsoids [IVV-Geo, 2013]

World Geodetic System - WGS

Das World Geodetic System beschreibt ein globales geodätisches Datum. Die aktuellste Version des WGS stellt das WGS-84 dar, welches auch die Basis der GPS-Navigation darstellt. Dieses System bildet ein kartesisches Koordinatensystem. WGS-84 ist heute insbesondere durch die stetig wachsende Verwendung des GPS wahrscheinlich das verbreitetste System zur allgemeinen Positionierung.

Drei Werte beschreiben die Lage eines Punktes auf dem Referenzellipsoid: Latitude φ (geographische Breite), Longitude λ (geographische Länge) und Altitude (Höhe). Die geographische Breite entspricht dem winkelbezogenen Abstand eines Punktes vom Äquator und kann Werte von 0° bis $\pm 90^\circ$ einnehmen. Als geographische Länge versteht sich der Winkel in östlicher bzw. westlicher Richtung zwischen dem Nullmeridian und der aktuellen Position. Sowohl geographische Länge als auch Breite werden üblicherweise in Grad angegeben.

Großkreisdistanz

Ein Großkreis ist ein Kreis auf der Erdoberfläche, dessen gebildete Fläche den Erdmittelpunkt enthält. Theoretisch existieren beliebig viele Großkreise. Um nun die Entfernung zwischen zwei Punkten zu ermitteln, wird gerne die Großkreisdistanz (great circle distance) verwendet. Hierbei handelt es sich

um einen Großkreis der durch die Verbindung beider Punkte entsteht. Für die Berechnung des Winkels zwischen beiden Punkten $\Delta\zeta$ kann folgende Formel herangezogen werden:

$$\Delta\zeta = \arccos(\sin(\varphi_1) \cdot \sin(\varphi_2) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \cos(\lambda_2 - \lambda_1)) \quad (2.26)$$

Durch Multiplikation des sich ergebenden Winkels mit dem Erdradius ergibt sich die Großkreisdistanz der beiden Punkte. Für den Erdradius R wird der Wert 6371.009km (entspricht mittlerem Erdradius) angenommen. Da obige Formel zu Rundungsfehlern führen kann, vor allem bei sehr geringen Distanzen, wird häufig auf die Haversine-Formel zurückgegriffen.

$$\Delta\zeta = 2 \cdot \arcsin\left(\sqrt{\sin^2\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \sin^2\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)}\right) \quad (2.27)$$

Richtungswinkel θ

Der Richtungswinkel beschreibt die Winkeldifferenz zwischen der Nordrichtung und der Richtung des Großkreises vom Startpunkt zum Endpunkt. Dieser Winkel lässt sich durch folgende Formel berechnen:

$$\begin{aligned} y &= \sin(\lambda_2 - \lambda_1) \cdot \cos(\varphi_2) \\ x &= \cos(\varphi_1) \cdot \sin(\varphi_2) - \sin(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \cos(\lambda_2 - \lambda_1) \\ \theta &= \operatorname{atan2}(y, x) \end{aligned} \quad (2.28)$$

Schnittpunkt zweier Orthodrome

Eine Orthodrome ist die kürzeste Distanz (Großkreisdistanz) zweier Punkte auf der Kugeloberfläche. Sind zwei Orthodrome vorhanden, kann deren Schnittpunkt $P_S(\lambda_S|\varphi_S)$ nach [Bronstein, 2008] folgend berechnet werden:

$$\tan(\lambda_S) = -\frac{\tan(\varphi_{N1}) \cdot \cos(\lambda_{N1}) - \tan(\varphi_{N2}) \cdot \cos(\lambda_{N2})}{\tan(\varphi_{N1}) \cdot \sin(\lambda_{N1}) - \tan(\varphi_{N2}) \cdot \sin(\lambda_{N2})} \quad (2.29)$$

$$\varphi_S = \operatorname{atan}[\tan(\varphi_{N1}) \cdot \cos(\lambda_S - \lambda_{N1})] \quad (2.30)$$

Dabei sind die Punkte $P_{N1}(\lambda_{N1}|\varphi_{N1})$ und $P_{N2}(\lambda_{N2}|\varphi_{N2})$ die nördlichsten Punkte der Orthodrome. Diese lassen sich nach folgender Beziehung berechnen:

$$\varphi_N = \arccos(\sin(|\theta_A|) \cdot \cos(\varphi_A)) \quad (2.31)$$

$$\lambda_N = \lambda_A + \operatorname{sgn}(\theta_A) \cdot \left| \arccos\left(\frac{\tan(\varphi_A)}{\tan(\varphi_N)}\right) \right| \quad (2.32)$$

Der in der obigen Formel enthaltene Richtungswinkel θ_A beschreibt den Winkel zwischen den zwei Punkten A und B welche die jeweilige Orthodrome aufspannen. Dieser Winkel wird zuvor durch die

Verwendung der Gleichung 2.28 ermittelt. Die Berechnung liefert zwei Schnittpunkte S, wobei diese Gegenpunkte (Punkte, deren direkte Verbindungsgerade durch den Mittelpunkt des Ellipsoiden führt, wie beispielsweise die Verbindung des Nord- und Südpols der Erde) sind.

Gauss-Krüger-Koordinatensystem

Bei einem Gauss-Krüger-Koordinatensystem (GK-System) handelt es sich um ein kartesisches Koordinatensystem basierend auf einer transversalen Mercatorprojektion (einer Form der Zylinderprojektion), welches vorwiegend im deutschsprachigen Raum verwendet wird. Dabei wird die Welt in 3° breite Meridianstreifen aufgeteilt. Als Referenzellipsoid wird das Bessel- oder das Krassowski-Ellipsoid verwendet. Der große Vorteil dieses Koordinatensystems ist seine konforme (winkeltreue) Abbildung. Damit vereinfachen sich Distanzberechnungen auf den pythagoräischen Lehrsatz.

Universal Transverse Mercator UTM - Koordinatensystem

Das UTM-Koordinatensystem basiert ebenfalls auf einer transversalen Mercatorprojektion und führt auch zu einer winkeltreuen Abbildung. Im Unterschied zum GK-System verwendet das UTM 6° breite Meridianstreifen und ein globales Ellipsoid (z.B.: WGS-84-Ellipsoid).

Koordinatentransformation

Die Umrechnung zwischen den einzelnen Bezugssystemen erfolgt anhand einer Koordinatentransformation. Üblicherweise handelt es sich dabei um eine räumliche Transformation, welche entweder mit einer Helmert- oder (seltener) mittels einer Modolensky-Transformation berechnet wird. Bei der Helmert-Transformation handelt es sich um eine räumliche Ähnlichkeitstransformation aus einem kartesischen in ein anderes, ebenfalls kartesisches, Koordinatensystem. Diese Umrechnung erfordert die Angabe der 7 Helmert-Transformationsparameter bestehend aus:

- ... den 3 Translationen (c_x, c_y, c_z)
- ... den 3 Rotationen ($\omega_1, \omega_2, \omega_3$)
- ... und dem Maßstabsfaktor (m)

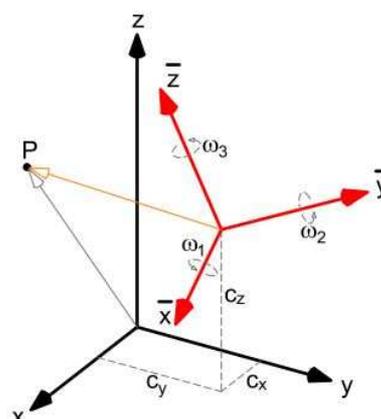


Abbildung 20: Koordinatentransformation mit gegebenen Parametern

Bezogen auf ein rechtsdrehendes Koordinatensystem ergibt sich folgende Transformationsgleichung, wobei der Punkt $P(X, Y, Z)$ den Ausgangspunkt und der Punkt $\bar{P}(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ den transformierten Punkt im Zielbezugssystem darstellt:

$$\begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix} + \mu \cdot R(\omega_1, \omega_2, \omega_3) \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

mit

$$\mu = (1 + m \cdot 10^{-6})$$

$$R(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = R_Z(\omega_3) \cdot R_Y(\omega_2) \cdot R_X(\omega_1)$$

Für kleine Drehwinkel ω reduziert sich die Drehmatrix R und die Transformation kann wie folgt beschrieben werden:

$$\begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix} + \mu \cdot \begin{bmatrix} 1 & \omega_3 & -\omega_2 \\ -\omega_3 & 1 & \omega_1 \\ \omega_2 & -\omega_1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Zur Bestimmung der Parameter müssen mindestens 3 idente Punkte in beiden Koordinatensystemen bekannt sein. Damit ergibt sich ein überbestimmtes System, welches ausgeglichen werden muss (Beispielweise mittels der Methode kleinster Quadrate). Für gängige Koordinatentransformationen existieren sog. Standardparametersätze. Für die Transformation des WGS-84 Systems in das Datum Austria sind folgende Parameter anwendbar:

Tabelle 6: Helmert Parameter für die Transformation von WGS-84 nach MGI-Austria

c_x [m]	c_y [m]	c_z [m]	m [ppm]	ω_1 [Winkelsek.]	ω_2 [Winkelsek.]	ω_3 [Winkelsek.]
-577.326	-90.129	-463.919	-2.423	5.137	1.474	5.297

Für die Rücktransformation müssen für alle Parameter die Vorzeichen verändert werden. Detailliertere Informationen bzw. alternative Methoden zum Thema Koordinatentransformation sind beispielsweise bei [Gruber, 2012] zu finden.

2.7 Map Matching Methoden

Unter dem Begriff Map Matching werden Verfahren verstanden, welche eine Karteneinpassung von gemessenen Geo-Positionen ermöglichen. Prinzipiell können Geo-Positionsangaben hinsichtlich ihrer Genauigkeit und ihrem Aufzeichnungsintervall unterschieden werden. Zu den „genaueren“ Verfahren gehören z.B. GPS-Positionierungen, deren Genauigkeit abhängig vom GPS-Empfangsgerät im Zentimeter- bis einfachen Meterbereich liegt. Im Mobilfunkbereich sind betreiberseitig meist nur Informationen über die zuletzt verwendete Basisstation eines Nutzers verfügbar. Diese Information gibt lediglich Auskunft darüber, dass sich der User im Einflussbereich der Basisstation aufhält und sich somit in einem Umkreisradius von maximal 35km befinden muss. Zusätzlich sind bei GPS-

Positionsbestimmungen die Aufzeichnungsintervalle üblicherweise sehr hoch (1 – 100 Hz). Bei mobilfunkgenerierten Positionsbestimmungen existiert kein fixes Aufzeichnungsintervall. Relativ genaue Positionen können meist nur beim Übergang der Einflussbereiche von Basisstationen ermittelt werden, ansonsten kann der Aufenthaltsort lediglich auf den Einflussbereich reduziert werden. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Positionsinformationen sind auch unterschiedliche Anforderungen an die jeweiligen Map-Matching-Methoden zu stellen.

Im Bereich der GPS-Datenverarbeitung definiert [Zhao, 1997] zwei Hauptgruppen des Matchings:

- Konventionelle Methoden
- Fuzzy-Logikbasierte Methoden.

Konventionelle Methoden

Diese Methoden basieren alle auf der grundsätzlichen Idee Fahrzeugtrajektorien mit dem umgebenden Straßennetz geometrisch zu vergleichen. Der Straßenzug mit der größten Ähnlichkeit wird gewählt. [Zhao, 1997] unterscheidet hier weiters zwischen semi-deterministischen und probabilistischen Methoden.

Fuzzy-Algorithmen

Die Fuzzy-Set-Theorie erlaubt die Beschreibung und Zuordnung von unscharfen Mengen. Durch die mathematische Einführung qualitativer, quasi menschlicher Statements wie „ein bisschen“, „viel“ oder „sehr viel“ ergibt sich die Möglichkeit nachvollziehbare Entscheidungen aus unpräzisen Eingangsdaten abzuleiten. Dafür müssen aber zuerst sog. Zugehörigkeitsfunktionen definiert werden, welche die Eingangsdaten bewerten (Fuzzifizierung). Die Gesamtheit aller definierten Zugehörigkeitsfunktionen ergibt die Fuzzyfunktion. Diese kombiniert die Werte und liefert einen präzisen Grad der Zugehörigkeit für jeden Wert. Schlussendlich werden die Zugehörigkeitsgrade ausgewertet und ein eindeutiger Ergebniswert berechnet (Defuzzifizierung).

Zum Vergleich zwischen Fahrzeugtrajektorien und dem Straßennetz können diverse Ähnlichkeits- oder Distanzmaße herangezogen werden. Ähnlichkeitsmaße liefern Aussagen über die Ähnlichkeit zweier Objekte, während hingegen Distanzmaße Unähnlichkeiten messen. Da es sich bei Trajektorien bzw. deren Koordinaten um metrisch-skalierte Daten handelt, bietet sich ein Distanzmaß an, welches durch die euklidische Distanz berechnet werden kann. Für nicht gleich skalierte Daten, wie zum Beispiel WGS84-definierte Koordinaten, empfiehlt sich stattdessen eher die Manhattan-Distanz. Diese ist definiert als die Summe der richtungsabhängigen Differenzen. Liegen die zu vergleichenden Daten in binärer Form auf, können diverse Ähnlichkeitsmaße angewandt werden. Beinhalten die Daten symmetrische Merkmale (alle Merkmale der untersuchten Objekte sind ähnlich wichtig), empfehlen sich Simple Matching oder der Tanimoto-Koeffizient. Im asymmetrischen Fall hingegen wird gerne der Jaccard-Index verwendet. Eine andere Möglichkeit zur Ermittlung eines geeigneten Distanzmaßes für Vektoren unterschiedlicher Länge stellen Frechet Metriken dar, wie sie z.B. bei [Fischer, 2012] verwendet werden. Eine weitere Alternative des Matchings sind Ähnlichkeitszuordnungen mit erweiterten Informationen, wie in etwa Uhrzeit-, Aufenthaltszeit-, Geschwindigs- oder Aktivitätsmuster innerhalb einer Region (GPS) bzw. Zelle (GSM). Unter dem Schlagwort Nutzerähnlichkeit (user similarity) wie sie z.B. bei [Ying, et al., 2010] oder [Li, et al., 2008]

definiert werden, finden sich diverse Ansätze zum Matching von Nutzerähnlichkeiten zur Ermittlung von potenziellen Freunden aus Social-Media-Plattformen auf Basis von Bewegungsinformationen. Diese Vorgangsweisen können aber auch in adaptierter Form zur Filterung von umgebenden Straßen und somit zur besseren Ermittlung valider Trajektorien im Untersuchungsgebiet herangezogen werden.

GPS-Daten beinhalten die realen Standortinformationen, sind somit metrisch skaliert und können nicht direkt in einen binären Ausdruck umgewandelt werden. Standorte in Mobilfunkdaten beinhalten deren Zellen bzw. den realen Standort der Basisstation. Damit ergeben sich endlich viele mögliche Aufenthaltspunkte. Eine Trajektorie besteht somit aus einer Abfolge an Basisstationen. Selbiges gilt auch für das Straßennetz. Folglich können die Vektoren in eine binäre Form umgewandelt werden.

2.8 Bestehende und abgeschlossene Forschungsprojekte

Die Grundidee, Mobilfunkendgeräte als im Verkehrsgeschehen mitschwimmende Informationsträger zu verwenden, ist keineswegs neu. Seit bereits über zehn Jahren werden Mobilfunkdaten zur Verwendung im Verkehrswesen erforscht. Dieses Kapitel soll einen kurzen Überblick über bereits existierende Forschungsprojekte in diesem Bereich schaffen. Die in diesen Projekten ermittelten Methoden und Verfahren unterscheiden sich hauptsächlich anhand der Informationstiefe der Mobilfunkdaten bzw. den Anwendungsfällen.

[Schlaich, 2010] gliedert seine Arbeit in zwei Teile. Zum einen wird ein Verfahren beschrieben, welches aus Location Area Updates Trajektorien generieren soll. Zusätzlich liefert er Aussagen darüber auf welchen Straßenkategorien diese zuverlässig ermittelt werden können. Der zweite Teil dieser Arbeit beinhaltet die Anwendung der zuvor entwickelten Methoden. Hierbei steht das Ziel im Vordergrund das Routenwahlverhalten der Verkehrsteilnehmer zu überprüfen. Zu diesem Zweck wurde ein bestimmter Straßennetzabschnitt in Baden-Württemberg (GER) gewählt und Einflussgrößen auf die Routenwahl analysiert.

[Janecek et al., 2012] benützen in ihrer Arbeit Location Area Updates um Reisezeiten am hochrangigen Straßennetz zu ermitteln. Aus starken Abweichungen von den geschätzten Reisezeiten können Zwischenfälle detektiert werden. Diese Methode wird an zwei Beispielen im österreichischen Autobahnnetz vorgezeigt. Im ersten Fall handelt es sich um die Autobahn A23, welche mitten durch die Stadt Wien hindurch führt. Daraus ergeben sich relativ kleine Größen der Location Areas im umgebenden Gebiet. Beispiel zwei demonstriert die Methode zur Überwachung von Reisezeiten auf Langstrecken, idgF. auf der Autobahn A2 zwischen Wien und Graz.

Schon [Kohlen, 2003] verweist in seiner Studie auf die Ungenauigkeit der oft verwendeten Methode der Zellortung. Er beschreibt in seiner Arbeit einen neuen Ansatz zur Routenidentifikation in Verkehrsnetzen auf Basis eines 4-stufigen Ortungsverfahrens. In erster Instanz erfolgt eine Zellortung auf Basis von Prädiktionsdaten bezüglich der Empfangspegelstärke. Diese Vorhersagedaten ergeben sich aus Ausbreitungsmodellen, welche auch auf Gälendetopographien und Bebauungen Rücksicht nehmen. Sowohl die zweite als auch die dritte Ortungsstufe berücksichtigt auch

Nachbarschaftsinformationen (Referenzdaten- bzw. lokale Referenzdatenverfahren). Die abschließende vierte Ortungsstufe dient als logische Verknüpfung der Ortungsdaten mit vorhandenen Verkehrsnetzdaten.

[Bar-Gera, 2007] evaluiert in seiner Arbeit Geschwindigkeiten und Reisezeiten aus Mobilfunkdaten auf einem 14 km langen Autobahnabschnitt in Israel. Zusätzlich wurden zum Vergleich Geschwindigkeiten aus Induktionsschleifen und die Ergebnisse aus 25 Floating-Car-Messungen herangezogen. Die Positionsbestimmung aus den Mobilfunkdaten erfolgt anhand von Handover-Prozeduren während eines aktiven Telefonats, wobei jeder Handover netzseitig erfasst wird. Die daraus abgeleitete Position (Fußabdruck) versteht sich als Schätzung mit einer Aufenthaltswahrscheinlichkeit von 85%. Die Größe solcher Fußabdrücke beträgt zwischen 300 und 1000 Metern. Somit ist es schwierig von diesen Zonen auf reale Aufenthaltspunkte zu schließen. Daher wird eine Reihe von Positionen dem Streckensegment mit der höchsten Wahrscheinlichkeit zugeordnet. Die Analysen selbst beziehen sich auf den Zeitraum Jänner bis März 2005. Die Ergebnisse liefern eine gute Übereinstimmung der beiden Datenquellen und verweisen somit auf das Potenzial mobilfunkgenerierter Verkehrsdaten.

[Caceres et al., 2008] geben einen guten ersten Überblick über mögliche Methoden zur Generierung von mobilfunkgenerierten Verkehrsdaten, dabei verweisen sie immer wieder auf andere bereits existierende Studien zu diesem Thema. Die Arbeit widmet sich kurz allen wichtigen Themen. Als erstes wird das Thema der Erfassung von Quell-Ziel-Matrizen behandelt. Diese geschieht ausschließlich über Location Area Updates. Ebenfalls beschrieben wird die Erfassung von Verkehrsstärken, welche wiederum anhand von Location Area Updates in deren Grenzbereichen erfolgen können. Geschwindigkeiten und Reisezeiten werden in dieser Arbeit ausschließlich über sogenannte Double-Handover (zwei unmittelbar aufeinander folgenden Handoverereignisse bei durchgehender Verbindung) berechnet. Außerdem verweist Caceres auf die potenzielle Häufung von Telefonaten bei Auftreten eines unerwarteten Ereignisses im Straßennetz.

Einen anderen interessanten Ansatz verfolgen [Demissie et al., 2013] in der Innenstadt von Lissabon. Dort wurde versucht anhand von protokollierten Handovern pro Basisstation auf die Verkehrsbelastung bzw. die Qualität des Verkehrsablaufes mithilfe von zwei unterschiedlichen Methoden zu schließen. Fünf verschiedene Untersuchungsbereiche wurden dafür ausgewählt, in jenen sich insgesamt zwölf Zählstellen befanden, welche als Vergleichsdaten zur Analyse herangezogen wurden. Im ersten Schritt wurde die stündliche Anzahl der Handover an den straßennahen Basisstationen mit der Hälfte der Zählstellendaten verglichen. Im Schnitt ergaben die Vergleiche einen Korrelationswert von 0.76. Allerdings gab es deutliche Unterschiede bei den Verhältnissen zwischen Handover- und Zählstellendaten, daher wurde weiter nur mehr zwischen starkem, mittlerem und schwachem Verkehr unterschieden. Die zweite Hälfte der Zählendaten waren als Trainingsdaten für die beiden angewandten Methoden gedacht. Dabei handelte es sich um ein Multinomiales Logitmodell (MNL) und ein künstliches neuronales Netzwerk (KNN). Die Ergebnisse zeigten für die beobachteten Gebiete Übereinstimmungen der geschätzten Verkehrsqualität von 76.4% (MNL) und 78.1% (KNN).

3 Methoden

In diesem Kapitel werden diverse Methoden vorgestellt mit deren Hilfe die Verkehrslage auf linienförmigen Streckenabschnitten abgeschätzt werden kann. Jede Analyse- und Filtertechnik wird in diesem Kapitel in Textform bzw. ggf. in Form eines strukturellen Ablaufes beschrieben. Bis auf das Verfahren zur Ermittlung der realen Basisstationsmittelpunkte, werden alle Verfahren im Kapitel 4 angewendet und sind hier prinzipiell beschrieben.

3.1 Systemüberblick

Zur Realisierung der Verkehrslageschätzung aus Mobilfunkdaten ist eine strukturelle Vorgehensweise erforderlich. Eine Übersichtsgrafik der Systemstruktur und deren Abläufe und Beziehungen sind in Abbildung 21 zu finden. Die Grobstruktur des Ablaufes gliedert sich in folgende Hauptstufen:

- Datenübertragung und –speicherung
- Datenimport und –konvertierung
- Zuweisung der Keulenpunkte zu den jeweiligen Basisstationen
- Ermittlung bereichsrelevanter Basisstationen durch Standortfilterung
- Ermittlung der Kenngrößen
- Abgleich und Sicherung der aktuellen Kenngrößen mit historischen Daten
- Gesamtauswertung und Abschätzung der aktuellen Verkehrslage

Die Übertragung der im Rahmen dieser Masterarbeit verwendeten Daten erfolgt direkt per Livestream über den Mobilfunkanbieter. Dabei wird jeder Eventblock auf seine Plausibilität hinsichtlich seiner Bytegröße überprüft und gesichert. Nicht konforme Datenblöcke werden gelöscht. Die gewonnenen Daten werden in weiterer Folge stündlich in einer Datei gespeichert. Im nächsten Schritt werden die zuvor gespeicherten Dateien für einen ausgewählten Zeitbereich mit dem iTrafficReader-Tool eingelesen und konvertiert. Zur Sicherung dieser gefilterten und konvertierten Daten werden diese als csv-Dateien gespeichert. Dieser Umstand bzw. die Notwendigkeit dieses Zwischentools ergibt sich aus der Verwendung gespeicherter Mobilfunkdaten. Für eine Echtzeitanwendung muss der Livestream selbstverständlich auch live verarbeitet werden. Die in weiterer Folge verwendeten Methoden tragen diesem Umstand Rechnung indem sie entweder ohnehin nur einmal zu erfolgen haben, oder mit leichten Adaptierungen auch live angewendet werden können.

Nach der Konvertierung der Daten findet die nächste Stufe der Bereichsfilterung (Abschnitt 3.5) statt. Zum einen wird der geographische Bereich mithilfe verschiedener Methodiken deutlich stärker eingeschränkt und in weiterer Folge werden nur mehr die für die definierte Strecke relevanten Basisstationen ermittelt. Diese Bereichsfilterung, insbesondere die Erkundung der wesentlichen Basisstationen muss im Prinzip nur einmalig erfolgen. Für die weiteren Berechnungen muss lediglich abgefragt werden, ob das auftretende Event eine relevante Basisstation betrifft oder nicht. Können keine wesentlichen Basisstationen herausgefunden werden, oder ist deren Zuordnung nicht eindeutig (z.b. zeitlich verändernd), so beschränkt sich die Filterung auf den eingeschränkten Bereich. Der nächste Block in der strukturellen Abfolge behandelt das Thema Kenngrößenermittlung. Diese gliedert sich in die drei Bereiche: Reisezeit- und Geschwindigkeitsermittlung, Aktivitätsanalyse und

Mastendynamik. Alle drei Kenngrößen, deren Veränderungen und der Vergleich dieser Kenngrößen mit historischen Daten stellen die Grundlage der Verkehrslageschätzung dar. Dabei ist jede Methode eigenständig um Beeinflussungen untereinander zu verhindern.

Abgesehen von der Datenübertragung und -speicherung sind alle weiteren Ablaufschritte mit dem Softwareprogramm MATLAB des Unternehmens „The MathWorks“ entwickelt und ausgeführt.

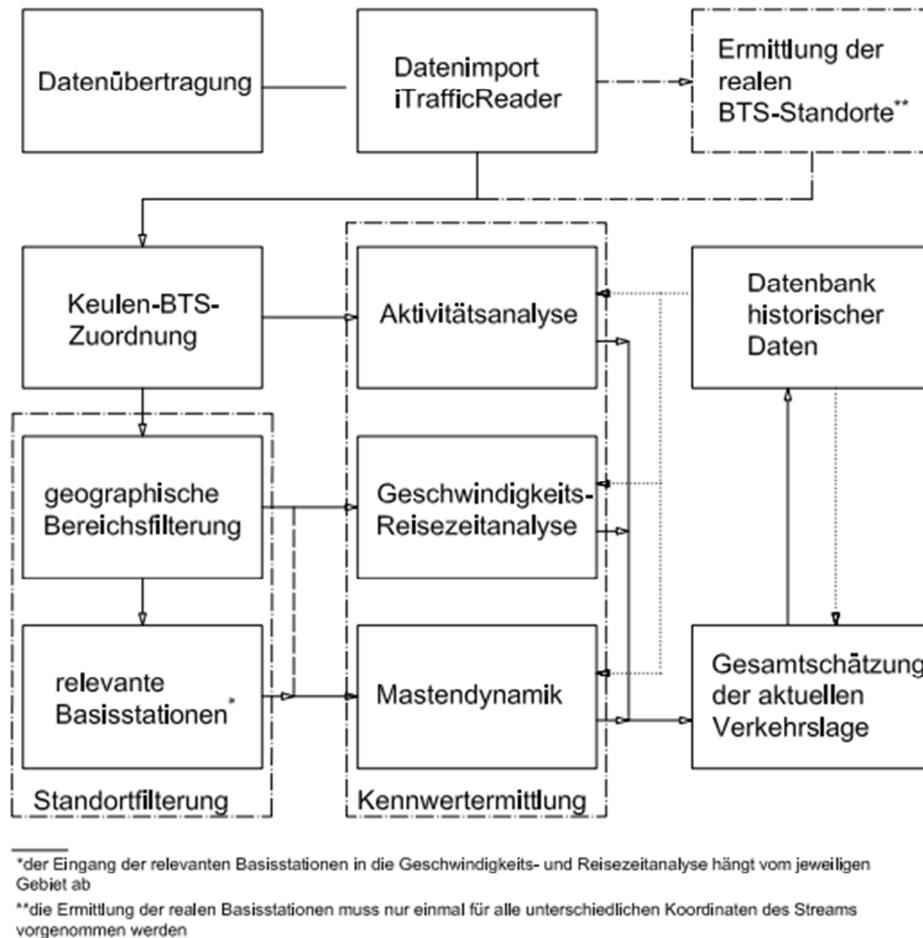


Abbildung 21: Gesamtsystemüberblick über die Abarbeitungsblöcke

3.2 Datenbasis

Die für diese Masterarbeit verwendeten Mobilfunkdaten wurden von der A1 Telekom Austria AG über die sog. A1Traffic-Plattform (siehe Abbildung 22) zur Verfügung gestellt. Hierbei handelt es sich um eine Plattform, welche Echtzeit-Informationen aus den drei unterschiedlichen Monitoring Systemen (2G-Netzwerk, 3G-Netzwerk und A1-Navigationsgeräte) über den Netzverkehr im Mobilfunksystem des Anbieters vereinigt und diese Informationen per User-Datagram-Protocol (UDP)-Stream weiterleitet. Die anonymisierten Daten werden als Eventblocks übertragen und innerhalb der TU-Graz in binären Log-Files gespeichert, wobei für jede Stunde ein neues File erzeugt wird. Jeder Eventblock besitzt eine genau definierte Größe von 88 Byte (bzw. 136 Byte ab Februar 2013) und enthält zahlreiche Informationen. Grundsätzlich bietet der Betreiber zwei verschiedene Streamvarianten unterschiedlicher Qualität (Option A und Option B) an. Sie unterscheiden sich vor

allem in der Informationstiefe. Die bessere Version (Option A) liefert zusätzlich zu den Informationen in Option B noch Informationen über CellID, Location Area Code (LAC), Basisstationsstyp (Winkelstrahler, Rundstrahler, etc.) und Leistungslevel der Basisstation. Für diese Arbeit waren nur Daten der Option B verfügbar.

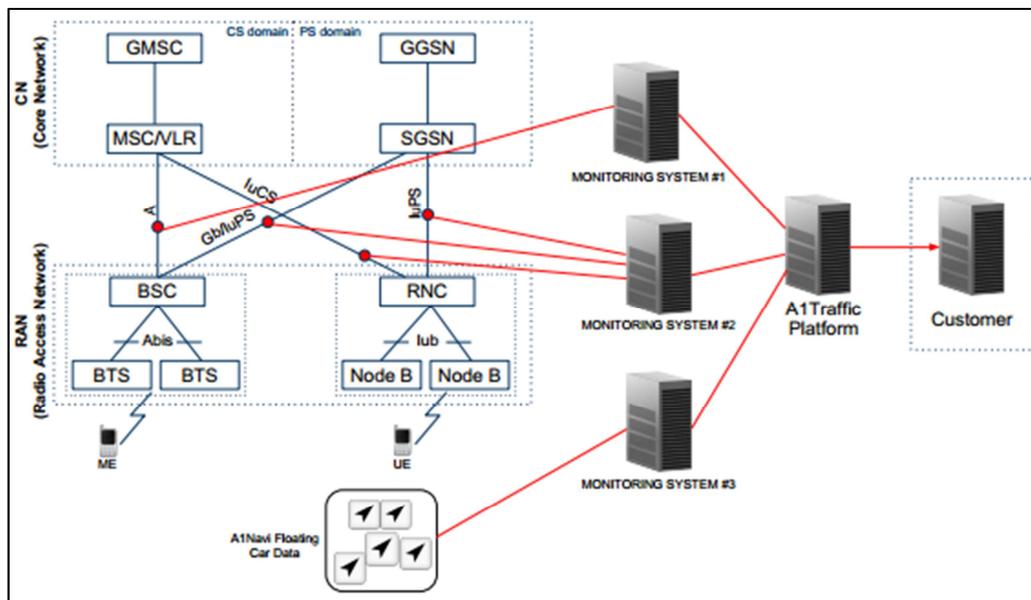


Abbildung 22: iTraffic-Plattform [Telekom Austria Group, 2013]

In dem vorhandenen Datenpaket sind einige Einträge wie z.B. Location Area Codes oder Cell IDs mit dem Wert NULL belegt und somit für etwaige Analysen nicht anwendbar. Daher wird für die Analysen in den folgenden Kapiteln mit den sechs nachstehenden Einträgen des Eventblockes weitergearbeitet:

Anonymisierte ID

Hierbei handelt es sich um einen anonymisierten hexadezimal Zahlenblock, welcher 32 der 88 Byte eines Eventblockes beansprucht. Diese zufällige ID wird durch eine einseitige Hash-Funktion (Prinzipien und Algorithmen von Hashverfahren können beispielsweise bei [Ottmann, Widmayer, 2012] gefunden werden) unter Einbeziehung der IMSI generiert. Durch Neuinbetriebnahme des Endgerätes wird dem Endgerät eine neue ID zugewiesen, ansonsten wechselt diese nach Ablauf eines definierten Zeitintervalls automatisch.

Event ID

Die Event ID entspricht 2 Byte des Eventblockes und liegt nach Encodierung als HEX-Zahl vor. Jede Zahl steht für einen bestimmten Eventtyp wie z.B. Mobile Originated Call. Gemäß [Telekom Austria Group, 2013] sind insgesamt 40 verschiedene Eventtypen definiert, welche in Anhang B zu finden sind.

Zeitstempel

Dieser Eintrag stellt den Auftrittszeitpunkt dar für den 8 Byte zugewiesen sind. Die ersten 4 Byte entsprechen dem UNIX-Zeitstempel seit 01.01.1970. Die restlichen 4 Bytes beschreiben Mikrosekunden, welche für die weiteren Auswertungen nicht herangezogen werden.

Latitude

Dieser Wert entspricht der geographischen Breite der Eingangsdaten, an welcher die ID gerade ein Event gesetzt hat. Definiert die Eingangsquelle 2G- oder 3G-Daten, entspricht dieser Wert einem Keulenknoten (Winkelstrahlantenne) oder dem realen Basisstationspunkt (Rundstrahlantenne). Die Zahl liegt in Dezimalgrad des WGS-84 Systems vor. Im Falle eines GPS-Inputs entsprechen die Koordinaten dem realen Aufenthaltsort der ID.

Longitude

Das Feld Longitude beschreibt die geographische Länge im WGS-84 System, wiederum in Dezimalgrad. Die Daten beziehen sich wiederum auf Keulen- oder Basisstationskoordinaten für 2G oder 3G-Daten, bzw. der real gemessenen Koordinate bei GPS-Daten.

Source

Dieser Eintrag beschreibt den Ursprung des Events. Hierbei sind drei verschiedene Möglichkeiten vorhanden: Datacast-Input (2G-Daten), Metawin-Input (3G-Daten) oder GPS-Input (Apello).

Gültigkeitsdauer der anonymisierten ID

Die Frage der Gültigkeitsdauer einer ID ist für viele Anwendungen von großem Interesse. Zur Ermittlung jener wurden daher für den Großraum Graz Daten für insgesamt 41 Stunden am Stück ausgelesen. In weiterer Folge wurden jeweils das erste und das letzte Event der ID gespeichert und die Zeitdifferenz ermittelt. Folgende Darstellung zeigt die Zeitdifferenzen zwischen erstem und letztem Zeitstempel einer ID im beobachteten räumlichen und zeitlichen Bereich.

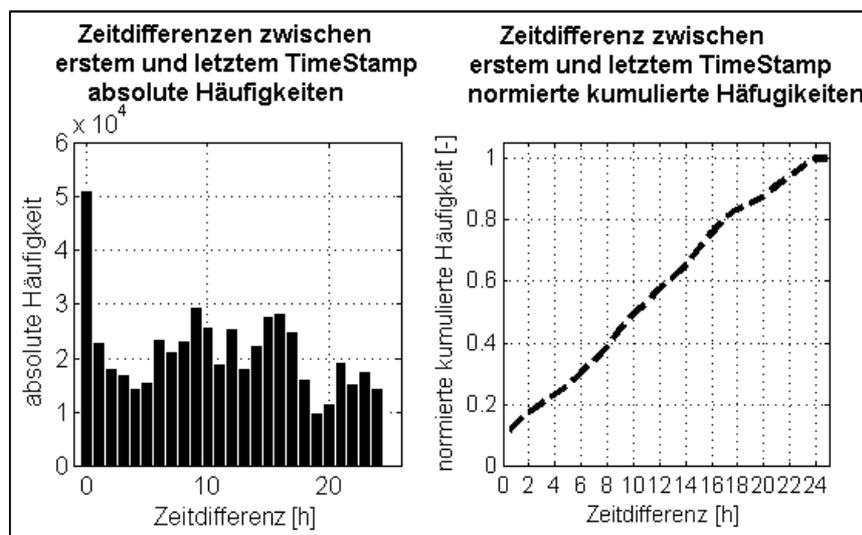


Abbildung 23: Analyse der Gültigkeitsdauer anonymisierter IDs für den Großraum Graz

Insgesamt wurden 497407 verschiedene IDs detektiert. 51314 dieser IDs befinden sich im erstem Block. Jene scheinen entweder nur einmal auf oder stehen kurz vor einem Wechsel. Gut zu erkennen ist, dass der Anteil jener IDs mit einer Aktualisierungsdauer von über 24h sehr gering ist. Es handelt sich dabei um 48 IDs (entspricht 0.097‰). Längere Aktualisierungszeiten konnten nicht festgestellt werden. Somit kann davon ausgegangen werden, dass nach 24 Stunden einem User eine neue, anonymisierte ID per Hash-Verfahren zugewiesen wird.

3.3 Datenimport - iTrafficReader

Beim iTrafficReader handelt es sich um ein Tool, welches vom Institut für Semantische Datenanalyse der TU Graz zur Verfügung gestellt wurde. Dieses Tool liegt als MEX-File vor. MEX-Files (MEX = Matlab EXecutable) sind in MATLAB ausführbare Subroutinen welche in einer anderen Programmiersprache geschrieben wurden und bereits kompiliert sind. Für diese Masterarbeit wurde der iTrafficReader vor allem zum korrekten Einlesen der Rohdaten verwendet. Dabei werden nur die die sechs relevanten Spalten, wie sie bereits in Kapitel 3.2 beschrieben wurden, ausgelesen und gespeichert. Bei der anonymen UserID wird anstelle der 32byte großen Zahlen-Buchstaben-Kombination ein Counter gesetzt und somit jeder UserID eine eindeutige Nummer zugewiesen.

Eine weitere nützliche Funktionalität des iTrafficReaders ist die Möglichkeit Filter zu setzen. Trotz mehrerer möglicher Filteroptionen wird für die weitere Auswertung nur der Lon/Lat-Bereichsfilter verwendet, welcher in Abschnitt 3.5.1 beschrieben wird. Mit diesem kann ein Rechteck beliebiger Größe ausgeschnitten werden. Die Eingaben erfolgen über der Einschränkung minimaler bzw. maximaler Latitude bzw. Longitude. Nach Ausführung des iTrafficReaders können die Daten als csv-Datei abgespeichert oder direkt verwendet werden.

3.4 Berechnung der realen Basisstationsstandorte

Wie bereits zuvor erwähnt, sind die Geokoordinaten (Latitude bzw. Longitude) entweder die Standorte der realen Basisstationen bei Rundstrahlantennen oder die geschätzten Mittelpunkte der Sendekeulen der Winkelstrahlantennen. Um die Daten auf dieselbe Bezugsebene zu stellen, werden zuerst die gefundenen Keulenecken gesucht und anschließend der reale Standort der Basisstation berechnet.

Im ersten Schritt werden die Daten von mehreren Tagen für ganz Österreich ausgelesen. Aufgrund der großen Datenmenge kann die gesamte Prozedur nur sequenziell stundenweise abgearbeitet und erst zum Schluss zusammengefasst werden. Aus den eingelesenen Daten (idgF der 08. und der 09.04.2013) werden zuallererst alle A1-Navi-Events (Eventnummer 48) entfernt. Damit reduziert sich der Inhalt der Koordinateneinträge auf die der realen Basisstationen sowie der Keulenecken. Im nächsten Schritt werden nur mehr die Koordinaten betrachtet. Jede Koordinatenkombination darf lediglich einmal aufscheinen. Nach Bearbeitung aller Stundendateien werden deren Ergebnisse wieder zusammengefügt und auf unterschiedliche Koordinatenkombinationen hin überprüft. Für die oben erwähnten 48 Einzelstunden ergeben sich genau 19.445 verschiedene Geokoordinaten, welche alle Winkelstrahlkeulen und Rundstrahlstationen der ausgelesenen Daten beinhalten. Diese ermittelten Koordinaten müssen nicht zwangsläufig alle im Netz möglichen Standorte darstellen. Gründe dafür können sein:

- extrem selten auftretende Standorte
- temporäre Standorte (z.B. bei einer Großveranstaltung)
- zum Auslesezeitpunkt außer Betrieb stehende Standorte
- neue Basisstationen

Aufgrund der nicht garantierten Vollständigkeit müssen die Daten vor jeder Auswertung auf die Existenz in der Datenbank hin überprüft werden. Noch nicht aufscheinende Positionen müssen ergänzt werden.

In weiterer Folge wird eine Distanzmatrix aller Punkte zueinander erstellt. Bevor die Distanzen zwischen Punkten berechnet werden können, werden die WGS84-Koordinaten in ein winkeltreues Koordinatensystem umgerechnet. Dafür wird im ersten Schritt das UTM-System verwendet. Die Transformation der Koordinaten führt zu einer erleichterten und genaueren Berechnung der Distanzen. Das UTM-System definiert für Österreich zwei verschiedene Meridianebenen zu jeweils 6°-Breite. Berechnung innerhalb einer Meridianebene können sehr genau durchgeführt werden. Berechnungen über eine Ebene hinaus führen zu deutlichen Verzerrungen. Tritt dieser Fall ein, werden die Punkte in das Gauss-Krüger-Koordinatensystem umgerechnet und daraus die Distanz berechnet. Die Berechnung der Distanzen erfolgt in beiden Koordinatensystemen äquivalent über die euklidische Norm. Überschreitet eine Verbindung die Meridianebenen beider Systeme, wird in die Distanz in letzter Konsequenz über die Großkreisdistanz nach Formel 2.26 berechnet. Diese Berechnung dient der Vollständigkeit. Praktisch haben diese großen Distanzen keinerlei Bedeutung, da in weiterer Folge nur Distanzen bis zur technischen Grenze (35km) betrachtet werden.

Sofern es sich bei den im Stream aufscheinenden Punkten um Keulen handelt, ist der Standort der Basisstation unbekannt. Zur Ermittlung der realen Standorte der Basisstation werden im nächsten Schritt für die vermuteten bzw. üblichen Antennenanordnungen überprüft. Dabei handelt es sich meist um Basisstationen mit drei, vier oder sechs Sektoren, welche jeweils dieselben Winkelflächen abdecken. Sind Punkte Teile der oben angegebenen Konfigurationen, stehen diese in geometrischen Beziehungen zu den anderen an der Sektorform beteiligten Punkten. Abbildung 24 beschreibt die einzelnen Abhängigkeiten der Keulenknoten (grüne Punkte) zueinander. Der Radius definiert hier eine Entfernungsumgebung von der Basisstation zu den Keulenknoten, welche im Stream vorkommen. Diese wurden vom Betreiber vorgegeben. Dieser Radius gibt zwar indirekt (durch seinen Wert) über die Reichweite der Basisstation Aufschluss, kann aber nicht direkt mit einer Reichweite gleichgesetzt werden. In Abhängigkeit dieses Radius ergeben sich unterschiedliche Distanzen unter den beteiligten Keulenknoten. Stehen alle fiktiven Keulenknoten einer Basisstation im selben Abstand zur jener und decken denselben Winkel ab, wird diese Keulenformation in weiterer Folge als symmetrisch bezeichnet. Unsymmetrische oder ungeordnete Anordnungen könnten unterschiedliche Radien oder Abdeckungswinkel besitzen und werden nur teilweise berücksichtigt.

Die Darstellung veranschaulicht weiters wie häufig welche Distanzen von einem Punkt ausgehend vorkommen.

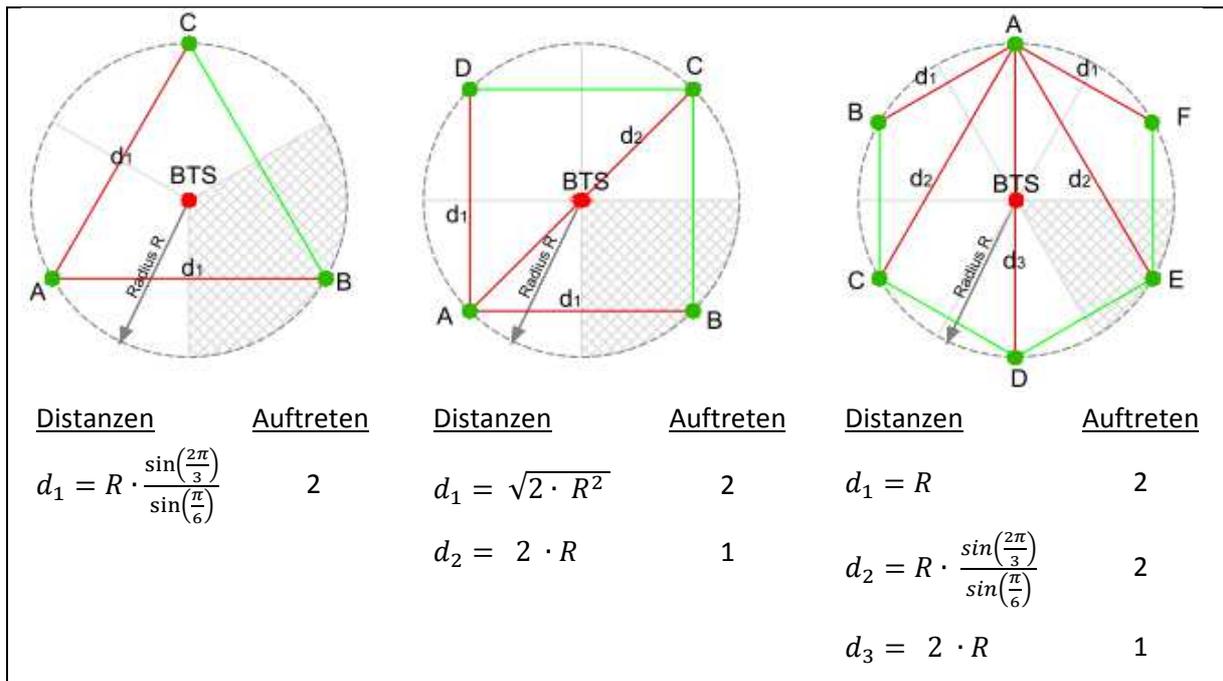


Abbildung 24: Geometrische Abhängigkeitsbedingungen symmetrischer Keulenformationen

Zur Überprüfung wird die Distanzmatrix herangezogen. Bei dieser Distanzmatrix handelt es sich um eine Adjazenzmatrix aller unterschiedlichen Koordinaten mit den Distanzen untereinander. Zur Untersuchung auf benachbarte Keulenpunkte wird jede Zeile der Distanzmatrix untersucht. Existiert eine Zeile mit den in Abbildung 24 definierten Distanzen, und scheinen diese exakt genauso häufig auf, wird anhand der Indizes der passenden Distanzen innerhalb der Zeile eine Submatrix der vermeintlich passenden Nachbarn erstellt. Da die Ermittlung der Distanzen aufgrund der unterschiedlichen, jedoch notwendigen, Umrechnungen nicht fehlerfrei erfolgen kann, wird eine Fehlertoleranz ε zugelassen. Zur Kontrolle, ob es sich tatsächlich um die gesuchte Formation handelt, wird zweierlei vorgegangen. Zum einen wird die zuvor ermittelte Submatrix genau geprüft, ob ausschließlich zugelassene Werte inklusive Fehlertoleranz aufzufinden sind. Ist dies zutreffend, wird im nächsten Schritt ein Startpunkt gewählt dessen Zeile aus der Matrix entfernt wird. Anhand des Spaltenindex wird nun der nächste Punkt im Polygon mit dem Abstand d_1 gesucht. Nun wird dessen Zeile gelöscht und wieder der nächste Nachbar gesucht. Dies wird solange fortgesetzt bis alle Punkte zugeordnet sind. Entspricht die Entfernung des letzten Punktes zum Ausgangspunkt abermals dem Abstand d_1 , handelt es sich um ein geschlossenes Polygon. Trifft dieser Umstand nicht zu oder können Zeilen nicht zugeordnet werden, wird das Polygon verworfen. Dieses Suchverfahren kann für jegliche symmetrische Formation angewendet werden. Für unsymmetrische Anordnungen muss der gesuchte Wert gegebenenfalls pro Durchlauf adaptiert werden. Für den symmetrischen Anwendungsfall ist die Wahl des Startpunktes belanglos. Im Falle unsymmetrischer Formationen muss auf die richtige Wahl des Startpunktes Wert gelegt werden.

Diese oben genannte Verfahren wurde in weiterer Folge für Radien zwischen 2 und 3000 Metern in einem 1m-Intervall für die in Abbildung 24 aufgeführten Geometrien durchgeführt. Als Fehlertoleranz wurde jeweils der Wert $\varepsilon = 2.0m$ verwendet. Die Anzahl der gefundenen Basisstationen aus Keulenpunkten ist in Abbildung 25 ersichtlich. Für den hexagonalen Fall wurden keine Basisstationen gefunden. Bei den triangularen und den quadratischen Formationen sind jeweils

die Radien 270 sowie 1400 Meter deutlich dominierend. Während bei der quadratischen Anordnung ansonsten keine anderen Radien gefunden werden konnten, sind im dreieckigen Fall immer wieder Radien mit genau einem Auftreten vorhanden. Da aber davon auszugehen ist, dass die genannten Radien häufig vorkommen, werden diese Fälle im Weiteren ignoriert. Im Bereich der Dreiecksformation konnten insgesamt 989 Basisstationen (796 für einen Radius von 270m und 193 für einen Radius von 1400m) ermittelt werden. Im Bereich der quadratischen Formation konnten 48 Standorte ermittelt werden. Daraus ergibt sich, dass aus den 19445 Standorten, 3159 (16.25%) eindeutig als Keulenzpunkte identifiziert werden konnten. Im Umkehrschluss muss dies zwar nicht bedeuten, dass die restlichen Standorte zwangsläufig schon die richtigen Basisstationsstandorte sind, dennoch wird dies als Annahme in weiterer Folge vorausgesetzt.

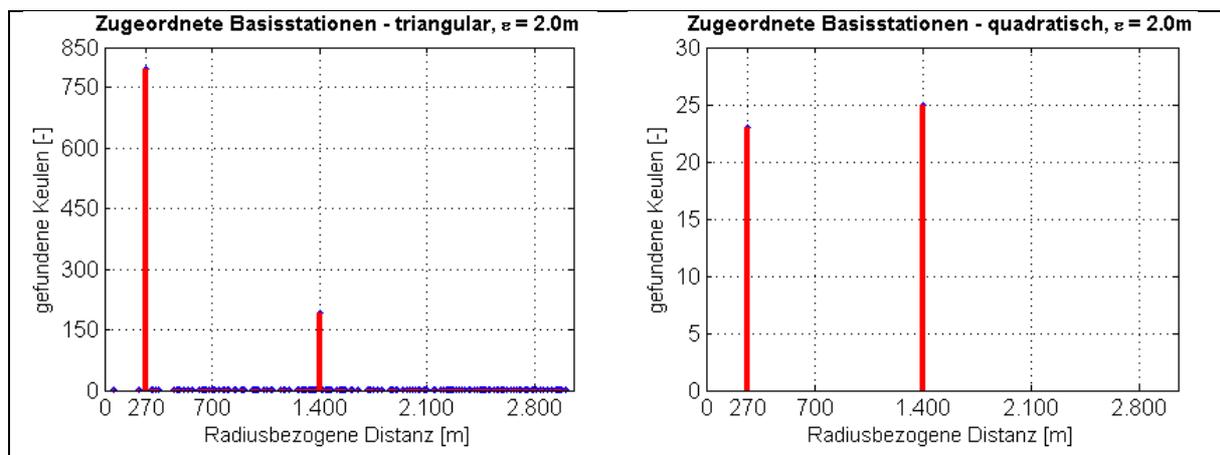


Abbildung 25: Häufigkeiten zugeordneter Basisstationen anhand radiusbezogener Distanzen - triangulare Formation (links) und quadratische Formation (rechts)

3.5 Standortfilterung

Da die Beobachtung der gesamten Daten Österreichs sehr viel Speicher in Anspruch nehmen und zudem sehr lange dauern würde, wird nur ein regional begrenzter Bereich aus den Daten herausgefiltert. Die erste Bereichseinschränkung erfolgt bereits über den iTrafficReader. Dies führt schon zu einer deutlich spürbaren Verkleinerung der Datenmenge. Dennoch ist die Anzahl der gespeicherten Events relativ groß im Bezug zu den später folgenden Analysen. Dies fällt z.B. dann stark auf, wenn ein Straßenstück beobachtet werden soll, dass über seine Länge im Schnitt einen Richtungswinkel von $\pi/4 + n * \pi/2$ aufweist, also z.B. ein Straßenstück mit einem Richtungswinkel von 45° . Dennoch muss in Hinblick auf eine effiziente Datenauswertung der Bereich nochmals eingeschränkt werden. Zum einen geschieht dies über eine verbesserte geographische Bereichseinschränkung und in weiterer Folge durch die Ermittlung relevanter Basisstationen.

3.5.1 Geographische Bereichseinschränkung

Die verbesserte geographische Bereichseinschränkung hat das Ziel die Datenmenge deutlich zu reduzieren bzw. für die Auswertung unwichtige Bereiche zu eliminieren. Zur Ausführung dieser Bereichseinschränkung werden für diese Arbeit zwei unterschiedliche Verfahren definiert. Sie

unterscheiden sich grundsätzlich darin, ob für den bzw. die untersuchten Strecken digitale Lokalisierungsdaten (Punkt-, Streckendaten, o.ä.) vorliegen.

Bereichsauswahl anhand aufgezogener Polygone

Für den Fall, dass keine genauen Punkt- oder Streckendaten des zu untersuchenden Streckenabschnittes zur Verfügung stehen, es aber dennoch möglich sein sollte den geographischen Bereich einzuschränken, wurde die Methode der Bereichsauswahl durch aufgezoogene Polygone entwickelt. Hierfür sind lediglich ein paar wenige Zwischenpunkte notwendig. Diese können aus einer beliebigen Karte ausgelesen werden. Idealerweise liegen diese Punkte an markanten Stellen einer Strecke, wie z.B. Scheitelpunkten von Richtungsänderungen. Je mehr Punkte ermittelt werden, unabhängig davon ob es sich um markante Punkte handelt oder nicht, umso besser kann der reale Straßenverlauf nachgebildet werden.

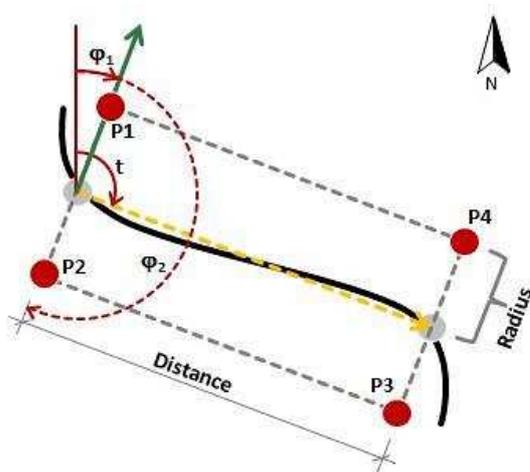


Abbildung 26: Prinzip der Bereichsengrenzung durch Rechteckspunkte

Tabelle 7: Winkelbezüge des Bereichsrechtecks in Abhängigkeit des Quadranten

Richtungswinkel t [rad]	φ_1 [rad]	φ_2 [rad]
$0 \leq t < \frac{\pi}{2}$	$\frac{3}{2}\pi + t$	$t + \frac{\pi}{2}$
$\frac{\pi}{2} \leq t < \pi$	$t - \frac{\pi}{2}$	$t + \frac{\pi}{2}$
$\pi \leq t < \frac{3}{2}\pi$	$t - \frac{\pi}{2}$	$t + \frac{\pi}{2}$
$\frac{3}{2}\pi \leq t$	$t - \frac{\pi}{2}$	$t - \frac{3}{2}\pi$

Die obige Bereichsabfrage wird in zwei Stufen betrachtet. Im ersten Schritt wird eine Nearest-Neighbor-Abfrage getätigt. Hierbei wird überprüft welche Basisstationen innerhalb eines zu definierenden Radius um die wenigen gelegten Streckenpunkte liegen. Für alle weiteren Basisstationen wird im nächsten Schritt überprüft, ob diese in einem Rechteck zu liegen kommen. Die Größe des Rechtecks wird definiert durch die Distanz zwischen den einzelnen Streckenpunkten und dem definierten Radius. Die Lage wird durch die relative Position der einzelnen Streckenpunkte definiert.

Die Qualität der Methode hinsichtlich der Entfernungsgenauigkeit hängt stark von der Anzahl und Lage der Zwischenpunkte sowie der Kurvigkeit der Strecke ab. Die Anwendung dieser Art der Bereichseinschränkung wird nur für den Fall keiner detaillierten Informationen bzgl. Streckenpunkte empfohlen.

Räumliche Bereichsauswahl über digitale Streckenpunkte

Für diese Art der Bereichsauswahl müssen Lokalisierungspunkte der Strecke in relativ geringem Abstand bezogen auf den zu definierenden Umgebungsradius vorhanden sein. Diese Punkte können vom Straßenbetreiber direkt bezogen werden oder durch GPS-Aufnahmen der Strecke in einem akzeptablen Aufzeichnungsintervall ($\leq 1s$). Bei solch kleinen Aufzeichnungsintervallen entsteht quasi eine Hüllkurve mit fast konstanter Entfernung zur Strecke. Alternativ können Daten dererlei Daten auch über freier Geodatenbanken wie beispielsweise das Projekt „OpenStreetMap“ (OSM) [OSM, 2013] oder neuerdings über offene Daten wie [Open Data Steiermark, 2013], [Geodaten Graz, 2013] oder [GIS Steiermark, 2013] bezogen werden.

Die Abfrage, ob Basisstationen im Bereich der zu analysierenden Strecke liegen, kann in mehrere Schritte unterteilt werden:

- Nearest-Neighbor-Abfrage
- Großkreisdistanzen oder metrische Distanzen zu den Nearest Neighbors
- Filtern der Eventzeilen außerhalb der maximalen Distanz

Bei der Nearest-Neighbor-Abfrage geht es grundsätzlich um die Suche nach dem nächsten Lokalisierungspunkt zu einer Basisstation. MATLAB bietet hierfür bereits die Funktion „knnsearch“. Diese ist allerdings nur für metrische Koordinatensysteme mit kartesischen Koordinaten definiert, daher müssten vor der Berechnung alle Koordinaten umgerechnet werden. Eine gute Alternative bietet das Nearest-Neighbor-Tool [SW04]. Mit dessen Hilfe kann die Nearest-Neighbor-Abfrage und die nachfolgende Berechnung der Großkreisdistanzen in einem Schritt gelöst werden. Zum Abschluss werden alle Events außerhalb des festgelegten Radius aus den Daten entfernt.

Gegenüberstellung der räumlichen Bereichsfilterung

Da es bei der räumlichen Bereichsfilterung grundsätzlich um die Reduzierung des Datensatzes geht, ist eine effiziente und sinnvolle Reduzierung der Datenmenge unumgänglich. Abbildung 27 verweist auf diese Problematik. Der dort aufgezeichnete Rechtecksbereich liefert sehr viele Daten, welche nicht benötigt werden (urbanes Gebiet). Durch die eine geeignete Bereichsfilterung können diese nicht benötigten Daten im Sinne einer effizienten Verarbeitung gefiltert werden. Sofern digitale Streckendaten in einem vernünftigen Abstandsintervall vorhanden sind, ist diese Verwendung der polygonalen Auswahl immer vorzuziehen. Insbesondere aufgrund der späteren Geschwindigkeits- und Reisezeitanalyse, welche mit Lokalisierungsdaten detaillierte Ergebnisse liefern kann. In Abbildung 27 sind die Bereichsauswahlarten gegenübergestellt. Dabei ist im nördlichen Bereich die entstandene Hüllkurve auf Basis der Nearest-Neighbor-Einschränkung ersichtlich, während im südlichen Bereich die Methode mit aufgezogenen Polygonen dargestellt ist.

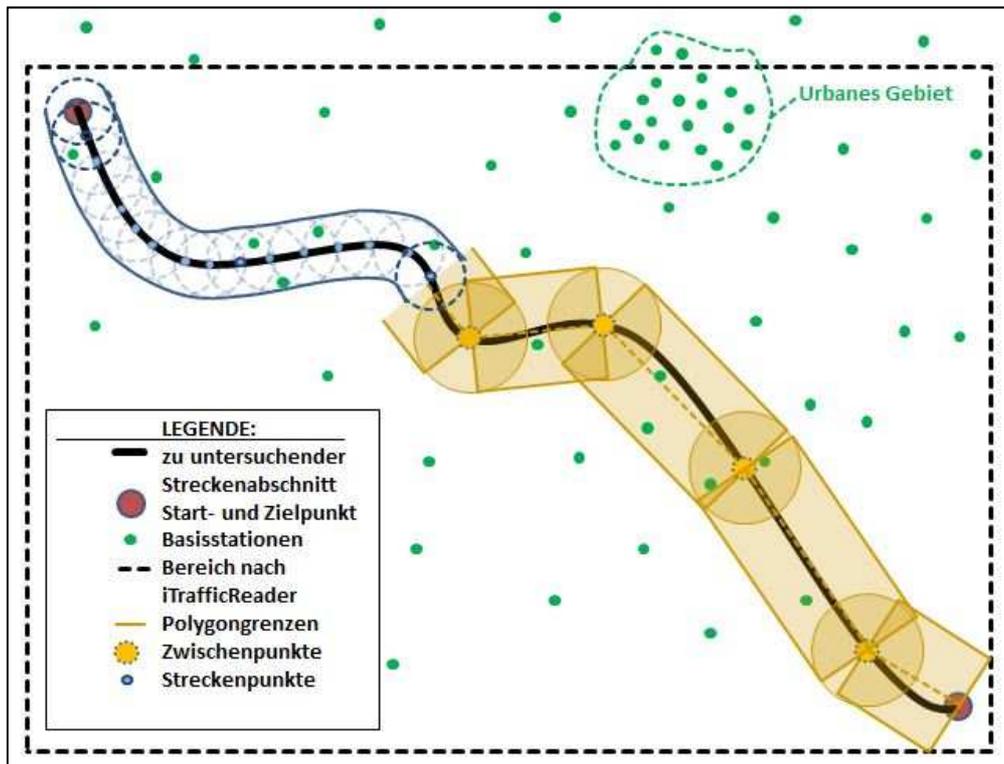


Abbildung 27: Übersichtsbeispiel der Bereichseinschränkungsarten

3.5.2 Ermittlung relevanter Basisstationen

Bisher wurden Basisstationen nur aufgrund ihrer Geoposition im Bezug zur analysierenden Strecke aus dem Datensatz gefiltert. Dies führt zwar zu einer deutlichen Verkleinerung der Datenmenge, dennoch sind nicht alle übriggebliebenen Basisstationen relevant für alle weiteren Auswertungen. Daher wird in weiterer Folge versucht nur die für die Analysestrecke relevanten Basisstationen zu ermitteln.

Diese Ermittlung beruht auf der Annahme, dass manche Basisstationen für aktive User, welche mit höherer Geschwindigkeit (im Vergleich z.B. zu Usern in Wohngebieten) unterwegs sind, besonders „attraktiv“ sind. Diese Basisstationen könnten z.B. Schirmzellen für den schnellen Verkehr darstellen, aber aufgrund fehlender Informationen bezüglich Sendereichweiten kann dies nicht einwandfrei bestätigt werden. Dennoch liegt die Vermutung nahe, dass User am höchstrangigen Straßennetz relativ schnell die Einflussregion einer Basisstation wieder verlassen und dadurch nur wenige Events setzen können. Die Anzahl der unterschiedlichen User an solchen Basisstationen müsste dementsprechend höher sein als jene in Bereichen mit geringerem Verkehrsaufkommen wie beispielsweise an Basisstationen in Siedlungsgebieten. Die logische Schlussfolgerung aus der Annahme wäre eine hohe Quote von Usern zu Events. Diese Quoten können für einen Tag (Verhältnis User pro Tag zu Events pro Tag) berechnet werden. Dadurch werden allerdings jegliche Muster in den Verläufen ignoriert. Daher werden diese Quoten für ein definiertes Intervall berechnet (üblicherweise stundenfein). Für diese Anwendung werden User einmal pro Zeitintervall gezählt, unabhängig davon ob sie im Zeitintervall zuvor schon bei der Basisstation angemeldet waren (im Gegensatz zur Mastendynamik-Auswertung). So können Tagesverläufe generiert und verglichen werden. Um hier besonders diejenigen Bereiche hervorzuheben, welche für kontinuierlich aktive

User attraktiv sind, können die Quoten mit der Verhältniszahl zwischen allen Events einer Basisstation und den spezifischen Events für Cell-Handover gewichtet werden. Dadurch werden allerdings alle Basisstationen eliminiert, welche ausschließlich dem 2G-Netz zuzuordnen sind, da im 3G-Netz keine Cell-Handover-Informationen an das Monitoring-System übertragen werden. Da hierfür 2G- und 3G-Netz gesondert betrachtet werden müssten, entfällt diese Gewichtung und wird später durch eine gesonderte Schwellwertbetrachtung ersetzt.

Im nächsten Schritt werden mittels einer k-means-Clustering (euklidische Distanz) die unterschiedlichen Ganglinien zusammengefasst. Die Untersuchungen zeigten, dass meist drei unterschiedliche Cluster gut zu definieren sind, wobei meist zwei der drei Cluster als relevante BTS definiert werden können. Nicht relevante Basisstationen werden nach dieser Analyse nicht entfernt, da diese in der Aktivitätsanalyse weitere Verwendung finden. Ein Problem, welches allgemein bei dem User/Event-Verhältnis auftritt, ist die Darstellung kleiner und selten verwendeter Basisstationen. Diese haben im Allgemeinen immer einen hohen User/Event-Verhältnistwert. Daher werden aus allen Basisstationen der Cluster 1 und 2 nur jene ausgewählt, welche eine regionspezifische Mindestanzahl an Events pro Tag aufweisen. Diese relevanten Basisstationen werden in weiterer Folge in bestimmten Einsatzregionen für die Geschwindigkeits- und Reisezeitermittlung und in jedem Fall für die Mastendynamik-Analyse verwendet. Die gesamte Ermittlung von relevanten Basisstationen muss nur einmalig erfolgen, bzw. erst zu dem Zeitpunkt wieder neu erstellt werden, wenn sich in der betrachteten Region netzseitig Grundlegendes ändert (Aus- oder Neubau von Basisstationen).

3.6 Aktivitätsanalyse

Das Ziel dieser Analysemethode sollte es sein (ähnlich wie bei [Caceres et al, 2008] oder [Steenbruggen et al., 2012]), ungeplante Ereignisse im Straßenverkehr zu erkennen. Die Grundannahme besteht darin, dass Personen, welche im Stau stehen, ihrem Umfeld mitteilen wollen, dass sich ihre Ankunft verzögern wird. Damit erhöht sich bei Stauereignissen die Anzahl der ausgehenden Telefonate und SMS. Zusätzlich kann auch von einem erhöhten Datenverkehr ausgegangen werden, da angenommen werden kann, dass viele Personen die Zeit nutzen und z.B. E-Mails lesen oder sich in sozialen Netzwerken austauschen.

Die Auswertung selbst beschränkt sich in diesem Fall nicht nur auf die zuvor ermittelten relevanten Basisstationen. Es muss davon ausgegangen werden, dass im Falle eines unerwarteten Ereignisses (Unfall, Verkehrsüberlastung, etc.) der Telefon- und Datenverkehr aufgrund der beschränkten Netzkapazitäten der zuvor eingeschränkten Basisstationen in der gesamten Region zunimmt.

3.6.1 Löschen stationärer IDs

Ein relevanter Punkt dieser Analyse stellt das Löschen stationärer IDs dar. Idealerweise sollten zumindest bis zu einem Ereignisbeginn nur jene IDs gezählt werden, welche aus einer anderen Region stammen. User aus der regionalen Umgebung haben in der Regel nichts mit dem Ereignis zu tun und würden das Ergebnis der Auswertung verfälschen. Ein zulässiger Ansatz wäre hier die Speicherung der geographischen Information jedes Users für ein bis zwei Stunden. Dadurch können stationäre und bewegte User leichter unterschieden werden. Aufgrund der speziellen Einlese- und

Verarbeitungstechnik, wodurch zuerst Daten dateiweise für ganz Österreich eingelesen und danach erst räumlich gefiltert werden können, kann dieser Ansatz nur bedingt verwendet werden.

3.6.2 Datenauswertung

Die Auswertung besteht aus zwei Kernbereichen: der Umkreissuche bzw. -definition und der Ermittlung der intervallspezifischen Häufigkeiten. In der Umkreisanalyse werden alle auftretenden Events innerhalb eines definierten Umkreisradius, ausgehend von definierten Punkten auf der Straßenachse, zusammengefasst. Die Wahl einer geeigneten Untersuchungsreichweite ist dabei besonders wichtig. Bei einem zu klein definierten Untersuchungsgebiet könnten kleine, lokale Ereignisse überproportional ins Gewicht fallen. Bei einer zu großen Wahl der Umgebungsreichweite hingegen könnten wiederum Hinweise auf einen Zwischenfall in der Datenmenge untergehen. Hier ist es besonders wichtig die lokalen Gegebenheiten (Topographie, Einwohnerdichte, usw.) zu analysieren und daraus ein geeignetes Untersuchungsgebiet abzustecken. Lediglich die oberste Schranke von 35km (technische Grenze im 2G-Netz) kann nicht überschritten werden.

3.7 Mastendynamik

Bei dieser Analysemethode wird untersucht wie viele unterschiedliche Nutzer pro Zeitintervall an einer relevanten Basisstation Events ausgelöst haben. Als Ergebnis der Analyse entsteht eine Ganglinie „fremder“ IDs (IDs, welche zuvor nicht in dieser Region aufscheinen) über den betrachteten Zeitraum. Die Grundannahme besteht hierbei, dass bei Masten, welche in der Regel für den mobilfunkmäßigen Netzverkehr schnell bewegter User zuständig sind, die Anzahl der User pro Zeitintervall eine gute Kenngröße darstellen kann. Dies gilt insbesondere für Basisstationen in unmittelbarer Nähe von hochbelasteten Infrastrukturanlagen wie Autobahnen und Schnellstraßen, wichtigen Bahntrassen, sowie allerdings auch für Basisstationen in innerstädtischen Gebieten, beispielsweise Fußgängerzonen oder touristisch attraktiven Bereichen.

Nach einer definierten Vorlaufzeit erfolgt die Auswertung intervallfein. Dieses sollte idealerweise ein ganzzahliges Vielfaches der Aktivitäts- und Geschwindigkeitsanalysen darstellen. Die Berechnung der einzelnen Werte erfolgt anhand der einzelnen User pro Zeitintervall an der jeweiligen Basisstation abzüglich der als stationär bewerteten IDs. Stationär werden für diese Analyse IDs genannt, welche innerhalb einer bestimmten Mindestzeit (üblicherweise ein ganzzahliges Vielfaches des definierten Zeitintervalls) mindestens ein Event an der betrachteten Basisstation ausgelöst haben. Dabei ist immer das letzte ausgelöste Event der ID an der Basisstation ausschlaggebend. Der Zeitbereich, in welchem eine ID nicht aufscheinen darf, ist dabei sinnvoll zu wählen. Ein zu großer Wert kann dazu führen, dass von außerhalb zurückkehrende IDs fälschlicherweise als stationär angesehen werden, zu kleine Werte (unterhalb sinnvoller Zeiten zwischen Aktivitäten) können die Ergebnisse ebenfalls verfälschen.

3.8 Geschwindigkeits- und Reisezeitanalyse

Die Reisezeit und die daraus abgeleitete Reisegeschwindigkeit der Mobilfunkteilnehmer im österreichischen Straßennetz stellt für die Abschätzung der Verkehrslage die wichtigste Grundlage dar. Das Ziel sollte sein, die mittlere Reisezeit bzw. die mittlere Geschwindigkeit anhand diverser Filterungen so gut wie möglich abzuschätzen, damit die vorliegende Verkehrslage nach Level-Of-Service-Kriterien geeignet klassifiziert werden kann. Folgende Abbildung gibt einen Gesamtüberblick

über die Vorgänge der Geschwindigkeits- und Reisezeitanalyse. Im Bereich der Vorfilterung (Abschnitt 3.8.1) werden zuerst die Daten des Monitoring Systems 3 von den restlichen Daten getrennt und gesondert betrachtet. Die verbleibenden Daten werden mittels Ping-Pong-Filter weiterverarbeitet. Der darauffolgende Schritt beinhaltet die Bildung der Trajektorien (Abschnitt 3.8.2) mit den gewählten Filtereinstellungen. Sofern digitale Streckendaten vorhanden sind, folgt das Map-Matching. Andernfalls werden die ermittelten Daten für eine Gesamtstreckenauswertung verwendet.

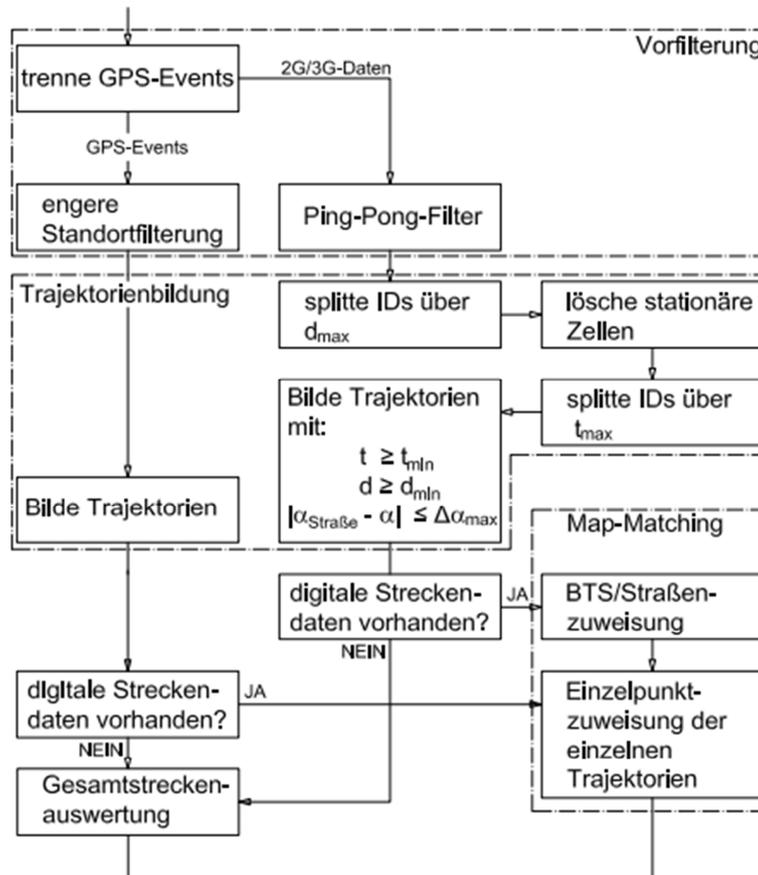


Abbildung 28: Systemüberblick über die Geschwindigkeits- und Reisezeitanalyse

3.8.1 Vorfilterung

Bevor mit dem Generieren und Analysieren von Trajektorien begonnen werden kann, muss zunächst eine Plausibilitätsprüfung der Daten stattfinden.

GPS-Eventtyp

Wie bereits in Abbildung 22 zu erkennen, laufen bei der iTraffic-Plattform drei verschiedene Monitoring-Systeme zueinander. Die Daten aus dem Monitoring-System 3 enthalten dabei GPS-Daten der IDs, welche das betreibereigene Navigationssystem nutzen. Aufgrund der erwarteten Genauigkeit und Abfolgerichtigkeit dieser Art von Daten, werden jene Events aus dem eigentlichen Datensatz getrennt und einer deutlich engeren Umgebungsfilerung unterzogen.

Plausibilitätsprüfung: Ping-Pong-Filter

Wie im Abschnitt 2.4.1 bereits beschrieben können bei aktiven bewegten aber auch statischen Objekten aufgrund der Topographie oder der Auslastung Schwankungen der Signalstärke und/oder –qualität entstehen. Daraus ergeben sich Zellwechsel, welche nichts mit einer realen Bewegung gemein haben. Dies würde in weiterer Folge eine höhere Mobilität der Benutzer vortäuschen.

Um diese Daten herauszufiltern, wurde ein schwellwertbasierter Algorithmus, ähnlich jenem bei [Fiadino et al., 2012], entwickelt. Dieser definiert einen Zellwechsel als Ping-Pong-Wechsel, wenn innerhalb eines Zeitintervalls t_{hop} eine ID von einer Basisstation zu einer oder mehreren anderen Basisstationen wechselt um sich innerhalb dieses Zeitschwellwertes wieder bei der Ausgangsbasisstation anzumelden. Abbildung 29 verdeutlicht diesen Vorgang. Dabei erhält ein Nutzer eine BTS-Reihenfolge 1-2-3-1. Erfolgt der Wechsel von Zelle 1 nach Zelle 2, weiter nach Zelle 3 und wieder zurück zu Zelle 1 innerhalb des Zeitrahmens, ergibt sich die korrigierte Gesamtreihenfolge zu 1-1. Der verwendete Filter wurde so entwickelt, dass beliebig lange Kreise, welche innerhalb des Zeitschwellwertes t_{hop} liegen, detektiert und gefiltert werden.

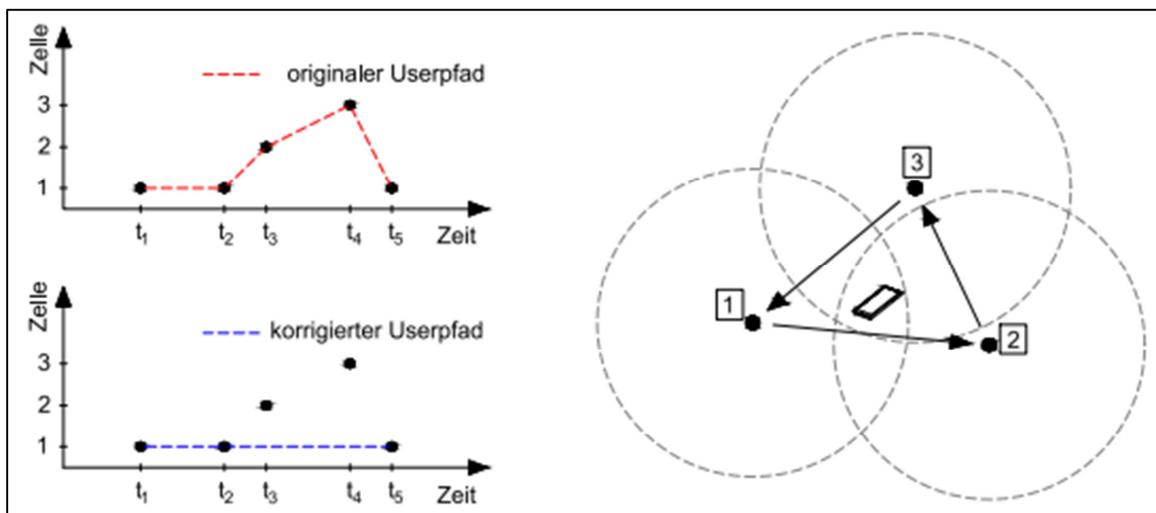


Abbildung 29: Ping-Pong-Handover-Filter

Die Herausforderung besteht nun in der Wahl des Schwellwertes t_{hop} . Wird der Wert zu niedrig angenommen, könnten Zellsprünge in die weitere Datenverarbeitung gelangen und eine höhere Mobilität vortäuschen. Bei zu großer Wahl des Grenzwertes würden lokale Übergangsbedingungen unberücksichtigt bleiben. Nachdem diese Sprungeffekte, welche in Kapitel 2.4.1 näher beschrieben wurden, üblicherweise unter 10 Sekunden dauern, kann für den Wert t_{hop} ein Wert von 10 Sekunden als sinnvolles Maß angesehen werden.

3.8.2 Trajektorienbildung

Zur Ermittlung einer durchschnittlichen Reisezeit und –geschwindigkeit müssen zuerst Einzeltrajektorien diverser User berechnet werden. Bei der Bildung von Trajektorien aus einem ausgeschnittenen Bereich wird jeder Zellwechsel einer ID protokolliert. Nachdem zuvor die Daten bereits von Ping-Pong-Effekten befreit wurden, wird nun in weiterer Folge zur Trajektorienermittlung nur jenes Event gespeichert, bei dem als erstes eine neue Koordinate

vorkommt. Für jede als valid betrachtete Zellveränderung werden Reisezeit und Geschwindigkeit der Mobile Station berechnet.

Zeitliche und räumliche Filterung

Um nur sinnvolle Daten weiterzuverarbeiten, werden eine zeitliche und eine räumliche Filterung verwendet.

Bei der zeitlichen Filterung handelt es sich um eine zu definierende Zeitspanne t_{fil} , welche durch Angabe einer Mindestzeit t_{min} bzw. Maximalzeit t_{max} aufgespannt wird. Diese Werte definieren den zeitlichen Bereich in dem ein neues Event eines Benutzers auftreten darf, damit es für die Erstellung einer Trajektorie unter Verbindung des vorigen Datenpunktes für valid erklärt wird. Die Maximalzeit ist jene Zeit, welche zwischen dem Auftreten des ersten Events auf BTS 1 und dem ersten Auftreten auf BTS 2 verstreichen darf. Ist die verstrichene Zeit größer als der Schwellwert, so existiert keine Trajektorie zwischen BTS 1 und BTS 2. BTS 2 wird als neuer Ausgangspunkt zur Trajektorienberechnung herangezogen. Als Gegenstück wird auch eine Mindestzeit definiert. Im Gegensatz zum Maximalzeitfilter wird hier kein neuer Anfangspunkt einer Trajektorie erstellt. Die Mindestzeit kann, muss aber nicht zwangsläufig, dem Schwellwert des Ping-Pong-Filters t_{hop} entsprechen. Die Schwellenwerte für die Mindest- bzw. Maximalzeit können entweder fix eingestellt sein, oder rekursiv aus dem vorangegangenen Überprüfungsintervall der Verkehrslage bestimmt werden. Dafür werden zuerst Schwellwertgrenzen bestimmt, in denen dieser angepasst werden kann. So kann z.B. im Falle eines Verkehrsunfalls und der damit einhergehenden zunehmenden durchschnittlichen Reisezeit auch die Maximalzeit für die Durchfahrt erhöht werden. So kann die Wahrscheinlichkeit der korrekten Erfassung erhöht werden. Zudem können dadurch die Filterparameter enger gesetzt werden.

Beindet sich ein Benutzer während seiner Fahrt ständig im idle-mode, so wird dieser über die gesamte Fahrstrecke nur wenige Datenpunkte setzen. Dadurch ergibt sich ein weiterer zeitlicher und räumlicher Abstand zwischen den Datenpunkten. Die Generierung einer Trajektorie aus diesen Datenpunkten wäre zwar nicht falsch, aber deren Aussagekraft für die Anwendung zur Verkehrslageschätzung deutlich zu gering. Insbesondere liegt bei der Wahl eines zu großen Wertes für d_{max} die Gefahr darin, dass jene IDs, welche dadurch noch valid bleiben, nicht zwangsläufig die beobachtete Strecke durchfahren haben müssen, da oft auch Alternativrouten möglich sind. Das Pendant zum obigen Fall sind Eventfolgen zwischen sehr nah beieinander liegenden Basisstationen. Daher wird neben der zeitlichen auch eine distanzabhängige Filterung ausgeführt. Diese Filterung ergibt einen Distanzbereich, welcher durch die minimalen und maximalen Distanzen d_{min} bzw. d_{max} zwischen zwei Basisstationen BTS 1 und BTS 2 aufgespannt wird. Dabei wird zur Berechnung der Großkreisdistanz d_{BTS} zwischen den beiden Basisstationen BTS 1 und BTS 2 auf Gleichung 2.26 aus Abschnitt 2.6.3 zurückgegriffen. Ähnlich der zeitlichen wird auch bei der distanzabhängigen Filterung bei über dem Schwellwert liegenden Distanzen ein neuer Startpunkt der Trajektorie definiert. Bei Distanzen unterhalb des definierten Bereiches wird das zu überprüfende Event ignoriert.

Durch die Einführung der zeitlichen und distanzabhängigen Filter wird auch indirekt ein Geschwindigkeitsfilter eingeführt. Bei festen zeitlichen Filterkriterien handelt es sich um fixe Schwellwerte. Werden die Filterzeiten hingegen rekursiv aus den vorangegangenen mittleren Geschwindigkeitswerten \bar{v}_{i-1} und \bar{v}_{i-2} errechnet, sind die Schranken der Geschwindigkeitsfilter

variabel. Für diesen Fall können der untere Geschwindigkeitsschwellwert $v_{min,Sw}$, sowie der obere Geschwindigkeitsschwellwert $v_{max,Sw}$ für jedes Aktualisierungsintervall i folgend definiert werden:

$$v_{min,Sw,i} = \frac{d_{min}}{t_{max}(\bar{v}_{i-1}, \bar{v}_{i-2})} \quad [km/h] \quad (3.1)$$

$$v_{max,Sw,i} = \frac{d_{max}}{t_{min}(\bar{v}_{i-1}, \bar{v}_{i-2})} \quad [km/h] \quad (3.2)$$

Ein Problem, welches sich aus der Anwendung obiger Beziehung ergibt, ist die fehlende Vergleichbarkeit mit historischen Daten. Aus diesem Grund werden für die in Kapitel 4 folgenden Anwendungen die zeitlichen Grenzen fix angenommen.

Richtungswinkelkriterium

Zusätzlich zu den Zeit- und Distanzkriterien muss auch das Richtungskriterium erfüllt sein. Dabei wird die Straße in Bereiche ähnlicher Achsrichtung aufgeteilt und für die jeweiligen Bereiche der Straßenrichtungswinkel $\alpha_{Straße}$ ermittelt. Ergeben sich zwischen zwei Bereichen spitze Winkel, werden zwischen den Bereichen zusätzliche Übergangparameter definiert. Weiters wird für jeden homogenen Abschnitt eine maximale Abweichung $\Delta\alpha_{max}$ vom Straßenrichtungswinkel als Schwellwert eingeführt. Bei der Trajektorienbildung wird nun der Richtungswinkel zwischen den beiden involvierten Standorten ermittelt. Liegt die absolute Differenz zwischen dem Straßenrichtungswinkel und dem Trajektorienrichtungswinkel innerhalb der maximalen Abweichung, kann von einer validen Trajektorie in gewünschter Fahrtrichtung ausgegangen werden. Die Richtungskriterien enthalten Informationen zur Fahrtrichtung. Soll die entgegengesetzte Fahrtrichtung ausgewertet werden, müssen die Richtungskriterien um 180° gedreht werden. Somit ergeben sich für eine Trajektorienauswertung immer nur Daten in eine Fahrtrichtung.

Löschen des ersten Zellwechsels

Ein Problem besteht darin, dass keine Aussage darüber getroffen werden kann wie lange sich eine ID in der ersten protokollierten Zelle befindet. Sie könnte sich schon lange in der Nähe einer Zellgrenze aufhalten, einen Event setzen und kurze Zeit später die Zelle wechseln. Dadurch würde eine deutlich zu kurze Reisezeit festgestellt werden.

Aus dem oben genannten Gründen wird nun ein Filter eingebaut, der die erste Trajektorie jeder ID entfernt. Daher ist für die Analyse eines Abschnittes notwendig, einen um diese erste Zelle erweiterten Bereich auszuschneiden.

3.8.3 Matching der Trajektorien

Das Matching des aktuellen Events einer Basisstation auf die reale Straße ist sicherlich die komplexeste Aufgabe. Genau genommen kann nur bei einer kontinuierlichen aktiven Verbindung zum Zeitpunkt des Handovers der reale Standort auf der Straße „relativ“ genau bestimmt werden. Eine SMS beispielsweise kann überall im Einflussbereich der Basisstation gesendet oder empfangen werden und somit keinem exakten Straßenpunkt zugeordnet werden. Da für diese Arbeit aber keine Eventtypen ausgeschlossen werden (Filterung erfolgt lediglich über Zeit-, Distanz- und

Richtungskriterien), führt dies bei nicht kontinuierlichen Eventtypen zwangsläufig zu leicht verschobenen Standorten in Richtung der vorangegangenen Basisstationen und somit zu einer Minderung der Reisezeiten sowie Geschwindigkeiten.

BTS-Straßenzuweisung

Für die straßenseitige Zuordnung selbst wird auf die Handovermethode zurückgegriffen. Dabei wird zuerst die Distanz zwischen den beiden involvierten Basisstationen errechnet. Nun wird ein Distanzfaktor p eingeführt welcher den vermeintlichen Übergabepunkt zwischen Basisstation 1 und 2 widerspiegeln soll. Ausgehend von Basisstation 1 wird die Distanz in Richtung Basisstation 2 mit dem Faktor multipliziert. Für $p = 0.5$ ergibt dies exakt den Mittelpunkt zwischen den beiden Standorten (Voronoi-Abstand). Da für einen realen Handover die Empfangssignalstärke der neuen Basisstation um eine definierte Spanne höher sein muss als jene der alten Basisstation, wird in der Regel ein Distanzfaktor über 0.5 angenommen.

Nachdem der Handoverpunkt auf der direkten Verbindungslinie zwischen den beteiligten Basisstationen berechnet wurde, muss jener Punkt noch der Straßenachse zugeordnet werden. Dafür wurden zwei mögliche Verfahren entwickelt, welche in Abbildung 30 beispielhaft dargestellt sind. Das erste Verfahren sucht den Punkt auf der Straßenachse, welcher dasselbe Empfangssignalstärkenverhältnis wie der direkte Handoverpunkt zwischen Basisstation 1 und Basisstation 2 aufweist. Dafür wird für die gesamte Strecke, welche aus Punktdaten vorliegt, die konvexe Hülle berechnet und mit der Lotrechten auf die Direktverbindung der Basisstationen geschnitten. Sofern ein Schnittpunkt existiert, wird die Strecke solange geteilt und die neue konvexe Hülle der übriggebliebenen Streckenpunkte berechnet, bis nur mehr zwei Punkte übrig bleiben. Der Schnittpunkt der beiden Linien ergibt den Handoverpunkt auf der Straße. Dieser liegt aufgrund der Berechnungsmethode meist irgendwo zwischen zwei Streckenpunkten.

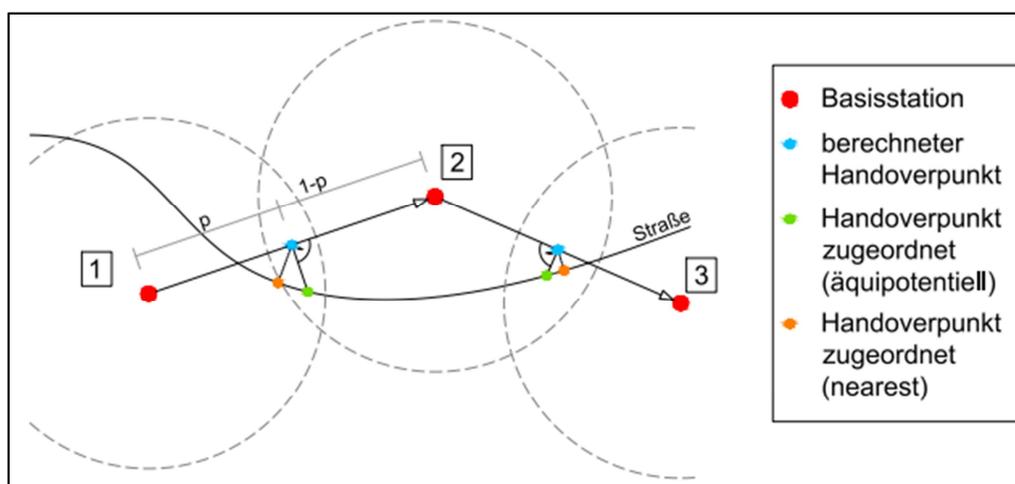


Abbildung 30: Map-Matching-Beispiel

Sofern die Auflösung der Strecke anhand der gegebenen Punkte fein genug ist, kann durch Zuordnung des zuvor ermittelten Punktes an den näheren der beiden umgebenden Straßenpunkte der zugeordnete Handoverpunkt ermittelt werden. Dieser Zuordnung liegt die Annahme ähnlicher Leistungslevel der Basisstationen zu Grunde. Zur Ausführung der oben genannten Methode müssen die Daten in einem metrischen Koordinatensystem vorliegen, daher ist der Anwendung eine

Koordinatentransformation vorgeschaltet. Im zweiten Verfahren wird der Handoverpunkt per Nearest-Neighbor-Verfahren direkt an die Straßenachse zugeordnet.

Einzelpunktzuzuweisung der einzelnen Trajektorien

Einzelne Trajektorienpunkte können nach obiger Zuweisung immer nur zwischen zwei zugewiesenen Handoverpunkten berechnet werden (sog. Double-Handovermethode). Diese Punkte wurden zuvor schon der Straßenachse bzw. den Straßenpunkten zugeordnet. Nun werden die Geschwindigkeiten zwischen den einzelnen zugewiesenen Punkten aus der kumulierten Distanz und der Reisezeit errechnet. Weiters wird jedem Punkt zwischen zugeordneten Handoverpunkten die berechnete Geschwindigkeit zugewiesen und dem jeweiligen Auswertungsintervall zugeordnet. Somit ergibt sich ein $u \times v \times w$ – Matrix, mit u als Anzahl der Streckenpunkte, v als Anzahl der Zeitintervalle im Beobachtungszeitraum und w als Anzahl der Trajektorien, welche den beobachteten Punkt überfahren. Bei gleichbleibenden Beobachtungsintervallen sind u und v konstante Größen. Ein fixer Wert des ersten Feldeintrages u bildet quasi einen Querschnitt mit v Zeitintervallen, w Geschwindigkeitswerten und w IDs pro Zeitintervall, was wiederum quasi einer betreiberspezifischen Verkehrsstärke aus Mobilfunkdaten $q_{Mobilfunk}$ entspricht.

Streckenauswertung bei Fehlen von digitalen Streckendaten

Liegen für den betrachteten Bereich keine digitalen Informationen vor oder sind diese zu grob skaliert, kann statt dem oben erwähnten Map-Matching eine allgemeine Streckenauswertung ausgeführt werden. Dabei können die Geschwindigkeiten aus den direkten Verbindungen zwischen den einzelnen Basisstationen errechnet werden. Diese Geschwindigkeiten werden für den gesamten Streckenverlauf aufsummiert und gemittelt. Die so gewonnenen Daten haben jedoch nicht den direkten Bezug zu den real gefahrenen Geschwindigkeiten auf der Straße. Es können lediglich qualitative Aussagen über Änderungen im zeitlichen Verlauf getätigt werden. Die Genauigkeit bzw. Anwendbarkeit dieser Methode hängt davon ab, wie stark sich die Verhältnisse der einzelnen Zellwechsel verändern. So werden beispielsweise Zellwechsel zwischen Basisstationen mit größeren Distanzen im Schnitt immer höhere Geschwindigkeiten aufweisen, als Zellwechsel mit geringeren Distanzen. Bleiben diese Verhältnisse gleich oder ist deren Verlauf kalkulierbar, können gute Ergebnisse erzielt werden.

Um die Genauigkeit der ermittelten Geschwindigkeiten zu erhöhen und deren Bezug zur Realität besser abzudecken, können auch bei fehlenden digitalen Streckendaten fiktive Handoverpunkte ermittelt werden. Dabei beziehen sich diese Punkte lediglich auf die Direktverbindung zwischen den Basisstationen und werden durch die Mittelung der Streckendistanz ermittelt. Da dabei aus jedem Zellwechsel ein neuer Punkt entsteht, sind mindestens drei gültige Zellwechsel erforderlich um eine Trajektorie zu bilden.

3.8.4 Schätzung der aktuellen Reisezeit

Bei der Schätzung der aktuellen Reisezeit gibt es prinzipiell zwei unterschiedliche Herangehensweisen. Da die Reisezeit als Zeitspanne der Durchfahrtsdauer zwischen zwei Punkten definiert ist, kann diese direkt aus jenen Trajektorien ermittelt werden, welche selbigen Start- und Zielpunkt besitzen. Unter der Annahme eines passenden Map-Matchings ergeben sich damit real

vergleichbare Werte, allerdings werden alle anderen Trajektorien nicht in die Berechnung miteinbezogen. Diese Strategie ist bei einer dominanten Verbindung zwischen zwei Basisstationen durchaus sinnvoll. Diese Situation ist allerdings die Ausnahme. Die zweite Möglichkeit in der Abschätzung besteht durch die Integration des aktuellen Geschwindigkeitsfeldes über die Strecke. Dadurch kann die Abhängigkeit von ortsgleichen Trajektorien entfernt werden. Genau genommen ist dieser Ansatz nur bei hinreichend kleinen Abschnitten gültig (Fahrzeit immer unter der Aktualisierungsintervallgrenze). Bei größeren Streckenabschnitten würde die Trajektorie in ein neues Aktualisierungsintervall fallen, in welchem sich auch bereits ein neues Geschwindigkeitsfeld berechnen lassen würde. Dieser Umstand wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Die aktuelle Reisezeit wird somit durch die Integration des aktuellen Geschwindigkeitsfeldes gelöst und ist somit für eine Echtzeitintegration gut geeignet.

3.9 Zusammenfassung

Wie bereits des Öfteren erwähnt, ist die sinnvolle Datenreduktion ein wichtiges Thema. Beispielsweise liegt die Gesamtgröße der gespeicherten Daten eines einzigen Tages bei bis zu 75 GB. Bei Betrachtung längerer zeitlicher und/oder räumlicher Bereiche ist daher eine Reduktion der Daten im Sinne einer sinnvollen Verarbeitungszeit notwendig, weswegen dieser Punkt relativ viel Zeit in Anspruch nahm. Daher wurde auch versucht im Rahmen der Kenntnisse eine effiziente Programmierung in MATLAB auszuführen.

Ein ebenfalls sehr wichtiger Schritt ist Ermittlung der realen Basisstationsstandorte. Da im verwendeten Stream keinerlei Informationen über die Art der Basisstationen enthalten waren, musste die notwendige Zuordnung von Keulenknoten experimentell erfolgen. Vor allem die Methodik, welche zur Reisezeit- und Geschwindigkeitsanalyse angewendet wird, machte diese Ermittlung erst notwendig. Das Aufspüren der Anordnungen jeglicher Form bedingte einiger zeitintensiver Vorarbeiten wie beispielsweise der gesamte Bereich der Koordinatentransformation.

Im Bereich der Kennwertermittlung war der Bereich der Geschwindigkeits- und Reisezeitanalyse sicherlich der dominante Block, wobei dabei das Map-Matching davon den aufwendigsten Teil darstellt. Auch hier waren zeitintensive Vorarbeiten notwendig. Auch das Matching über die Handoverpunkte bereitete Probleme. Bei sehr kurvigen Gebieten und einer ungünstigen Lage der Basisstationen kann die ermittelte Linie gleicher Leistungsleveldifferenzen mehrere Teile der Straßenachse kreuzen. Umgekehrt können bei ungünstiger Lage der Basisstationen gegen Ende eines betrachteten Bereiches oft keine Schnittpunkte auf diese Art erzeugt werden. Sofern eines dieser beiden Probleme auftritt, wird die alternative Methode herangezogen. Weiters wurde versucht mittels einiger der in Abschnitt 2.7 erwähnten Ähnlichkeitskoeffizienten IDs der Straße zuzuordnen. Dabei gab es zwei relevante Probleme. Zum einen kann meist keine eindeutige Normroute, welche den Straßenverlauf entlang der Mobilfunkzellen darstellt, ermittelt werden und zweitens können vor allem auf Freilandstrecken meist nur sehr wenige Punkte innerhalb eines sinnvollen Zeitintervalles gesetzt werden. Neben den räumlichen Filterungen, wie in Abschnitt 3.5 zu finden, wurde ebenso versucht nur aktive IDs (hinsichtlich Telefonaten) hinsichtlich der Eventtypen zu filtern. Allerdings haben sich bei den Messfahrten, welche im nächsten Kapitel beschrieben werden, gezeigt, dass es meist nicht möglich ist einen Aktivitätszeitraum einer ID zu ermitteln. Hier nochmals zu erwähnen ist

die Grundannahme, dass die beteiligten Basisstationen gleiche Leistungslevel besitzen. Fakt ist jedoch, dass diese Annahme nicht immer eingehalten werden kann. Ein weiterer Punkt, welcher die Anwendbarkeit einschränken kann, ist der Anteil starker Signalstörungen, wie beispielsweise Tunnelbauten. Für Streckenabschnitte mit hohem Tunnelanteil müssen in andere Lösungen gefunden werden. Die Kennwertermittlungen über Mastendynamik sowie die Aktivitätsanalyse sind deutlich einfacher. Ihre Aussagekraft bezieht sich auf die Region allerdings kann keine fahrtrichtungsspezifische Aussage getätigt werden.

4 Anwendungen

4.1 Vergleichsdaten

Zur Validierung und insbesondere zur Kalibrierung der zuvor vorgestellten Methoden ist es zwingend notwendig Vergleichsdaten heranzuziehen. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden GPS-Messfahrten durchgeführt, welche nachstehend analysiert werden. Querschnittsdaten des österreichischen Autobahnbetreibers ASFINAG dienen in weiterer Folge zur Kalibrierung der Parametereinstellung der zuvor definierten Methoden. Des Weiteren kommen Traffic Message Channel (TMC) –Meldungen zum Einsatz, welche zur Ermittlung von ungeplanten Ereignissen im österreichischen Autobahnnetz dienen.

4.1.1 GPS-Messfahrten

Ein wichtiger Teil dieser Masterarbeit stellt die Analyse von GPS-Messfahrten dar. Hierfür wurden für drei verschiedene Bereiche Messfahrten unternommen.

Messfahrten Graz – Salzburg

Die ersten Messfahrten fanden im Mai 2012 statt. Sie verliefen von Graz über Ried/Traunkreis nach Salzburg (Route siehe Abbildung 31).

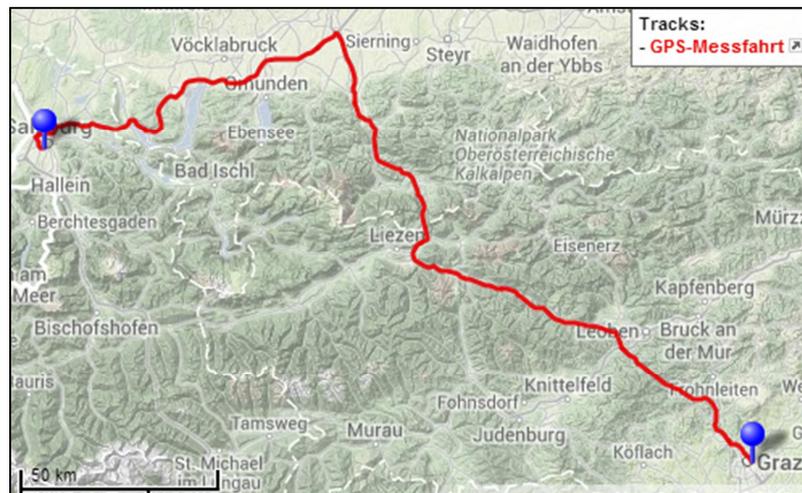


Abbildung 31: Fahrtroute der Messfahrten Graz-Salzburg

Dabei wurden 2 Fahrzeuge mit jeweils mindestens 2 Personen (Fahrer und min. 1 Beifahrer) mit hochgenauen GPS-Messgeräten der Firma RaceLogic ausgestattet. Beide Fahrzeuge fuhren simultan dieselbe Route. Die Beifahrer erhielten die Aufgabe mit ihrem Mobiltelefon gelegentlich Aktivität zu setzen und diese per Handprotokoll zu vermerken, wie in Tabelle 8 auszugsweise ersichtlich.

Auf Basis dieses Protokolls konnten die wahrscheinlichsten IDs aus dem Gesamtdatensatz des Messtages herausgefiltert werden. Da diese Messfahrten ganz am Anfang dieser Masterarbeit standen, war deren Hauptaufgabe in der Untersuchung der allgemeinen Verständnisfähigkeit der

Daten, der Erkundung geeigneter Herangehensweisen zur Ermittlung von Reisezeit und -geschwindigkeit sowie der prinzipiellen Möglichkeit der Rekonstruktion der Routen.

Tabelle 8: Auszüge aus dem Messfahrtsprotokoll der Mobilfunknutzung

Datum	Uhrzeit	Ungefährer Ort	Name	Benutzungstyp
09.05.2012	08:42	Maut Gleinalmtunnel, A9	Benutzer 1	SMS gesendet
09.05.2012	09:18	Maut Bosrucktunnel, A9	Benutzer 1	SMS gesendet

Messfahrten Klagenfurt – Graz bzw. Graz - Klagenfurt

Weitere Messfahrten erfolgten im Bereich Jänner bis April 2013. Diesmal wurde als Route die Strecke Klagenfurt nach Graz, bzw. retour gewählt. Im Unterschied zu den beiden vorangegangenen Messungen wurde in diesem Fall besonders darauf geachtet das mobile Endgerät möglichst viel aktiv zu nutzen. Die zu analysierende Fahrtroute beginnt auf der Autobahn A2 ab der Auffahrt Klagenfurt Ost und reicht bis zum Knoten Graz West (siehe Abbildung 32). Die Aufzeichnung der GPS-Tracks erfolgte mit den internen GPS-Empfängern der benutzten Android-Smartphones und der Aufzeichnungssoftware aus [SW02]. Aufgrund der unzureichenden Genauigkeit der händischen Aufzeichnungsmethode wurde diesmal eine automatische Erfassung der Aktivitäten angestrebt, welche mit der mobilen Applikation „Call Meter 3G“ [SW01] durchgeführt wurde. Diese Applikation für Android-Smartphones speichert sekundengenaue Aktivitätsinformationen. Nach Export dieser Informationen als csv-Datei werden diese zur unterstützenden Suche der IDs im gespeicherten Stream verwendet. Leider gab es im Messzeitraum mehrfach Probleme (unvermutete Streamänderung und daraus resultierender Verlust an Daten sowie Ausfall des 2G-Moduls und daraus resultierende Unvollständigkeit der Daten). Somit konnten von 14 getätigten Fahrten nur 3 gültige ermittelt werden. Weiters gab es Probleme mit der GPS-Aufzeichnung bei der Fahrt am 23.03.2013. Folgende Tabelle beinhaltet die Metadaten der gültigen Messfahrten.

Tabelle 9: Metadaten valider Messfahrten Klagenfurt-Graz bzw. retour

Fahrt	Datum	Abfahrtszeit	Fahrtrichtung	Öffentliches Verkehrsmittel (ÖV)
1	01.01.2013	17:45	Graz	ja
2	21.03.2013	18:45	Klagenfurt	ja
3	23.03.2013	12:45	Klagenfurt	ja

Eine Übersicht der abgefahrenen Strecke in Abbildung 32 zu finden. Dabei wurden für die Auswertung nur die Bereiche herangezogen, welche sich tatsächlich auf der Autobahn befinden.

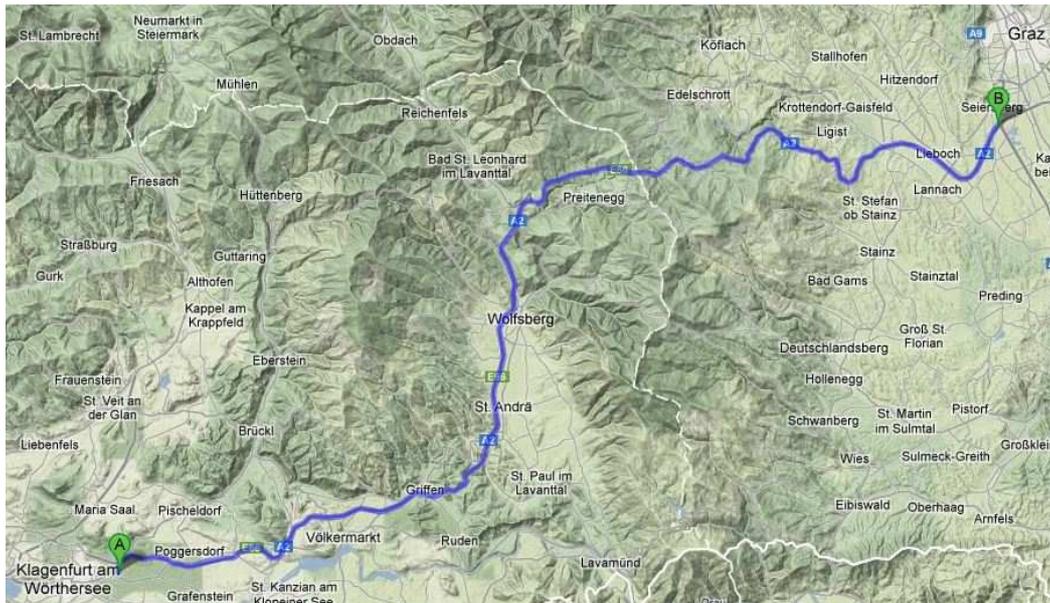


Abbildung 32: Fahrtroute der Messfahrten Klagenfurt-Graz bzw. retour

Messfahrten Graz innerstädtisch

Um nicht nur in ländlichen Gebieten Messungen durchzuführen, wurden auch für ein innerstädtisches Gebiet Messungen durchgeführt. Aufgrund der Tatsache, dass in städtischen Gebieten mehr Netzverkehr existiert, als in ländlichen Bereichen, ist die Auffindung der richtigen IDs in den übertragenen Daten deutlich schwieriger. Der Ausfall des 2G-Moduls in Kombination mit der großen Menge an IDs in Städten führten leider dazu, dass einige IDs nicht aufgefunden werden konnten. Schlussendlich konnten dennoch 3 Fahrten, welche alle am 06.06.2013 im Grazer Stadtgebiet getätigt wurden, entdeckt und ausgewertet werden. Die Metadaten dieser Fahrten sind in Tabelle 10 ersichtlich sind.

Tabelle 10: Metadaten valider innerstädtischer Messfahrten

Fahrt	Abfahrtszeit	Von (Bezirk)	Nach (Bezirk)	Verkehrsmittel
1	14:22:51	Gösting	St. Leonhard	PKW
2	14:49:02	St. Leonhard	Gösting	PKW
3	15:48:25	Lend	St. Leonhard	PKW

4.1.2 Querschnittsdaten

Zur Kalibrierung der in Kapitel 3 erwähnten Methoden zur Bestimmung der Geschwindigkeiten und der Verkehrsstärke werden Querschnittsdaten der ASFINAG eingesetzt. Die Daten beinhalten Querschnittsinformationen der Autobahn A4 in beide Fahrtrichtungen für die Streckenkilometer 26.585 und 32.400. Der Zeitraum der Daten ist auf den Mai 2012 begrenzt. Der Datensatz beinhaltet minutenfeine Daten über die Anzahl, die Geschwindigkeit und die Nettozeitlücke der Fahrzeuge am Querschnitt. Dabei sind die Fahrzeuge in 2 Fahrzeugklassen (Pkw-ähnliche und Lkw-ähnliche Fahrzeuge) unterteilt.

4.1.3 Traffic Message Channel – TMC

Anhand von Traffic Message Channel Meldungen werden in weiterer Folge Beispielfälle untersucht. Die TMC-Meldungen dienen hier in erster Instanz zur Auffindung solcher Fälle und im weiteren Verlauf zur Überprüfung bezüglich Anschlägen der Methoden anhand der Testfälle. Die TMC-Daten wurden von Ö3 übermittelt und beinhalten Informationen wie sie in Tabelle 11 dargestellt sind.

Tabelle 11: Traffic Message Channel (TMC) – Spaltenbezeichnungen und deren Bedeutung

Spaltenbezeichnung	Bedeutung
IDOrganisation	Name der Erstellerredaktion (z.B. TICOE 3 für Ö3)
IDNumber	Nummer der Meldung
InfoVersion	Fortlaufende Versionsnummer der Meldung
Status	Status der Meldung (2 – Erstellung/Änderung, 5 – Löschung, 6 – zeitliche Verlängerung)
ActivateTime	Gültigkeitsbeginn der Meldung in UTC
ExpiryTime	Vordefinierter od. geplanter Ablauf der Gültigkeit in UTC
RoadNumber	Kurzbezeichnung der Straße (z.B. A4)
MessageText	Meldung in Textform
Type	Meldungstyp (0 – Störung, 2 – Baustelle, 100 – Radar)
EventCategory	Kategorie der Meldung (siehe unten)
AreaOfInterest	Größe des Gebietes innerhalb derer Meldung gültig ist (0 – lokal, 1 – regional, 2 – überregional)

Bei der Kategorie der Meldung kann zwischen 11 verschiedenen Möglichkeiten unterschieden werden. Für diese Arbeit wurden nur die Kategorien 1 (Verkehrslage), 3 (Unfälle) und 5 (Sperrungen) zur Analyse herangezogen.

4.2 Validierung mittels GPS-Messfahrten

Das folgende Kapitel stellt einen Vergleich zwischen den real gefahrenen Routen (GPS-Logs) und den Einträgen in den Mobilfunkdaten her. Da diese Messfahrten zeitlich sehr zerstreut zu liegen kommen, streuen auch deren qualitativen Aussagemöglichkeiten. Damit sind vor allem die unterschiedlichen Aufzeichnungsarten gemeint, welche im Laufe der Arbeit im Sinne der Qualität geändert werden mussten. Die für alle Messfahrten zusammengefassten Erkenntnisse werden hier in weiterer Folge aufgezeigt. Dennoch sind die Ergebnisse chronologisch geordnet und sollen auch einen Einblick in die Wissensfindung bringen.

Ergebnisse der Messfahrten Graz – Salzburg

Wie schon zuvor erwähnt, handelt es sich bei diesen Fahrten um die ersten ihrer Art, welche für die Arbeit ausgewertet werden sollten. Aufgrund der ungenauen Aufzeichnungen (händisch formulierte Liste) können keine Aussagen über mögliche zeitliche Unterschiede zwischen dem Auftreten eines Events in den Mobilfunkdaten und deren realen Bezugspunkten bzw. -zeiten getätigt werden. Im Vordergrund dieser Auswertung steht die Analyse zur Ermittlung der realen Reisezeit und der zurückgelegten Distanz, um daraus auf die Reisegeschwindigkeit zu schließen. Dafür werden die

beiden Datenquellen GPS und Mobilfunkdaten anhand ihres Zeitstempels zugeordnet. Weiters wird in dieser Analyse versucht, einen Skalierungsfaktor zu finden, welcher es erlaubt direkt aus der Geschwindigkeit zwischen den einzelnen BTS auf die reale Geschwindigkeit auf der Straßenachse rückzuschließen.

In Abbildung 33 sind 6 verschiedene Geschwindigkeitsverläufe dargestellt:

- GPS 1 (Hz) - (originale GPS-Aufzeichnung im 1-Hertz-Intervall)
- GSM - Geschwindigkeitsverlauf von BTS_i nach BTS_{i+1} aus der Zeitdifferenz und der direkten Luftlinienentfernung nach Formel 2.19
- GSM (Min-Intervall) - Geschwindigkeitsverlauf von BTS(t) nach BTS(t+t_{min}). T_{min} stellt eine Mindestzeitdifferenz dar. Erfolgt ein Zellwechsel noch vor Erreichen dieses zeitlichen Abstands, wird der Zellwechsel ignoriert
- GPS (Min-Intervall) – Äquivalent zur Mindestzeitdifferenz bei den GSM-Daten wird auch für das GPS-Signal zur besseren Vergleichbarkeit dasselbe Mindestintervall gewählt
- GPS-120sec – Gleitender Durchschnitt der GPS-Signale, insbesondere zur Überbrückung kurzweiliger Ausfälle aufgrund von Abschattungen etc.
- GSM Zellwechsel (ZW) – Hierbei wird die GSM-Geschwindigkeit über den realen Punkt des Zellwechsels auf der Straße berechnet.

Es wird ersichtlich, dass der reine (ungefilterte) GSM-Geschwindigkeitsverlauf aus den direkten Basisstationsverbindungen sich nicht sonderlich zur Darstellung der Streckengeschwindigkeit eignet.

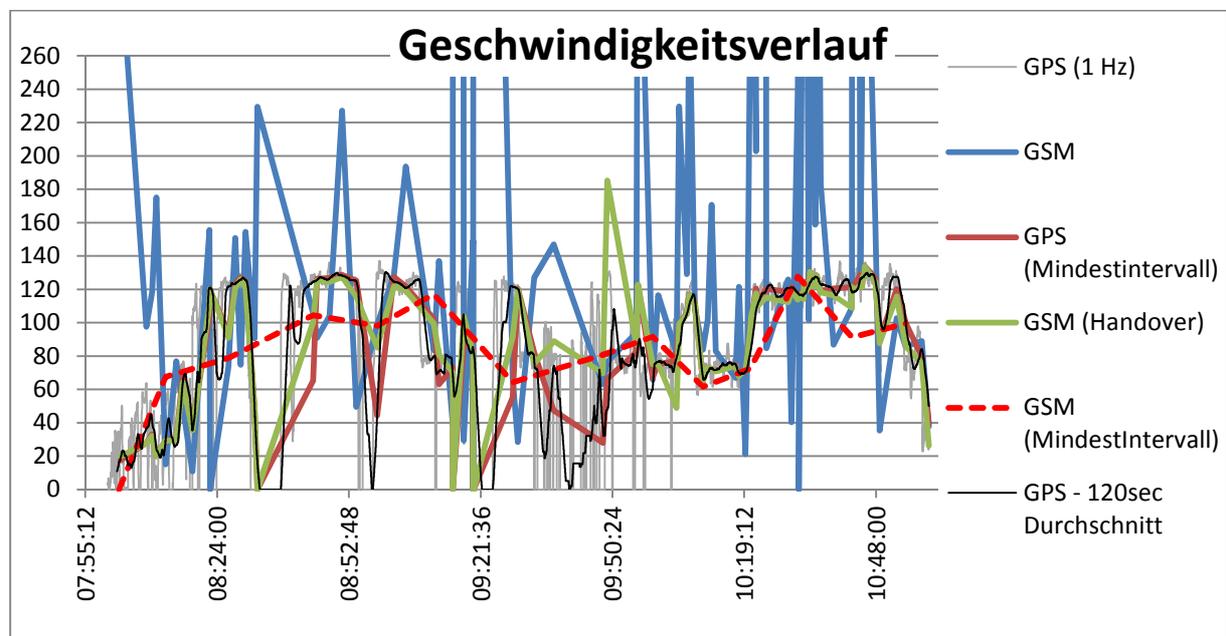


Abbildung 33: Gegenüberstellung der GSM- bzw. GPS- Geschwindigkeitsverläufe eines Probanden der Messfahrt am 09.05.2012

Ein detaillierter Vergleich der Geschwindigkeiten findet sich in Tabelle 12. Dabei wurden 3 verschiedene Geschwindigkeiten aus den Mobilfunkdaten ermittelt: die mittlere Geschwindigkeit (v_{mittel}) aus allen Zellwechseln, die aus den per GPS ermittelten Zellwechseln (v_{mittel_ZW}) und jene

aus dem Ansatz eines zeitlichen Mindestabstand von $t=10\text{min}$ ($v_{\text{mittel_minT}}$). Diese Geschwindigkeiten wurden einerseits direkt und andererseits über die Zeit gewichtet berechnet. Die Küzel MS stehen wiederum für Mobile Stations. Bei den mitgeführten Mobilfunkgeräten MS 2 und MS 3 wird deutlich, dass die direkte Verwendung aller Einzelgeschwindigkeiten nicht zum gewünschten Ergebnis führt, da die ermittelten Geschwindigkeiten deutlich zu hoch sind. Bei MS 1 hingegen führt auch die direkte Verwendung aller Punkte zu einem niedrigeren Ergebnis, als die Vergleichsdaten, was sich durch die minimale Verwendung dieses Gerätes erklären lässt. Der Vergleich der drei Ansätze (direkte Verwendung, Zellwechsel und Mindestaktualisierungsdauer) zeigt, dass die Verwendung der Zellwechsel wie auch die Verwendung einer Mindestaktualisierungsdauer die Ergebnisse bei mehrheitlich aktiven Geräten deutlich verbessern. Durch die Verwendung einer gewichteten Geschwindigkeitsermittlung bekommen Ausreißer eine geringere Gewichtung und beeinflussen die Ergebnisse nicht so deutlich, wie man am Vergleich der direkten zur gewichteten Geschwindigkeiten für die MS 2 gut erkennen kann.

Tabelle 12: Vergleich der mittleren Geschwindigkeiten und der gefahrenen Gesamtdistanz zwischen GPS- und GSM-Trajektorien

	v_{mittel} [km/h]	d_{total} [km]	$v_{\text{mittel_ZW}}$ [km/h]	$d_{\text{total_ZW}}$ [km]	$v_{\text{mittel_minT}}$ [km/h]	$d_{\text{total_minT}}$ [km]
GPS ¹	93,57	277.61	-	-	-	-
GPS ²	101.30	277.61	-	-	-	-
GSM - ungewichtet						
MS 1	89.62	201.87	89.62	197.97	89,62	201.87
MS 2	1168.14	372.62	93.48	263.56	88.84	253.74
MS 3	113.74	250.62	90.65	240.02	93.40	227.41
GSM – gewichtete Geschwindigkeit (mittlere Reisegeschwindigkeit)						
MS 1	74.99	201.87	74.99	197.97	74.99	201.87
MS 2	126.36	372.62	89,38	263.56	88.56	253.74
MS 3	91.63	250.62	87.76	240.02	88.34	227.41
¹ mittlere GPS-Geschwindigkeit aus Log-Daten nach Filterung von Signalausfällen						
² mittlere GPS-Geschwindigkeit rein auf Basis von Ortsveränderungen						

Ergebnisse der Messfahrten Graz – Klagenfurt bzw. retour

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Messfahrten zwischen Klagenfurt und Graz dargestellt. Aufgrund der geringen Anzahl gültiger Tracks kann auf die eigentliche Intention dieser Fahrten, die Ermittlung und Überprüfung von Handover-Punkten bzw. deren Streuung, nicht eingegangen werden. Daher werden in diesem Abschnitt die Daten eventspezifischer betrachtet und anschließend wiederum Vergleiche über die Streckengeschwindigkeiten geführt, welche einerseits über die unbearbeiteten Daten, sowie andererseits anhand der zuvor in Kapitel 3 vorgestellten Methoden errechnet wurden. Als Referenz werden erneut per GPS aufgenommene Tracks verwendet.

Allgemeines

Über den gesamten Streckenverlauf zwischen Klagenfurt und Graz meldeten sich die MS der Probanden im Schnitt an 39 verschiedenen Basisstationen an. Im Gesamten betrachtet registrierten sich die IDs in 90 unterschiedlichen Zellen. Davon wurden rd. 73.3% (66 BTS) der Basisstationen von maximal einer ID benutzt. Immerhin 24.4% (22 BTS) schienen in 2 der 3 extrahierten Fahrten auf. Eine Übereinstimmung in allen drei Fahrten konnten nur 2.2% (2 BTS) aufweisen.

Betrachtung der Eventtypen

Bei Betrachtung der absoluten Eventhäufigkeiten, wie sie in Tabelle 13 dargestellt sind, zeigt eine Konzentration der Eventtypen auf ein paar wenige, welche wirklich mobilitätsrelevant zu sein scheinen. Während des gesamten Fahrtverlaufes tauchen lediglich 14 von 40 möglichen Eventtypen auf. Interessant ist vor allem der große Anteil des Events 32 (Handover Cell Update) bei den ersten beiden Fahrten, da diese den regulären Zellwechsel eines aktiven Gerätes anzeigen. Noch häufiger treten Events des Types „A_Other“ (Eventnummer 25) auf. Dieser Typ, der gemäß [Telekom Austria Group, 2013] eine unklassifizierte Meldung an der A-Schnittstelle im GSM-Netz darstellt, tritt vor allem bei Zellwechseln auf - oft unmittelbar vor dem Handover-Event.

Tabelle 13: Häufigkeiten autretender Events aller Messfahrten zwischen Klagenfurt und Graz

Event	Eventtyp	Messfahrt 1	Messfahrt 2	Messfahrt 3
3	GB_Others	0	0	1
5	IU_CS_Paging	0	0	4
7	IU_Other_TLLI	6	2	13
8	IU_Other_TMSI	8	2	13
11	IUPS_Routing_Area_Update_RA_Updating	1	0	0
16	IUCS_SMS_Mobile_Originated	0	0	4
19	IUCS_Connect_Acknowledge	1	1	1
24	A_Disconnect	3	3	0
25	A_Other	39	58	5
28	Short Message Service	0	0	1
29	Mobile Terminating Call	3	0	0
32	Handover Cell Update	10	13	3
34	Mobile Originated Call	18	7	0
36	Setup	1	1	0

Ein weiteres Phänomen, welches aus den absoluten Eventhäufigkeiten ersichtlich wird, ist die Diskrepanz zwischen der Anzahl der Anrufe (Events 19, 29 und 34) und jener der Anrufbeendigung (Events 20 und 24). Das Event 20 („IUCS Disconnect), welches einer Anrufbeendigung an der IU-Schnittstelle im UMTS-Netz gleichkommt, erscheint überhaupt nicht. Das GSM-äquivalente Event (24) ist bei 2 Messfahrten jeweils nur 3mal zu finden. Außerdem scheint es Verzögerungen zwischen realer Beendigung eines Gespräches und den Beendigungsevents zu geben. Beispielsweise tritt das Event „A_Disconnect“, sofern es überhaupt aufscheint, meist ca. 20 – 30 Sekunden zeitverzögert auf.

Die Anzahl der begonnenen Anrufe scheinen im Vergleich zu den realen Werten zu hoch. Bezogen auf Messfahrt 1 summieren sie sich mit den o.g. Events auf 22. Im Vergleich dazu stehen 9 real getätigte Anrufe, welche durch [SW01] festgestellt wurden. Dies hat den Grund, dass scheinbar bei einem Rufaufbau zuerst eine geeignete Zelle gesucht werden muss, um eine gute Verbindung zu garantieren. Dabei wird an jeder beteiligten Basisstation eines der obigen Events ausgelöst. Da diese Stabilisierungsphase meist innerhalb einer Sekunde abläuft, können diese Muster herausgefiltert werden. Danach ergeben sich für die erste Messfahrt 8 gültige Anrufe. Der fehlende Anruf kann durch Vergleich der Zeiten zwischen den aufgezeichneten Aktivitäten und den Mobilfunkdaten gefunden und den Events 7 und 8 zugeordnet werden.

Auf Basis der Messfahrten können generell die Eventnummern 7 (IU_Other_TLLI) und 8 (IU_Other_TMSI) manchmal anderen Vorgängen wie Anrufen oder SMS zugeordnet werden, wobei in diesem Fall deren Standort richtig erscheint. Gut ersichtlich ist dieser Umstand auch bei Betrachtung der Messfahrt 3. Dort wurden im betrachteten Zeitraum 11 SMS gesendet und 3 Anrufe getätigt. Bei Betrachtung der typischen SMS-Events (Eventnummern 16 und 28) sind lediglich 5 Events auffindbar. Bei zeitlicher Betrachtung ist vor allem der Umstand interessant, dass meist kurz aufeinanderfolgende Aktivitätseinheiten des Öfteren mit den Eventnummern 7 und 8 „verschleiert“ werden. Im Gegensatz dazu können allerdings gelegentlich Events der beiden o.g. Nummern auftreten, welche nichts mit einer realen bzw. theoretisch möglichen Verbindung gemein haben. In den Daten der Messfahrt 1 beispielsweise lösen diese Events einen Sprung mit einer Entfernung von über 110km zum realen Aufenthaltsort aus. Nachdem bereits in Kapitel 2.4.1 angegeben wurde, dass 35km die absolute Grenze im GSM-Netz darstellt, ist dieser Sprung nicht realistisch.

Betrachtung der mittleren Geschwindigkeiten

Nachdem zur Aufnahme der Daten der öffentliche Verkehr genutzt wurde, welcher in Wolfsberg einen Zwischenstopp einlegt, wird der Analysebereich in zwei Teile aufgeteilt. Teil 1 beschäftigt sich mit dem Bereich zwischen der ASt. Klagenfurt Ost und der ASt. Wolfsberg Nord. Der Bereich zwischen ASt. Wolfsberg Nord und Graz Webling bildet den zweiten Teil. Der gesamte Bereich zwischen Ab- und Auffahrt in Wolfsberg sowie der Zwischenhalt des ÖV am Hbf. Wolfsberg werden nicht betrachtet.

Zur Ermittlung korrigierter Trajektorien wurden die vorhandenen Daten zuerst gefiltert. Mit den Filtereinstellungen $t_{\min} = 2\text{min}$, $d_{\min} = 50\text{m}$, $d_{\max} = 10\text{km}$, $d\text{Alpha} = 45^\circ$ und einem mittleren Streckenrichtungswinkel von 55° (bzw. 235° in Fahrtrichtung Klagenfurt) in Fahrtrichtung Wolfsberg ergaben sich die gefilterten Zellen. Abbildung 34 stellt die ungefilterten Daten (links) den gefilterten Zellen (rechts) für den Abschnitt Klagenfurt – Wolfsberg gegenüber. Für den Bereich Wolfsberg – Graz wurden mit Ausnahme des Streckenrichtungswinkels und der maximalen Richtungswinkeländerung $d\text{Alpha}$ dieselben Einstellungen verwendet. Der Richtungswinkel der Strecke wurde mit 45° in Fahrtrichtung Graz bzw. 225° in Fahrtrichtung Wolfsberg festgelegt. Zur Berücksichtigung des Autobahnverlaufes für diesen Abschnitt wurde eine maximale Richtungswinkeländerung $d\text{Alpha}_{\max}$ von 80° angenommen.

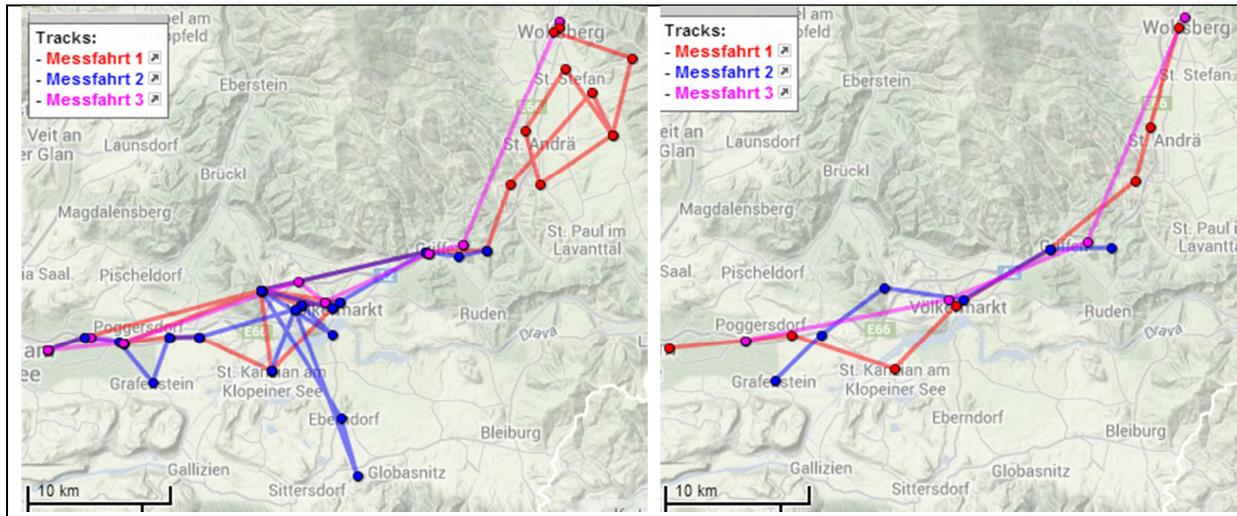


Abbildung 34: ungefilterte (links) sowie gefilterte Mobilfunk-Datensätze (rechts) der Messfahrten zwischen Klagenfurt und Wolfsberg

In weiterer Folge konnten die Geschwindigkeitskennwerte berechnet werden. Ermittelt wurden jeweils der arithmetische Mittelwert, Medianwert sowie der gewichtete Mittelwert bezüglich der Reisezeit (mittlere Reisegeschwindigkeit) aus den direkten Ortsveränderungen zwischen den einzelnen Basisstationen jeweils für die Originaldaten, sowie nach Anwendung der Methoden und Filterungen aus Kapitel 3. Zum Vergleich wurden diese Kennwerte auch für die aufgezeichneten GPS-Tracks berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Vergleich der mittleren Geschwindigkeiten der Messfahrten zwischen Klagenfurt und Graz

MF	GPS				ohne Filter				mit Filter			
	v_{mittel}	v_{median}	$v_{\text{mittel,w}}$	n	v_{mittel}	v_{median}	$v_{\text{mittel,w}}$	n	v_{mittel}	v_{median}	$v_{\text{mittel,w}}$	n
Abschnitt Klagenfurt - Wolfsberg												
1	96.3	99.8	96.3	1850	723.1	268.5	229.8	28	100.0	88.5	94.5	9
2	96.3	100.3	96.6	1512	1318.4	258.5	331.0	22	98.3	105.0	97.2	6
3	99.6	102.4	99.8	1541	1177.1	169.8	142.1	9	156.9	102.5	130.1	4
Abschnitt Wolfsberg - Graz												
1	91.9	99.3	91.9	2377	2274.2	374.3	521.2	45	84.7	90.0	84.2	6
2	96.1	99.0	95.6	1924	2720.6	278.8	315.1	49	92.9	79.1	84.8	10
3	99.1	101.2	96.2	2010	3225.0	345.6	218.4	29	93.3	75.2	81.3	6

Gut ersichtlich sind dabei die allgemein sehr hohen mittleren Geschwindigkeiten aus den ungefilterten Daten. Teilweise sind die Werte im Mittel sogar weit über der Schallgeschwindigkeit. Diese Werte entstehen durch sehr unrealistisch schnelle, technisch unmögliche Ortsveränderungen, wie sie bereits zuvor bei der Betrachtung der Eventtypen erwähnt wurden. Auch die Medianwerte der ungefilterten Daten weisen im Allgemeinen eine 2- bis 3-fach überhöhte Geschwindigkeit auf. Betrachtet man nun die gefilterten Daten, so liefern diese deutlich geringere Abweichungen von der

Realität. Die Filterung der Daten führt zwar zum Verlust einiger Aufenthaltspunkte, liefert aber im Gegenzug eine deutliche Angleichung an die real gefahrenen Geschwindigkeiten.

Ergebnisse der innerstädtischen Messfahrten

Im Schnitt ergeben sich pro Fahrt 9.33 verschiedene Lokalisierungen. Durch Zuweisung der Keulen zu ihren jeweiligen Basisstationsstandorten reduziert sich die Anzahl der unterschiedlichen Aufenthaltspunkte im Schnitt auf 7.0, was einer Reduktion von knapp 25% entspricht.

Betrachtung der Eventtypen

Tabelle 15 listet alle Events, welche während der Fahrten ausgelöst wurden. Dem vorigen Bereich ähnlich ist die hohe Anzahl der Eventnummern 7 und 8. Durch Vergleich der Aktivitäts- mit den Mobilfunkdaten und durch die gute Eingliederung der Events 7 und 8 in den Trackverläufen, wie sie in der Abbildung 35 ersichtlich ist, kann von legitimen SMS-Ersatz-Events gesprochen werden. Weiters fällt auf, dass es keine Handover-Events gibt. Dies resultiert zum einen daraus, dass nur bei Messfahrt 1 ein Gespräch geführt wurde und zum anderen werden im UMTS-Netz keine Cell-Handover an das Monitoringsystem übergeben.

Tabelle 15: Häufigkeiten der auftretenden Events aller innerstädtischen Messfahrten

Event	Eventtyp	Messfahrt 1	Messfahrt 2	Messfahrt 3
4	GB_Routing_Area_Update_RA_Updating	0	0	1
5	IU_CS_Paging	1	2	0
7	IU_Other_TLLI	14	7	27
8	IU_Other_TMSI	14	9	32
11	IUPS_Routing_Area_Update_RA_Updating	1	1	0
16	IUCS_SMS_Mobile_Originated	5	10	6
17	IUCS_SMS_Mobile_Terminated	9	0	23
18	IUCS_SETUP	1	0	0
19	IUCS_Connect_Acknowledge	4	3	0
20	IUCS_Disconnect	4	0	0
25	A_Other	2	0	0
28	Short Message Service	1	0	0
29	Mobile Terminating Call	1	0	0

Betrachtung der mittleren Abweichungen zwischen Mobilfunkevent und GPS-Log

Im nächsten Schritt wurden die Abweichungen der GPS-Positionen zu denen aus den Mobilfunkdaten bei Auftreten eines Events berechnet. Da die GPS-Logs des Öfteren keine oder verfälschte Signale erhielten, konnte zu einigen Events keine passende Position ermittelt werden. Besonders betrifft dies die Messfahrten 1 und 3. Dort konnten weniger als 20% der Punkte eindeutig zugewiesen werden. Messfahrt 2 mit einem Anteil von 47% befindet sich in einem akzeptableren Bereich. In Tabelle 16 sind die Ergebnisse der mittleren Abweichungen dargestellt. Auffällig dabei ist, dass bis auf den Mittelwert der Messfahrt 1 alle Ergebnisse der Berechnung ohne vorherige Basisstationszuweisung

besser sind als jene mit einer solchen. Auf Basis der Routenverläufe, wie sie in Abbildung 35 zu sehen sind, waren diese Ergebnisse zu erwarten.

Tabelle 16: mittlere Abweichungen zwischen GPS- und Mobilfunk-Position bei auftretenden Events

Fahrt	ohne BTS-Zuweisung			mit BTS-Zuweisung					
	Mittelw. [m]	Median [m]	SD [m]	Mittelw. [m]	Median [m]	SD [m]	n_total [-]	n [-]	n_Anteil [-]
1	550.88	341.75	625.22	533.90	341.75	652.23	57	10	0.18
2	180.74	197.77	44.81	366.65	391.82	89.73	32	15	0.47
3	125.87	88.90	82.06	262.98	317.62	99.43	89	14	0.16

Betrachtung der mittleren Geschwindigkeiten

Im Folgenden werden die Ergebnisse der mittleren Geschwindigkeiten aus den Daten mit jenen aus den GPS-Logs gegenübergestellt. Berechnet wurden jeweils der absolute mittlere Geschwindigkeitswert, sowie die gewichtete Geschwindigkeit hinsichtlich der Reisezeit (mittlere Reisegeschwindigkeit). Tabelle 17 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen. Dabei wird ersichtlich, dass sich die mittleren Geschwindigkeiten allgemein besser anhand der Keulensprünge errechnen lassen.

Tabelle 17: Mittlere Geschwindigkeiten der innerstädtischen Messfahrten mit bzw. ohne BTS-Zuweisung

Fahrt	GPS		ohne BTS-Zuweisung		mit BTS-Zuweisung	
	Mittel [km/h]	gew. Mittel [km/h]	Mittel [km/h]	gew. Mittel [km/h]	Mittel [km/h]	gew. Mittel [km/h]
1	27.76	17.38	27.75	16.16	33.27	16.40
2	34.64	21.97	69.33	24.22	151.09	29.01
3	25.86	8.45	41.66	8.62	17.68	6.64

Betrachtung der Routen

In Abbildung 35 sind die gefahrenen Routen (blau) den Routen aus den Mobilfunkdaten gegenübergestellt, wobei links die originalen (rot) und rechts die basisstationzugeordneten Daten (magenta) verwendet wurden. Bei der Betrachtung jener Routen spiegeln sich die zuvor gewonnenen Erkenntnisse wieder. So ist beispielsweise die visuelle Ähnlichkeit bzw. Abstand der Basisstationsverbindungen zur realen Route der Messfahrt 2 bei der Verwendung der originalen Daten deutlich besser als jene der zugewiesenen Daten. Lediglich bei Messfahrt 3 konnten durch die BTS-Zuweisung die Keulensprünge am Ende der Fahrt in Bereich St. Leonhard entfernt werden, wodurch sich die Route rein visuell klarer definiert.

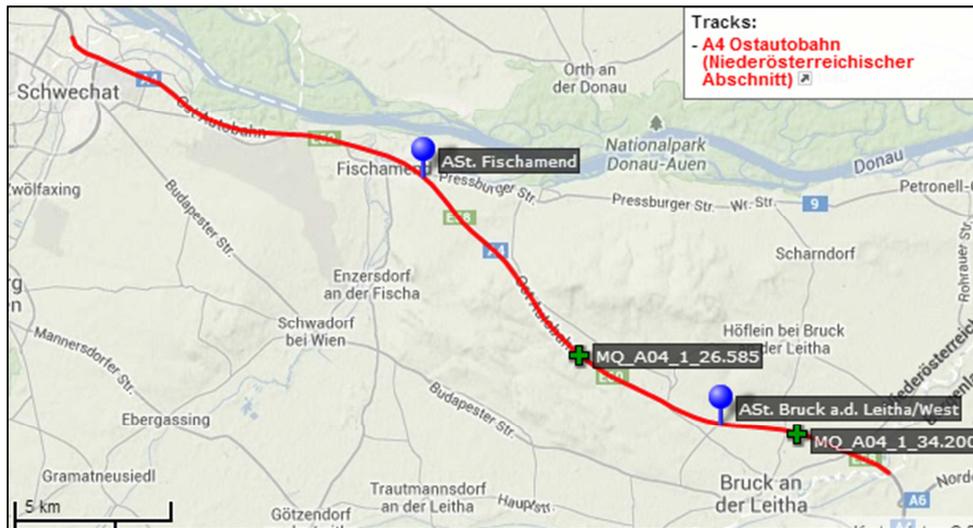


Abbildung 36: Übersicht über den betrachteten Abschnitt der A4 Ostautobahn

Zum Vergleich werden die Daten des Messquerschnittes MQ_A04_1_026.585 der Autobahn A04 in Fahrtrichtung Ungarn verwendet. Anfangs werden die Mobilfunkdaten für Zeitraum Mai 2012 mithilfe des iTrafficReaders tagesweise mit den folgenden Bereichseinschränkungen eingelesen:

- Latitude: 48.014700 - 48.156530
- Longitude: 16.450000 - 16.845421

Somit ergeben sich 31 tagesfeine Dateien. Da der iTrafficReader die IDs durch einen Counter ersetzt, welcher mit jeder neu eingelesenen ID hochgezählt wird, stimmen dadurch die ID-Nummern eines Tages nicht mit denen des folgenden Tages überein. Demzufolge können auch keine Trajektorien tagesübergreifend detektiert werden.

Generell existieren bei dieser Methode 7 unterschiedliche Stellschrauben (minimale und maximale Distanz, minimale und maximale Zeitdifferenz, maximale Richtungswinkeldifferenz in Bezug zur Straßenrichtung, der Umkreisradius sowie der Handoverdistanzfaktor) zur Ermittlung von Trajektorien. Würden für jede Einstellungsmöglichkeit nur 4 verschiedene Werte ermittelt werden, so ergäbe sich eine Anzahl von 4^7 , also 16384 mögliche Kombinationen. Die Rechenzeit der bereits vorgefilterten Daten für den gesamten Monat Mai 2012 für eine Kombination dauert ca. 1 Stunde und 25 min (± 10 min, in Abhängigkeit der Filtereinstellungen). Alle Kombinationen zu ermitteln würde zu lange dauern. Aus diesem Grund wurden für diese Analyse nur 31 verschiedene Kombinationen (Sets) erstellt, wobei bei allen möglichen Einstellungen mit Ausnahme der Umkreisdistanz Änderungen vorgenommen wurden. Der geographische Bereich wurde mit 5 km Umgebungsdistanz fix definiert. Daraus kann zwar nicht mit Sicherheit die beste Kombination abgeleitet werden, dennoch sollten die Ergebnisse den Grad des Einflusses relativ gut widerspiegeln bzw. Trends für etwaige Verbesserungen darlegen. Für alle Sets wurden die absoluten Geschwindigkeitsdifferenzen des 10min-Mittelwertes aus Mobilfunkdaten zu den 10-minütig aggregierten Querschnittsdaten gerechnet und statistisch über den ganzen Monat Mai 2012 ausgewertet. Die Ergebnistabellen der o.g. statistischen Auswertung der 31 Sets befinden sich im Anhang A.

Vorverarbeitung

Um gleiche Vorgänge nicht bei jedem Durchlauf wiederholen zu müssen, wurde eine Vorverarbeitung vorgenommen. Ausgehend von den 31 Output-Files des iTrafficReaders wurden folgende Schritte im Sinne der Vorverarbeitung abgearbeitet:

- Ersetzen der Keulenkpunkte durch die zugeordneten Basisstationen
- Bereichsfilterung (5km – fixiert)
- Löschen des Eventtyps 48 (GPS-Input)
- Löschen tagesstationärer IDs

Als tagesstationär werden für diesen Fall IDs gewertet, welche über den gesamten Beobachtungszeitraum an maximal zwei verschiedenen Basisstationen angemeldet waren. Diese IDs würden bei der Berechnung in weiterer Folge ohnehin verloren gehen. Die Beibehaltung jener IDs im Datensatz würde wiederum zu einer Verlängerung der Rechendauer führen.

Exkurs: Pearson-Korrelationskoeffizient

Der Pearson'sche Korrelationskoeffizient r_{xy} beschreibt das Maß eines linearen Zusammenhanges zwischen zwei metrischen Merkmalsausprägungen x und y . Der gültige Wertebereich für den Koeffizienten liegt zwischen -1 und 1. Dabei gilt, je näher der Wert an 0 herankommt, desto geringer ist der Zusammenhang zwischen den Merkmalen. In Matlab kann dieser Korrelationskoeffizient mit dem Befehl *corrcoef* aufgerufen werden.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.1)$$

mit

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i$$

Auswertung der Sets

In diesem Abschnitt werden die zusammengefassten Ergebnisse der einzelnen Sets gesamt betrachtet. Dabei ist besonders interessant in welchem Bereich die Ergebnisse variieren. Ausgewertet wurden für alle 31 Sets die mittlere absolute Geschwindigkeitsdifferenz, deren Medianwerte und Standardabweichung, sowie der Pearson-Korrelationskoeffizient zwischen den Geschwindigkeiten zu den einzelnen Vergleichszeitpunkten. Ebenfalls wird die mobilfunkgenerierte Verkehrsstärke, welche sich aus der Anzahl der Trajektorien pro Zeitintervall ergibt, verwendet. Dabei wurde das Verhältnis von realer zu mobilfunkgenerierter Verkehrsstärke berechnet und wiederum die Mittel- und Medianwerte, sowie die Standardabweichung für alle 31 Sets ermittelt. Zusätzlich wurde der Pearson-Korrelationskoeffizient zwischen mobilfunkgenerierter und gemessener Verkehrsstärke berechnet. Für die weitere Auswertung wurden die Daten in

tageszeitliche und wochentags gegliederte Gruppen zusammengefasst. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse wurden gruppenspezifische Boxplots der zusammengefassten Kennwerte erstellt.

Betrachtung der Übereinstimmung bezüglich der Geschwindigkeiten

Folgende Abbildung enthält die zusammengefassten Geschwindigkeitskennwerte in tageszeitspezifisch gruppierter Form. Dabei stehen die Kürzel P1 für Zeitperiode 1 (06:00 – 22:00) und P2 für Zeitperiode 2 (22:00 – 06:00). Besonders auffällig ist die deutlich höhere Geschwindigkeitsdifferenz, wie auch deren Standardabweichung in den Nachtstunden. Dieses Faktum wirkt sich auch negativ auf die Korrelation zwischen real gemessenen und aus Mobilfunkdaten errechneter Geschwindigkeiten aus. Die größere Differenz der Geschwindigkeiten in den Nachtstunden lässt sich durch die geringere Anzahl der gültiger IDs erklären.

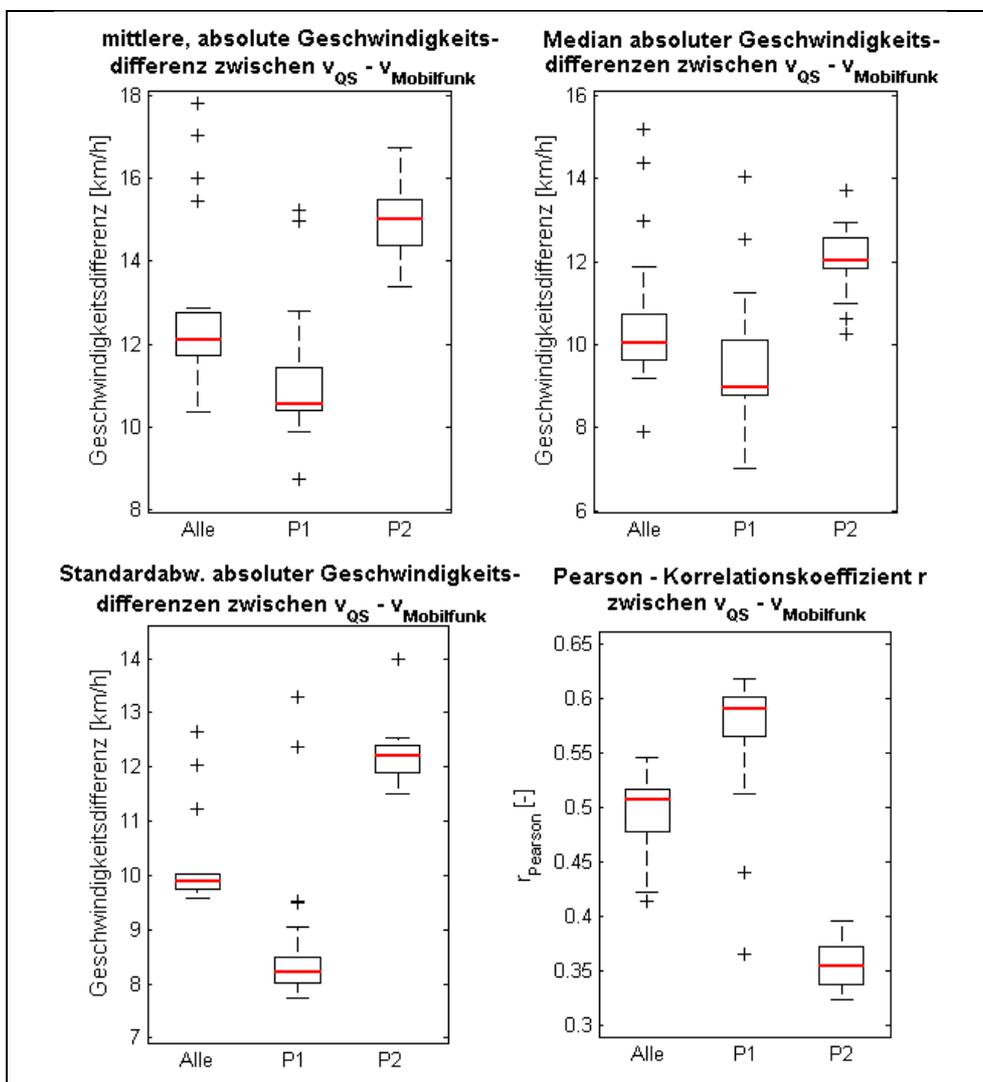


Abbildung 37: Boxplots der ermittelten Geschwindigkeitskennwerte aller Kombinationssets – tageszeitgruppiert

In Abbildung 38 sind ebenfalls Boxplots der Geschwindigkeitsdifferenzen zu sehen. In diesem Fall jedoch wurde die Gruppierung die typische Wochentagsgruppierungen (Montag – Freitag, Samstag, Sonntag) unterteilt. Besonders interessant dabei ist das überaus gute Abschneiden der Samstagsdaten bei der absoluten Geschwindigkeitsdifferenz, sowohl bei den Mittel- als auch bei den Medianwerten. Die deutlich schlechteste Übereinstimmung ist bei den Sonntagsdaten zu finden, was sich auch in einem sehr niedrigen Korrelationswert im Bereich von 0.25 widerspiegelt.

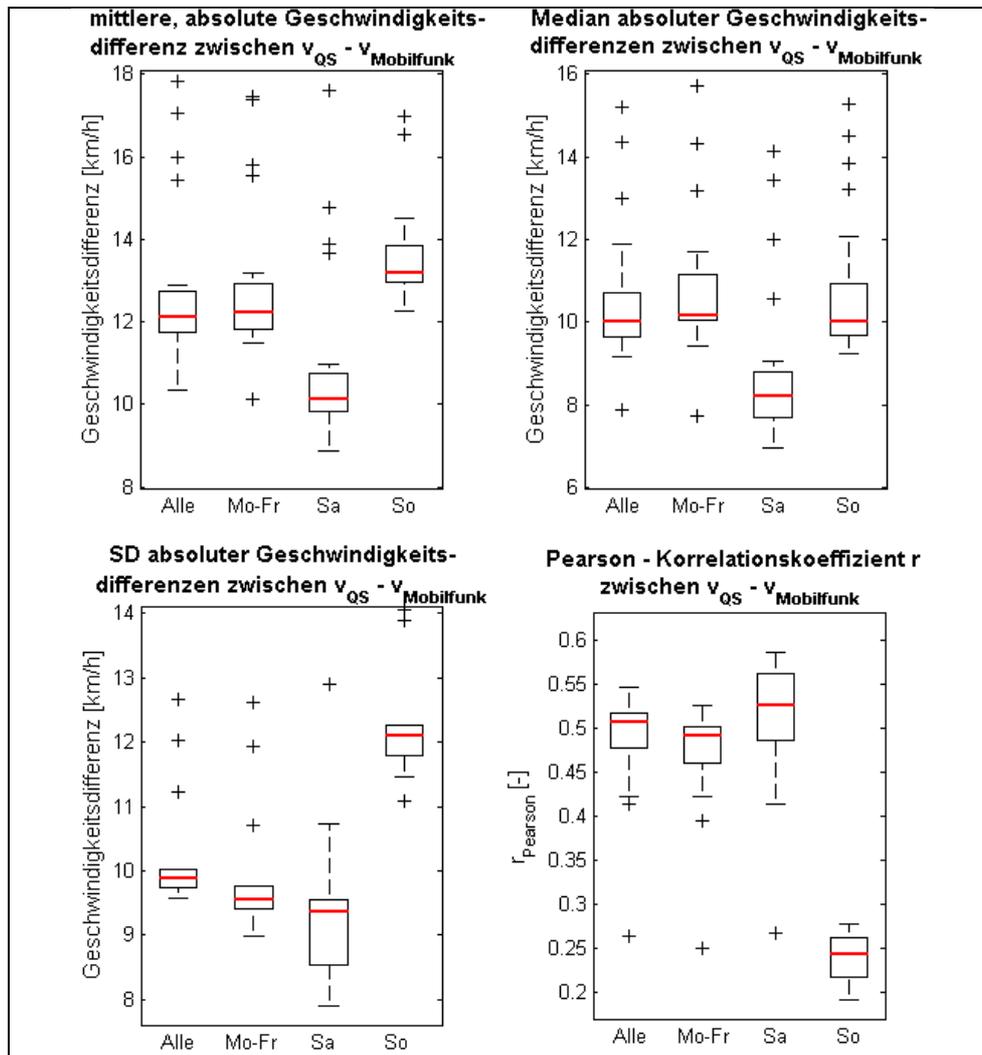


Abbildung 38: Boxplots der ermittelten Geschwindigkeitskennwerte aller Kombinationssets – gruppiert nach Wochentagen

Betrachtung der Übereinstimmung bezüglich der Verkehrsstärke

Wie bereits eingangs erwähnt, kann anhand der Anzahl der streckenpunktzugeordneten Trajektorien eine Verkehrsstärke $q_{Mobilfunk}$ ermittelt werden. Diese hängt im Allgemeinen vom Marktanteil des Betreibers und der Anzahl zumindest teilaktiver Nutzer im Netz zusammen, welche sich im betrachteten Bereich bewegen. In Abbildung 39 sind die Ergebnisse aller Sets in Bezug auf das Verhältnis der realen Verkehrsstärke zu jeder aus den Mobilfunkdaten dargestellt. Wiederum wurde eine Trennung der Tageszeitbereiche vorgenommen wobei „Alle“ den gesamten Zeitraum, „P1“ die Stunden 06:00 – 22:00 Uhr und P2 die Nachtstunden zwischen 22:00 – und 06:00 definieren.

Die Mittel- und Medianwerte der einzelnen Sets bewegen sich i.A. zwischen 0.1 und 0.2, wobei sich der Wert im Schnitt bei 0.16 einpendelt. Dabei sind die Werte üblicherweise tagsüber höher als in den Nachtstunden und erscheinen logisch. Interessant ist vor allem die Auswertung hinsichtlich der Korrelation. Über den gesamten Zeitraum betrachtet ergibt sich ein sehr guter Pearson-Korrelationswert, welche mit Ausnahme des Sets 31 zwischen 0.86 und 0.90 liegt. Im Vergleich dazu fallen diese bei den spezifischen Zeitbereichen deutlich ab, was für die Nachtstunden allein schon durch die etwas höheren Standardabweichungen ersichtlich ist. Im Intervall zwischen 06:00 und 22:00 Uhr liegt ein deutlich geringerer Anteil kleinerer Verkehrsstärke vor, wodurch die feineren Zusammenhänge deutlicher betrachtet und daher schärfer beurteilt werden.

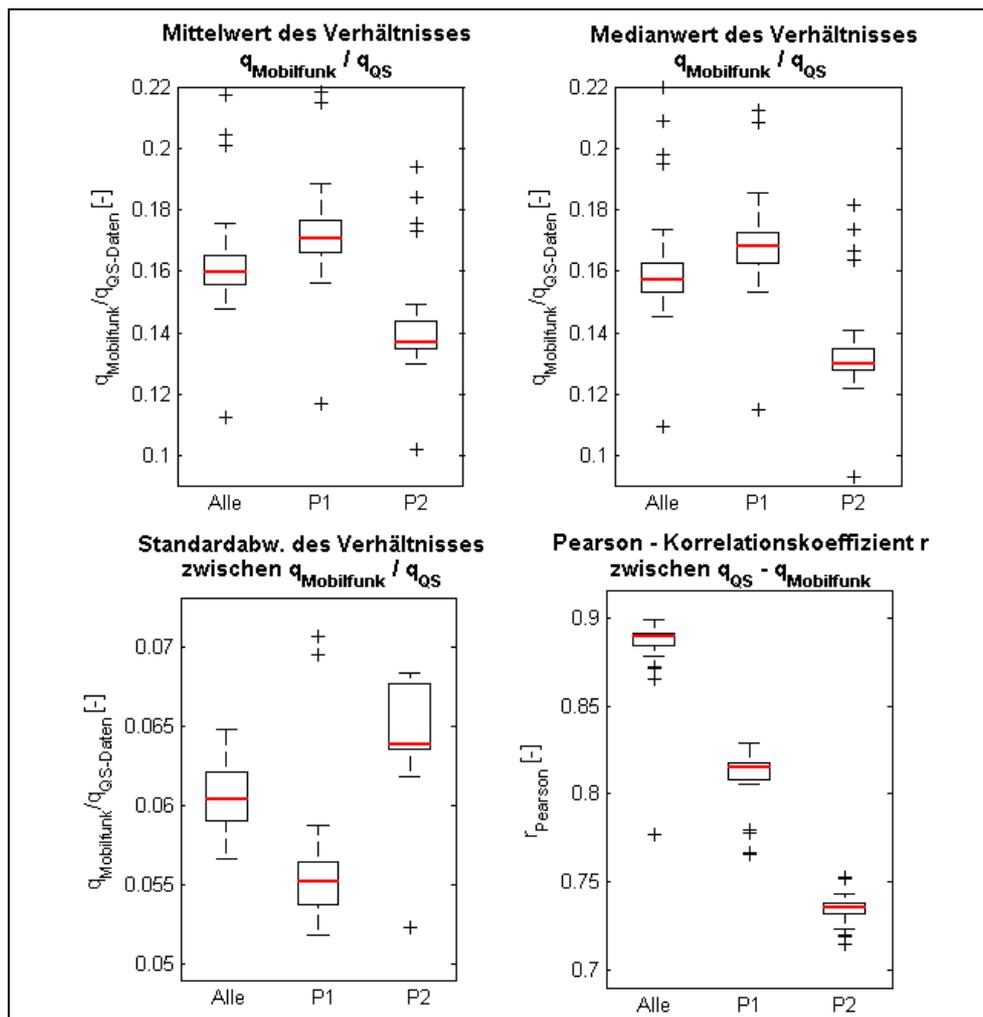


Abbildung 39: Boxplots der Verkehrsstärkenkennwerte ($q_{Mobilfunk}$ vs. $q_{Messquerschnitt}$) bzw. deren Verhältnisfaktors - tageszeitgruppirt

Nachfolgend befindet sich die Darstellung der wochentagsgruppierten Verkehrsstärkenergebnisse. Die Ergebnisse der Mittel- und Medianwerte der Bereiche Montag-Freitag und Samstag sind sich ähnlich und liegen i.A. zwischen 0.15 und 0.18, während die Sonntagswerte normalerweise zwischen 0.13 und 0.15 liegen. Die Korrelationskoeffizienten aller Gruppen liegen zwischen 0.865 und 0.90 und liegen damit in einem ähnlichen Bereich. Am besten schneiden dabei die Sonntagswerte ab.

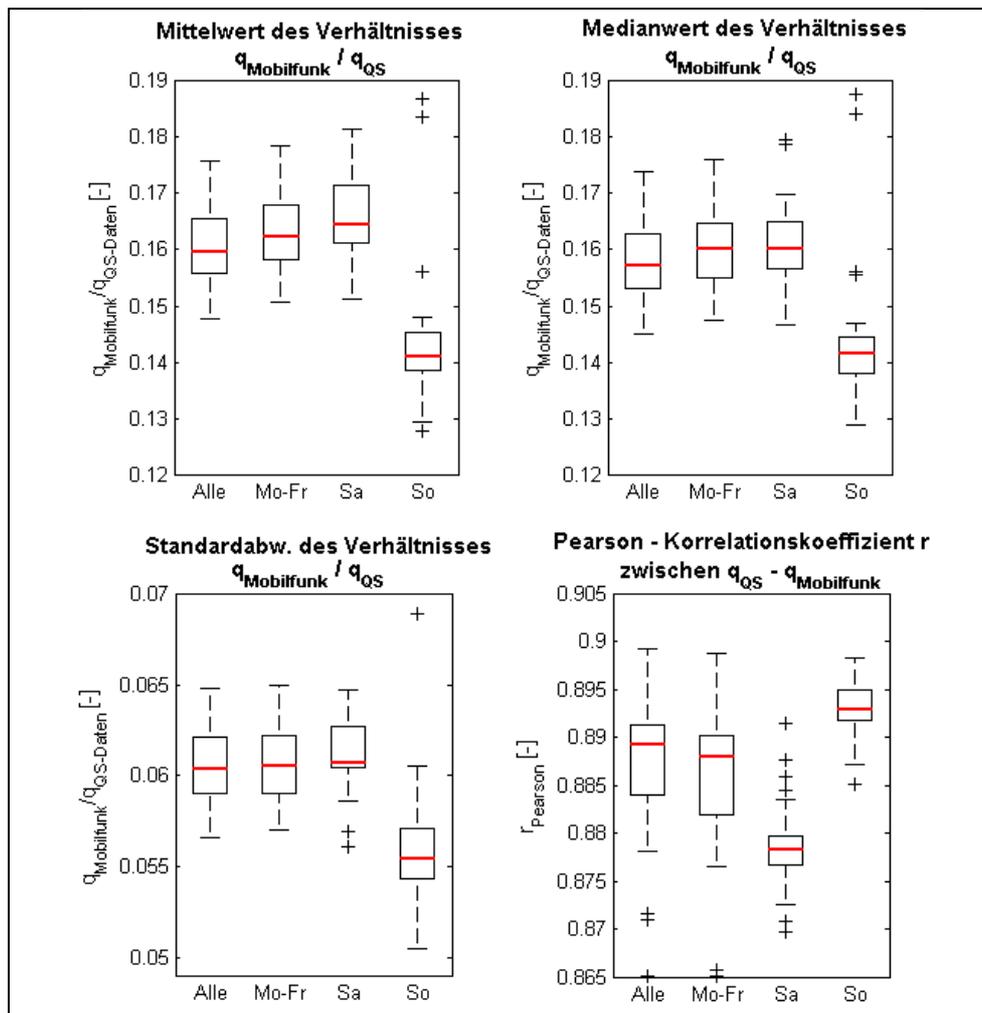


Abbildung 40: Boxplots der Verkehrsstärkenkennwerte ($q_{\text{Mobilfunk}}$ vs. $q_{\text{Messquerschnitt}}$) bzw. deren Verhältnissfaktor – gruppiert nach Wochentagen

Detaillierte Betrachtung der Einstellungen

Wie schon eingangs erwähnt, entscheiden 7 unterschiedliche Einstellmöglichkeiten über die Gültigkeit einer Trajektorie.

Umkreisradius

Da für die Masterarbeit bereits zuvor zusätzlich zu dieser auch weitere Regionen betrachtet wurden, konnte der Umkreisradius für einen ländlichen Bereich relativ bald sinnvoll empirisch ermittelt werden. Dabei hat sich ein Wert zwischen 3 und 5km als gut geeignet herausgestellt. Daher wurde der Wert mit 5km fix definiert.

Zeitlicher Rahmen ($t_{\min} - t_{\max}$)

Der zeitliche Rahmen, insbesondere dessen untere Schranke t_{\min} , spielt eine wichtige Rolle. Die obere Schranke t_{\max} sollte bei ungestörten Verkehrsbedingungen in diesem Bereich keine große Bedeutung aufweisen, und ist lediglich bei Störfällen von Interesse. Bei der Betrachtung von sehr langen Strecken sind allerdings oft Alternativrouten gegeben. Für diesen Fall ist die obere Zeitschranke in Kombination mit der maximalen Distanz sehr wohl ein ausschlaggebender Faktor. Im Normalfall hängen diese Werte von der Größe der Zellen ab. Zur Kalibrierung der zeitlichen Untergrenze wurden 2 mal 3 verschiedene Sets mit jeweils 1, 2 und 3 Minuten angenommen (Sets 1 bis 6). In beiden Fällen sind die Ergebnisse für eine zeitliche Untergrenze $t_{\min} = 2\text{min}$ am besten. Für die obere Schranke wurden 3 Sets (2, 15 und 19) mit den Werten 45, 60 und 90 Minuten durchgerechnet. Wie bereits zu erwarten war, sind diese beinahe ident.

Regionaler Bereich ($d_{\min} - d_{\max}$)

Die obere Schranke der Distanz ist eine wichtige Größe und hängt stark von der Region ab. Sie sollte groß genug sein um alle Trajektorien auf der Strecke abbilden zu können. Gleichzeitig muss sie klein genug sein um keine Trajektorien aus Alternativrouten abzubilden. Zur Kalibrierung der oberen Grenze wurden Sets mit den Distanzen 5km (Set 31), 8km (Set 29), 10km (Set 21) und 15km (Set 26) durchgerechnet. Die besten Ergebnisse bzgl. der Geschwindigkeitsdifferenz lieferte das Set 21 mit 10km maximaler Distanz. Bzgl. der Verkehrsstärken korrelieren bis auf das Set 31 (5km) alle Ergebnisse ähnlich gut. Die untere Schranke ist vor allem für den stadtnahen Bereich von Bedeutung, da dort die Abstände der Basisstationen teilweise sehr kurz sind und langsamere Teilnehmer sich vorzugsweise an diesen anmelden. Im Vergleich zu innerstädtischen Bereichen hat auf Freilandstrecken dieser Wert keine so hohe Bedeutung. Daher wurden nur zwei vergleichbare Sets (2 und 8) erstellt, deren Ergebnisse beinahe ident sind.

Maximale Abweichung des Richtungswinkels $\Delta\alpha_{\max}$

Dieser Wert bestimmt ab welcher Abweichung zum mittleren Streckenrichtungswinkel eine Eventfolge als ungültig erklärt und somit keine Trajektorie gebildet wird. Damit soll vor allem querender Verkehr eliminiert werden. Zur Kalibrierung wurden 3 vergleichbare Sets mit den Werten 67° (Set 2), 45° (Set 12) und 30° (Set 21) erstellt. Überraschenderweise weisen alle 3 Sets ähnliche Werte auf. Dieser Umstand lässt sich zum einen aus der Dominanz der Autobahn in Bezug auf die Verkehrsstärke gegenüber in der Nähe befindlichen Straßen zu erklären. Des Weiteren verlaufen

manche Straßenzüge parallel zur Autobahn und können somit durch alle bisherigen Filterungen nicht klar ausgeschlossen werden.

Handover-Distanzfaktor p

Da für diese Masterarbeit der zugrundestehende Handoveralgorithmus nicht bekannt war und in diesem Gebiet auch keine GPS-Fahrten zur empirischen Ermittlung jener Punkte vorliegen, wurde der Handover-Distanzfaktor p eingeführt. Zur Lokalisierung eines geeigneten Wertes wurden mehrere verschiedene Sets erstellt. Zum Vergleich werden die Werte 0.5 (Set 7), 0.55 (Set 2), 0.60 (Set 5) und 0.65 (Set 11) herangezogen. Für die Korrelation nehmen die Werte mit steigendem p -Wert zu, wobei der Distanzfaktor $p = 0.5$ mit einem Korrelationswert von $r=0.433$ deutlich am schlechtesten abschneidet, andererseits für den Medianwert der absoluten Geschwindigkeitsdifferenz das beste Ergebnis aller Sets aufweist.

4.4 Beispielfälle

Im folgenden Kapitel werden Beispielfälle ausgewertet. Diese werden unterteilt in Freilandstrecke bzw. urbane Gebiete. Während für den ländlichen Bereich ein tatsächliches Ereignis genau analysiert wird, beschränkt sich die Auswertung im urbanen Gebiet auf Routenfindung und eine Gesamtstreckenauswertung einer hochbelasteten Straße in Graz.

4.4.1 Analysen auf Freilandstrecken

Der erste Beispielfall beschreibt einen Unfall auf der A4 Ostautobahn (siehe Abbildung 36 auf Seite 74) vom 07. Mai 2012. Der Unfall (Kollision von drei Fahrzeugen) hatte sich im Bereich zwischen den Anschlussstellen Fischamend und Bruck/Leitha-West zugetragen. Im Zuge der Analysen für obigen Beispielfall wurde ein zweiter Beispielfall auf derselben Strecke, jedoch in Gegenrichtung, entdeckt. Dabei handelt es sich wiederum um einen Unfall zwischen Fischamend und Schwechat, geschehen am 23. April 2012. Die genaue Position ist leider nicht bekannt. Für beide Fälle sollen die TMC-Daten als Vergleich herangezogen werden. Für den ersten Fall stehen neben TMC auch Querschnittsdaten zur Verfügung.

Nachdem der Unfall am 07. Mai das Hauptanalyseziel im ländlichen Bereich darstellt, wird dieser Punkt für Punkt abgearbeitet und der zweite Ereignisfall erst zum Schluss angehängt. Während für Beispielfall 1 alle Komponenten der Analyse beschrieben werden, liegt das Hauptaugenmerk des zweiten Beispielfalles im Bereich der Stauausbreitung und deren Erkennung. Neben den Daten des 07. Mai werden zusätzlich noch die Daten vergleichbarer Tage eingelesen, gleichfalls aufbereitet und gesondert gespeichert. Diese Vergleichsdaten werden in weiterer Folge als kleiner Datensatz historischer Daten verwendet. Dies betrifft die Daten des 14. und 21.05. sowie des 23.04.2012, allesamt Montage.

Freilandstrecke - Beispielfall 1

Vergleichsdaten – TMC

Folgende Tabelle listet die TMC-Daten der Autobahn A04 im Abschnitt Fischamend bis Bruck/West in Fahrtrichtung Ungarn für den 07. Mai 2012, beschränkt auf die IDNumber 2104122, welche dem zu untersuchenden Vorfall zuzuordnen ist.

Tabelle 18: TMC-Daten des Ereignisses auf der A4 am 07.05.2012

Version	Status	ActivateTime CEST	ExpiryTime CEST	MessageText
0	2	07.05.2012 19:30	08.05.2012 07:30	Unfall, rechter Fahrstreifen gesperrt, Stau
1	2	07.05.2012 20:15	08.05.2012 08:15	Unfall, gesperrt, Stau
2	5	07.05.2012 20:31	07.05.2012 20:46	Unfall, gesperrt, Stau

Einlesen der Rohdaten

Zur Analyse des Unfalls werden alle Files des 07. Mai eingelesen und zur Auswertung verwendet. Leider sind nur 23 Files für den genannten Tag vorhanden, da das File zwischen 13 und 14 Uhr scheinbar nicht ordnungsgemäß gespeichert wurde (Dateigröße kein ganzzahliges Vielfaches der 88Byte-Blockgröße). Als Standortfilterkriterien wurden dem iTrafficReader für alle Auswertungen im Bereich Fischamend folgende Werte übergeben:

- Latitude: 48.014700 - 48.156530
- Longitude: 16.450000 - 16.845421

Damit ergeben sich für den 07.Mai insgesamt rund 10.99 Mio Events, aufgeteilt auf 227518 IDs.

Keulen-Basisstationszuordnung

Nach erfolgreichem Einlesen mittels iTrafficReader wird jeder Keulenpunkt durch seinen äquivalenten Basisstationsmittelpunkt ersetzt, sofern zuvor jener Standort als Keule identifiziert wurde. Damit reduzieren sich die unterschiedlichen Mobilfunkstandorte von 174 auf 163.

Geographische Bereichsfilterung

Für die Auswertung an der A4 hat sich schon bei der Kalibrierung ein Umkreis von 5km als geeignet herausgestellt und wird daher auch für diese Auswertung verwendet. Da für den betrachteten Bereich digitale Streckenpunkte vorhanden sind, kann auf die Nearest-Neighbor-Methode zurückgegriffen werden. Auf diese Weise reduziert sich die Datenmenge auf rund 8.96 Mio Events, was einer Reduktion von ca. 19.5% entspricht.

Relevante Basisstationen

Zur Ermittlung der relevanten Basisstationen wurden die Daten mehrerer Tage des Mai 2012 verwendet, wobei nur jene Tage gewählt wurden, deren Daten für den gesamten Tag vollständig waren. Insgesamt lagen 125 verschiedene Basisstationen innerhalb des Gültigkeitsradius von 5km. Weiters wurden für jeden Tag und jede Basisstation ein stündliches User/Event-Verhältnis errechnet. Die Ganglinie jener Verhältnisse diente zur Bildung der einzelnen Cluster mittels k-means-Verfahren, wobei die Anzahl der Cluster mit dem Wert 3 vorgegeben wurden. Dadurch konnte die Anzahl der Basisstationen auf 65 reduziert werden. Nachdem, wie schon in Kapitel 3.5.2 erwähnt, seltenere Basisstationen üblicherweise einen hohen Verhältniswert aufweisen, werden in weiterer Folge nur mehr jene Punkte betrachtet, welche eine tägliche Mindestanzahl von 35.000 Events aufweisen. Damit kann die Menge an höchstwahrscheinlich relevanten Basisstationen auf 28 beschränkt werden. Diese wurden in weiterer Folge einer visuellen Überprüfung unterzogen. Dabei wurden zwei weitere Basisstationen gestrichen, da jene eine unmittelbare Nähe zur Schnellstraße S1 aufwiesen. Somit ergibt sich eine Gesamtanzahl von 26 relevanten Basisstationen, welche in weiterer Folge bei

der Mastendynamik im Staufall Anwendung finden. Die Anwendung ausschließlich jener Basisstationen für die Geschwindigkeits- und Reisezeitanalyse hat sich in dieser Region weniger sinnvoll erwiesen, daher werden dafür alle Basisstationen im Umgebungsbereich verwendet.

Aktivitätsanalyse

Mittels der Aktivitätsanalyse sollen Ereignisse anhand erhöhter Eventaktivitäten detektiert werden. Dafür wird alle 5km der kumulierten Streckendistanz ein Observationspunkt eingeführt. Ausgehend von diesen Punkten grenzt ein aufgespannter Suchradius von 5km den Einflussbereich ab. Dadurch werden alle Basisstationen bzw. deren Events im definierten Gültigkeitsgebiet erfasst. Durch Summation aller auftretenden Events für jedes 10-minütige Zeitintervall ergeben sich die absoluten Ganglinien der Eventhäufigkeiten, wie in folgender Abbildung zu sehen ist. Dabei sind noch keine augenscheinlichen Veränderungen auffällig.

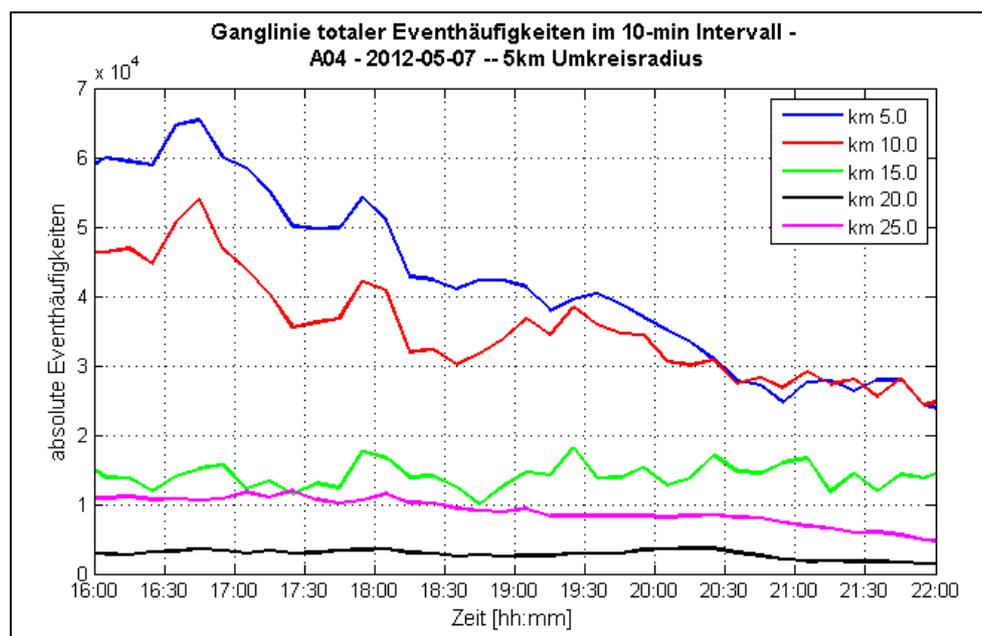


Abbildung 41: absolute Eventhäufigkeiten an der A4 in Fahrtrichtung Ungarn am 07.05.2012

Bei Betrachtung der relativen Eventhäufigkeiten im Bezug zu den historischen Daten ist bei km 20 eine deutliche Erhöhung ab 19:20 Uhr feststellbar, welche gegen 20:10 seinen Höhepunkt findet, wie in Abbildung 42 deutlich zu sehen ist.

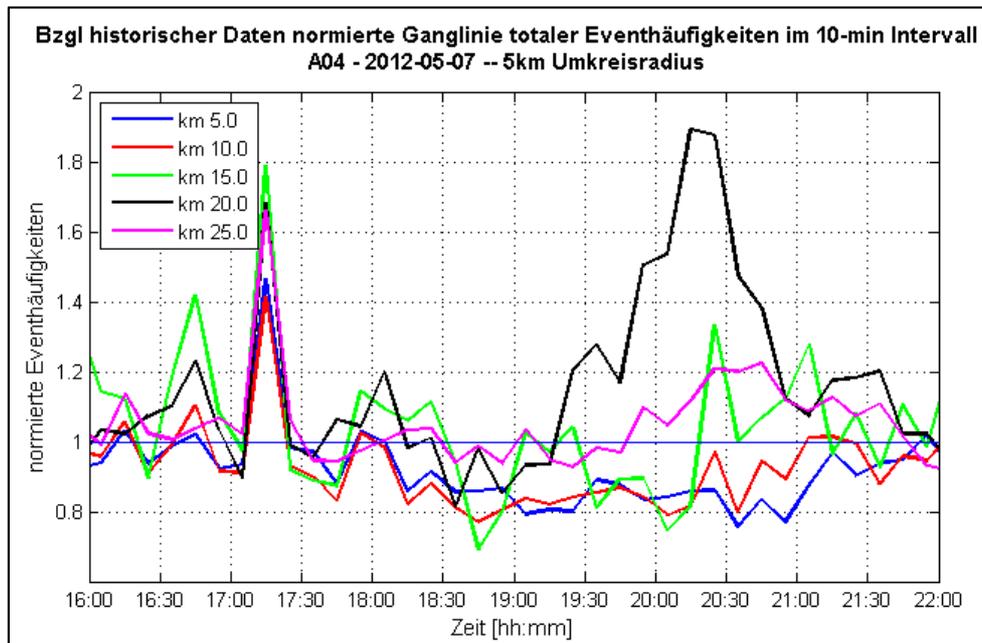


Abbildung 42: relative Eventhäufigkeiten an der A4 in Fahrtrichtung Ungarn am 07.05.2012

Nachdem die relativen Eventhäufigkeiten bei km 20 summierter Distanz vielversprechend aussehen, wird dieser Punkt in weiterer Folge eventspezifisch betrachtet. Folgende Tabelle listet alle Events, welche zu mindestens einem Zeitpunkt zwischen 18:00 und 22:00 Uhr einen Mindestskalierungsfaktor bezüglich der Normdaten von 3 und eine Mindestanzahl jenes Eventtyps von 10 (entspricht minimum 1 Event pro Minute) aufweisen, sowie Auftrittszeitpunkt des maximalen Faktors. Die Spalte „max (rel)“ gibt dabei den intervallsbezogenen maximalen Skalierungsfaktor zwischen den Daten und der Norm wieder. Die dazugehörige Häufigkeit findet sich in Spalte „max (abs)“. Die Spalte „Intervall“ gibt an in welchem Zeitbereich die Maximalwerte aufgetreten sind.

Tabelle 19: ausschlaggebende, eventspezifische, maximale Häufigkeiten im Untersuchungszeitraum – relativ zur Norm, sowie in Absolutform

Event	Eventtyp	max (rel.)	max(abs)	Intervall
1	GB_Attach	5.900	59	20:20 - 20:30
17	IUCS_SMS_Mobile_Terminated	4.000	38	21:40 - 21:50
19	IUCS_Connect_Acknowledge	3.405	63	20:10 - 20:20
20	IUCS_Disconnect	3.250	65	20:10 - 20:20
24	A_Disconnect	3.951	160	20:10 - 20:20
27	Detach	5.571	39	19:50 - 20:00
28	Short_Message_Service	3.373	86	20:10 - 20:20
29	Mobile_Terminating_Call	4.390	180	20:20 - 20:30
32	Handover_Cell_Update	3.682	81	20:10 - 20:20
33	Supplementary_Service	5.429	19	20:00 - 20:10
34	Mobile_Originated_Call	4.788	249	20:10 - 20:20
36	Setup	4.066	124	20:20 - 20:30
37	Connect_Acknowledge	4.133	93	20:20 - 20:30

Wie aus Tabelle 19 ersichtlich wird, sind alle Formen der aus- und eingehenden SMS, sowie Telefonservices merklich erhöht. Damit bestätigt sich die Annahme erhöhter Nutzeraktivitäten bei außerordentlichen Ereignissen im Infrastrukturnetz.

Geschwindigkeits- und Reisezeitanalyse

Für die Geschwindigkeits- bzw. Reisezeitanalyse als wichtigstes Element der Verkehrslageermittlung ist die Art und Reihenfolge der Filtertechniken besonders wichtig. Basis dieser Auswertung ist der bereits auf den 5km-Bereich reduzierte Datensatz für den 07.Mai 2012. Folgende Filtereinstellungen wurden für diesen Datensatz, wie auch für die historischen Daten verwendet:

- Distanzbereich d: 50 – 10000 m
- Zeitbereich t: 2 – 90 min (fix)
- Maximale Richtungswinkeldifferenz: 30°

Nach fast jedem Schritt reduziert sich die Datenmenge der potenziellen Trajektorien. Nachdem Trajektorien nur durch regionsspezifische Schwellwerte der Streckenähnlichkeit und gänzlich ohne Eventtypfilterung generiert werden, besitzt jedes Event die Möglichkeit trajektorienauslösend zu sein. Die nachfolgende Grafik veranschaulicht den Vergleich der Häufigkeiten aller möglicher Eventtypen. Die grünen Balken stehen für Events aller Basisstationen im Umkreis von 5km, die schwarzen Balken für trajektorienauslösende Events des untersuchten Tages.

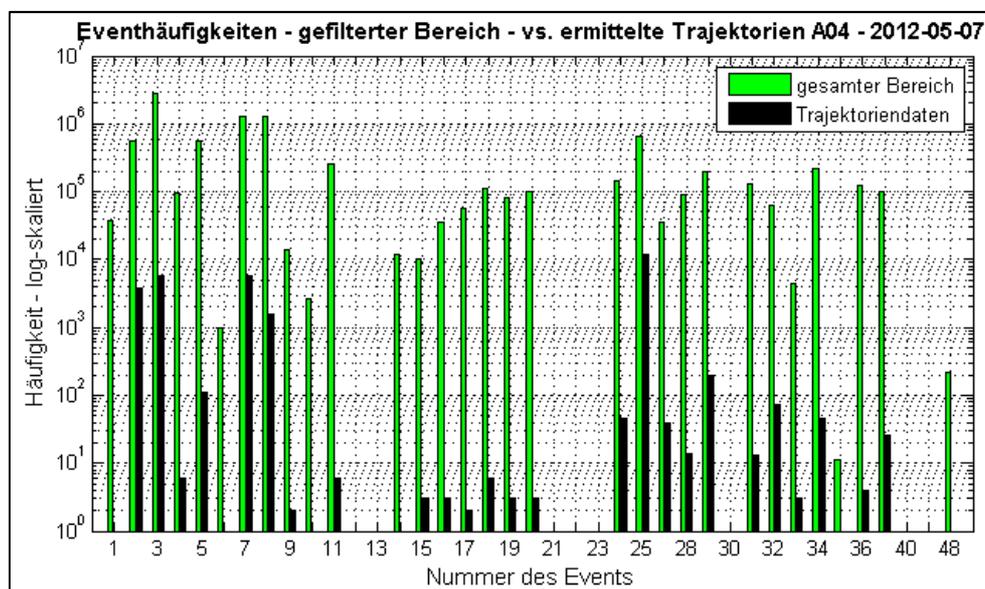


Abbildung 43: Eventhäufigkeiten – Vergleich zwischen 5km-gefilterten Bereich und trajektorienauslösenden Events – 07.05.2012

Offenkundig sind manche Events, wie beispielsweise Eventtyp Nr 1 (GB_Attach) nicht mobilitätsrelevant. Umgekehrt hingegen ist der Typ 25 (A_Other) sehr oft an Ortsveränderungen beteiligt, auch wenn seine Bezeichnung keinerlei Begründung liefern kann. Jener Typ ist für ca. 40% der Ortsveränderungen jenes Tages im Untersuchungsgebiet verantwortlich. Dies ist zum Teil auch Resultat der Vorgangsweise wie Trajektorien gebildet werden, denn es wird immer nur das erste Event in der neuen Zelle zur Auswertung herangezogen. Folgende Events am selben Ort werden

ignoriert. Eine weitere mögliche Verzerrung könnte durch das Vernachlässigen der Nachkommastellen im Zeitstempel der Events beim Einlesen durch den iTrafficReader entstehen.

Nach der Bildung valider Trajektorien aus den direkten Basisstationsverbindungen, werden diese den einzelnen Streckenpunkten zugeordnet. Dafür wird, wie bereits in Abschnitt 3.8 beschrieben, die Double-Handover-Methode verwendet. Um dem geschätzten Mindestschwellewert der Empfangspegeldifferenz gerecht zu werden, findet der Distanzfaktor p Anwendung. Dieser definiert den Übergabeabstand und wird mit $p=0.55$ angesetzt. Aus den zugeordneten Streckenpunkten bzw. der summierten Distanz dazwischen und der benötigten Reisezeit lassen sich die Geschwindigkeiten der validen Ortsveränderungen errechnen und allen Streckenpunkten entlang der Trajektorie zuteilen. Die Ergebnisse dieses Vorganges sind im Contourplot in Abbildung 44 zu betrachten. Deutlich sichtbar sind die Unregelmäßigkeiten im Geschwindigkeitsfeld zwischen 19:20 und 20:40. Ebenfalls ist eine Ausbreitung gegen die Fahrtrichtung erkennbar.

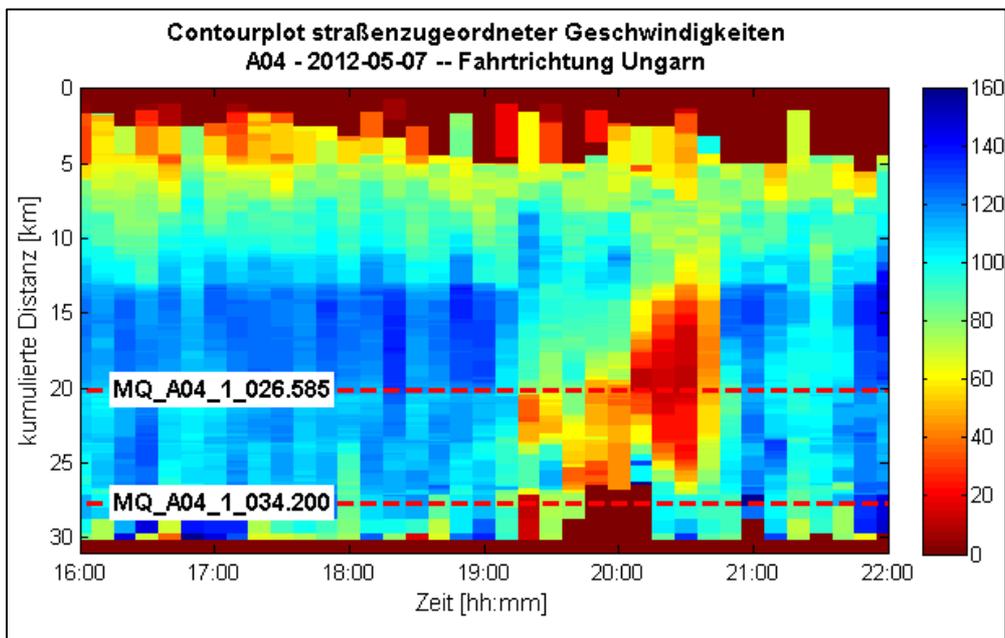


Abbildung 44: Geschwindigkeitscontourplot der A4 in Fahrtrichtung Ungarn – 07.05.2012

Jenes Geschwindigkeitsfeld aus Abbildung 44 wird in weiterer Folge zur Schätzung der Reisezeit herangezogen. Hier gilt es eine vernünftige Strecke auszuwählen, welche aus dem obigen Geschwindigkeitsfeld eine gute Abschätzung liefert. Die ersten Kilometer eignen sich nicht, da in diesem Bereich überproportional viele kurze Trajektorien enthalten sind, welche im Allgemeinen die Geschwindigkeit herabsetzen. Selbiges gilt für den hinteren Bereich. Daher wird zur Reisezeitauswertung der Bereich zwischen km 12.6 und 24.75 gewählt, was in der Realität dem Abschnitt zwischen der ASt. Fischamend und der ASt. Bruck/West entspricht, welcher in Abbildung 36 dargestellt ist. Die obige Kilometrierung versteht sich wiederum als kumulierte Distanz aus den einzelnen Streckenpunkten. Die aktuelle Reisezeit (Abbildung 45) errechnet sich dabei aus dem aktuellen Geschwindigkeitsfeld und ist somit ebenfalls für Echtzeitanalysen geeignet. Der Normbereich der Reisezeit liegt zwischen 5 und 8 Minuten, welcher ab 19:20 deutlich überschritten wird. Um 20:30 liefert die geschätzte Reisezeit den absoluten Spitzenwert mit 42.85 Minuten. Ab

20:50 hat sich der Wert wieder normalisiert. Das Fehlen eines Schätzwertes zwischen 13:00 und 14:00 Uhr ist auf die fehlerhafte Stundendatei zurückzuführen.

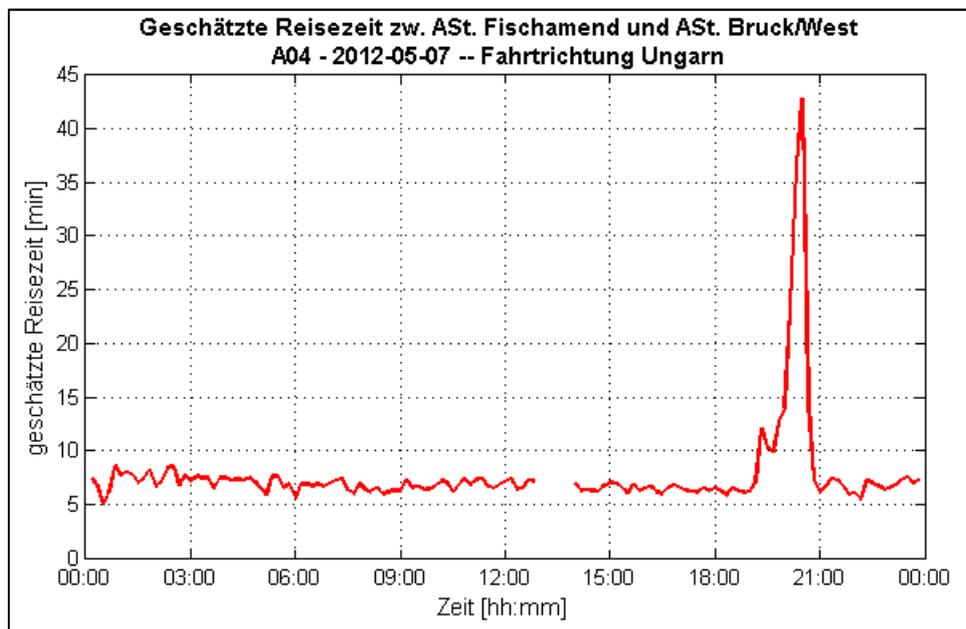


Abbildung 45: Geschätzte Reisezeit zwischen AST. Fischamend und AST. Bruck/West in Fahrtrichtung Ungarn – 07.05.2012

Noch deutlicher werden diese Unregelmäßigkeiten im Geschwindigkeitscontourplot, wenn statt den Absolutwerten historische Daten zur Skalierung verwendet werden, wie es in Abbildung 46 zu erkennen ist.

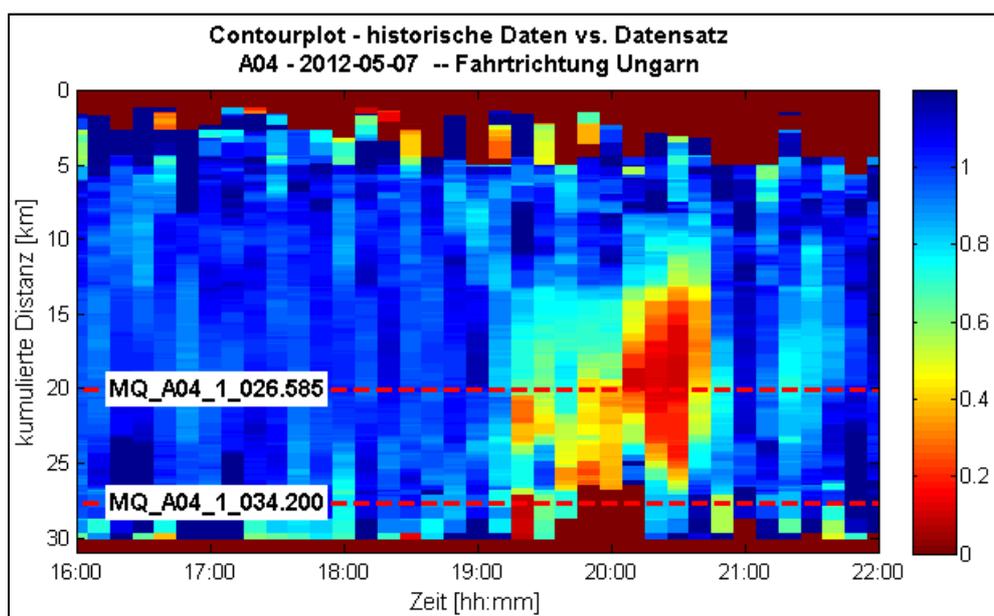


Abbildung 46: Contourplot normierter Geschwindigkeiten bzgl. Historischer Daten – A4 in Fahrtrichtung Ungarn – 07.05.2012

Nicht nur im Contourplot, auch im Einzeltrajektorienplot in Abbildung 47 ist eine Verzögerung der Trajektorien ab ca. 19:20 erkennbar. Aus Übersichtlichkeitsgründen wird nur jede zweite Trajektorie angezeigt. Ersichtlich sind ebenso die Dichteverhältnisse vor, während aber vor allem kurz nach dem Ereignis.

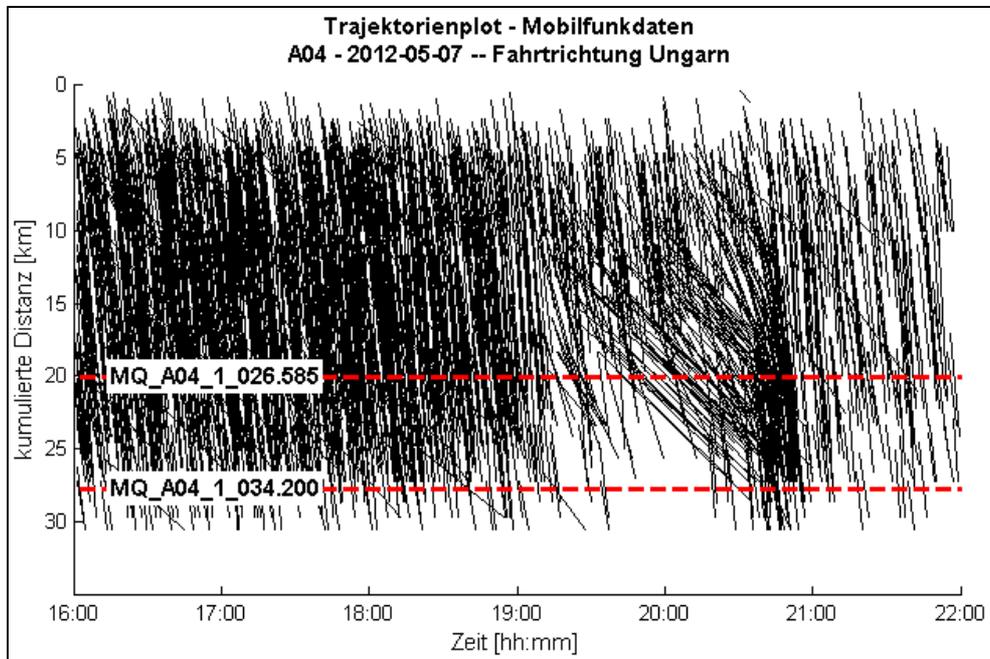


Abbildung 47: Einzeltrajektorienplot aus Mobilfunkdaten (jede zweite Trajektorie) – A4 in Fahrtrichtung Ungarn – 07.05.2012

Nachdem für den Untersuchungszeitraum Querschnittsdaten der ASFINAG vorliegen, wird im nächsten Schritt jener Streckenpunkt mit der geringsten Entfernung zum Querschnitt zum Vergleich herangezogen. Abbildung 48 veranschaulicht den Geschwindigkeitsverlauf aus den Mobilfunkdaten an jenem zugeordneten Punkt (rote Linie) und den aggregierten Querschnittsdaten am Messquerschnitt MQ_A04_1_026.585 (schwarze Linie). Ein ähnlicher Verlauf über den gesamten Tag ebenso wie zur Zeit des Unfalles ist augenscheinlich. Die Unterbrechung der roten Linie zwischen 13:00 und 14:00 Uhr lässt sich durch das Fehlen des Stundenfiles erklären.

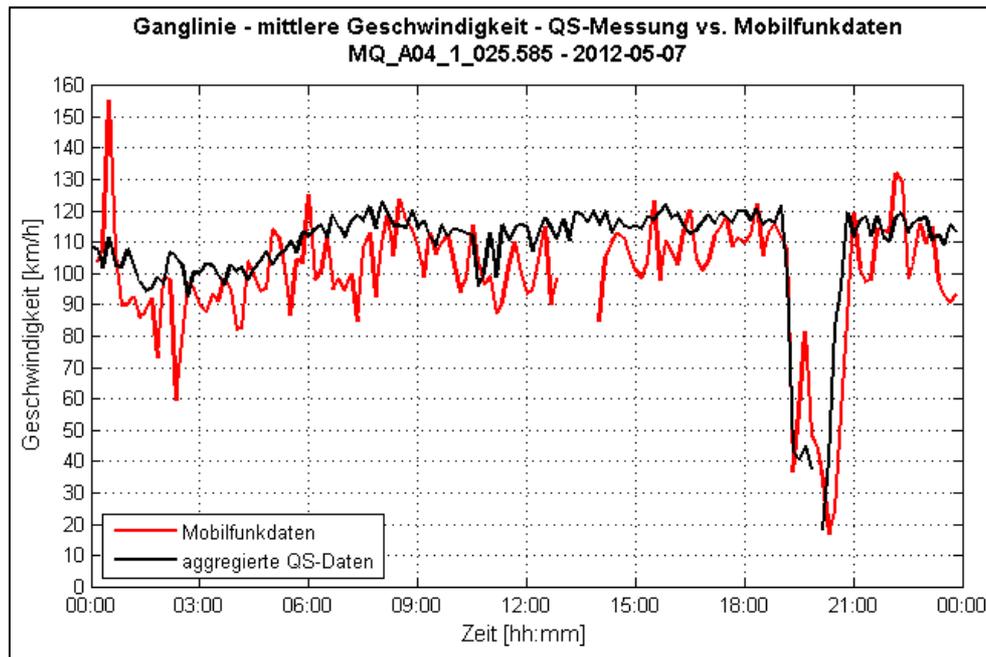


Abbildung 48: Geschwindigkeitsganglinien aus Mobilfunkdaten sowie aus QS-Messung – MQ_A04_1_026.585 – 07.05.2012

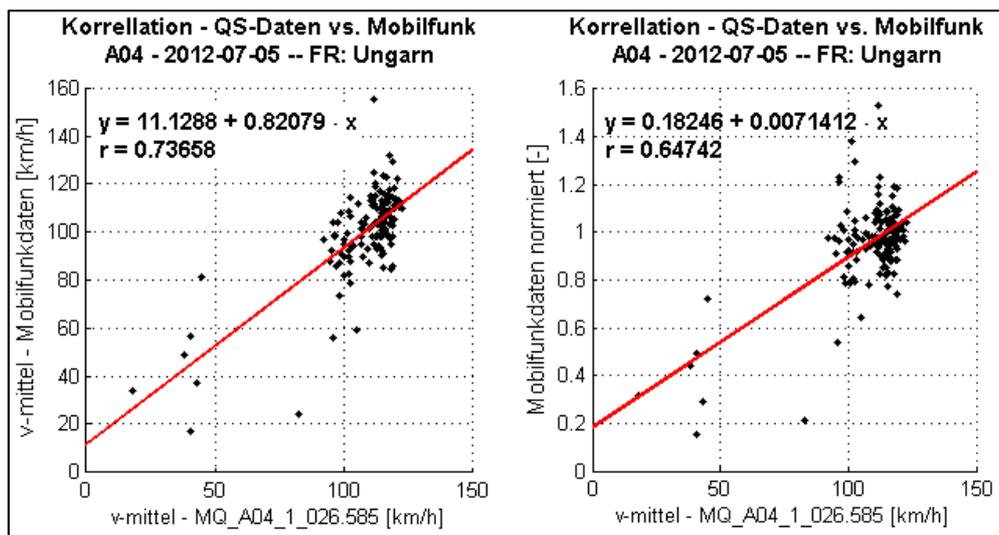


Abbildung 49: Korrelation zwischen realer Querschnittsmessung MQ_A04_1_026.585 und berechneten Mobilfunkdaten

Zur Quantifizierung der Ähnlichkeit wurde der empirische Korrelationskoeffizient, sowie die lineare Regression berechnet. Der r_{Pearson} -Wert für die Korrelation der absoluten Geschwindigkeitswerte ergibt sich zu 0.7365 mit einem P-Wert der Korrelation (aus Matlab) von $1.62 \cdot 10^{-24}$. Da ein Wert kleiner 10^{-15} außerhalb der Rechengenauigkeit eines 64-bit Systemes liegt, muss der Wert selbst nicht richtig sein, der Wertebereich, also die Annahme, dass der Wert unter 10^{-15} liegt, passt. Das Ergebnis ist somit hochsignifikant. Die Nullhypothese, dass keine Korrelation vorhanden ist, kann verworfen werden. Die Grenzen des 95%-Konfidenzintervalles liegen bei 0.6487 (unterer Vertrauensbereich) und 0.8051 (oberer Vertrauensbereich). Bei den normierten Daten ergibt sich der r_{Pearson} -Wert zu

0.64742. In beiden Fällen sind gute Maße des linearen Zusammenhangs zu den Vergleichsdaten zu erkennen.

Bei genauerer Betrachtung der Geschwindigkeitsganglinie in Abbildung 48 fällt ein gewisses Maß an Zeitverzögerung insbesondere im stauauflösenden Zeitbereich auf. Aus diesem Grund wurde die mögliche Verschiebung (Lag) über die Kreuzkorrelation aus den beiden Geschwindigkeitsdatensätzen ermittelt. Dabei wird ein Datensatz immer um eine definierte Zeit gegenüber seinem Vergleichswert verschoben. Im nächsten Schritt wird wiederum eine Korrelation aus den verschobenen Daten X mit den Vergleichswerten Y berechnet. In diesem Fall handelt es sich bei der Verschiebung um ein ganzzahliges Vielfaches eines Zeitintervalls, welches hier 10 Minuten entspricht. So wird beispielsweise für den Lag +1 die Korrelation zwischen den Daten zum Zeitpunkt $t+1$ und den Vergleichsdaten zum Zeitpunkt t errechnet. In Matlab kann dies mit der Funktion `xcov` und der Einstellung `coeff` realisiert werden. Details zur Berechnung der Kreuz-Kovarianz sind beispielsweise bei [Schlittgen, 2001] zu finden.

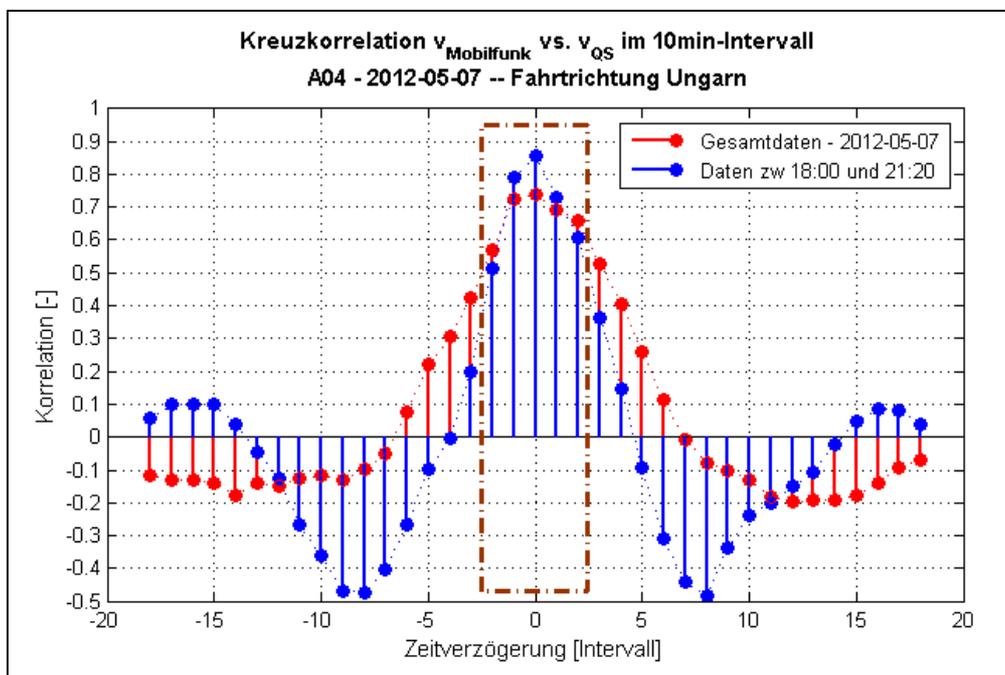


Abbildung 50: Kreuzkorrelation der Daten des 07.05.2012 – A4 in Fahrtrichtung Ungarn

Genau genommen waren nach Betrachtung der Geschwindigkeitsganglinie in Abbildung 48 kleine negative Verschiebungen zu erwarten. Bei Betrachtung der Korrelationswerte in Abbildung 50 zeigt sich allerdings, dass weder bei der Tagesgesamtbetrachtung noch im vermuteten Zeitbereich eine Verbesserung des Korrelationskoeffizienten durch Verschiebung der Geschwindigkeitsdaten um die Intervallgröße hervorgeht. Sofern eine Zeitverschiebung existiert, liegt diese unter der Hälfte der Intervallgröße von 10 Minuten.

Mastendynamik

Bei der Mastendynamik-Analyse sollen Ganglinien der ID-Häufigkeiten erstellt und analysiert werden. Insbesondere auf den Abgleich der aktuellen Daten mit der historischen Datenbank soll besonderes Augenmerk gelegt werden. In Abbildung 51 ist jene Auswertung für 3 der 23 relevanten Basisstationen exemplarisch dargestellt. Basisstation 1 (schwarz) befindet sich in Fahrtrichtung bereits nach dem Ereignisstandort, Basisstation 2 (rot) sowie Basisstation 3 (blau) befinden sich davor.

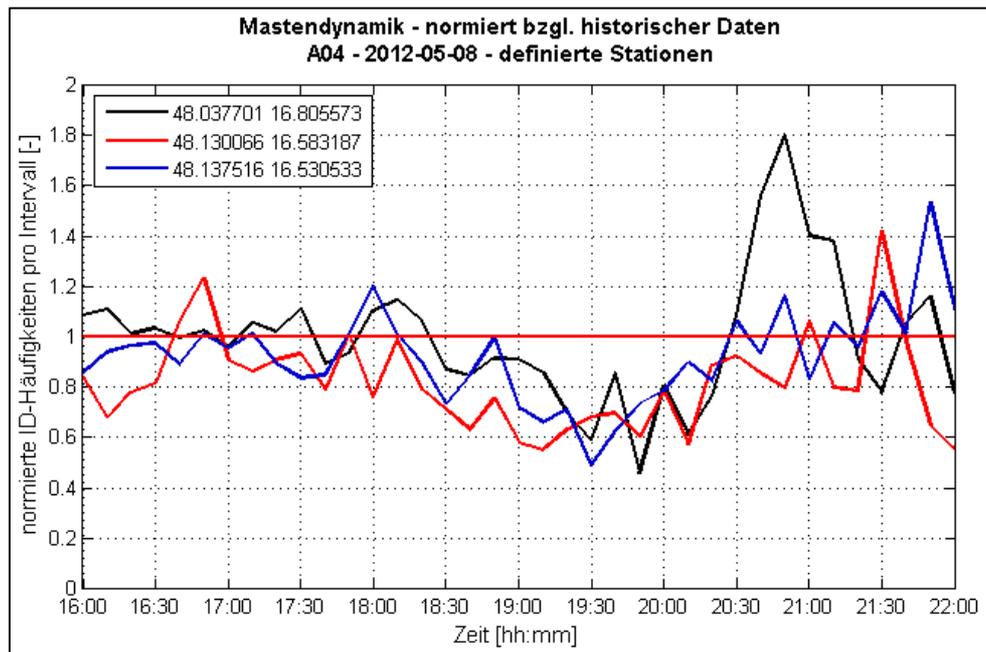


Abbildung 51: Mastendynamik-Auswertung normiert – Autobahn A4 in Fahrtrichtung Ungarn am 07.05.2012

Insbesondere Basisstation 2 weist einen deutlich unterdurchschnittlichen Verlauf der ID-Häufigkeiten auf. Bereits um 18:40 liegt deren Wert bei knapp über 0.6, ab 19:00 sogar darunter. Basisstation 1 erreicht um 19:50 den tiefsten Wert und weist 19:20 und 20:20 einen deutlich unterdurchschnittlichen Verlauf auf. Im Gegenzug lassen die Werte ab 20:40 deutlich erhöhte Werte erkennen, was sich mit der kurz zuvor erfolgten Streckenfreigabe und dem daraus resultierenden erhöhten Verkehrsaufkommen gut erklären lässt.

Freilandstrecke - Beispielfall 2

Wie schon eingangs erwähnt, soll anhand eines zweiten Beispielfalles die Staudetektion beschrieben werden. Zur Anwendung kommen Daten des 23.04.2012. Die Auswertung erfolgt auf der Autobahn A4 in Fahrtrichtung Wien.

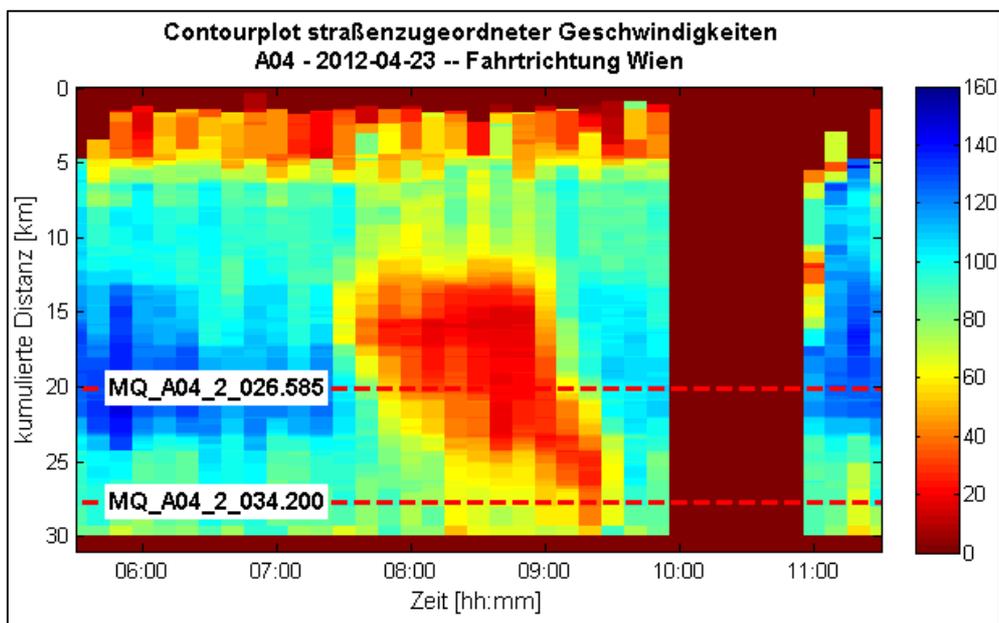
Tabelle 20 listet die TMC-Daten der Autobahn A04 im Abschnitt Fischamend bzw. Bruck/West bis Wien-Schwechat in Fahrtrichtung Wien für den 23. April 2012.

Tabelle 20: TMC-Daten der A4 vom 23.04.2012 in Fahrtrichtung Wien

Version	Status	ActivateTime CEST	ExpiryTime CEST	MessageText
0	2	23.04.2012 07:29	23.04.2012 19:29	Stau, Unfall
1	2	23.04.2012 07:40	23.04.2012 19:40	3 km Stau, Unfall
2	2	23.04.2012 07:49	23.04.2012 19:49	5 km Stau, Unfall
3	2	23.04.2012 07:53	23.04.2012 19:53	6 km Stau, Unfall, 2 Fahrstreifen gesperrt
4	2	23.04.2012 08:49	23.04.2012 20:49	6 km Stau, Unfallstelle geräumt
5	4	23.04.2012 09:08	23.04.2012 09:23	(Meldung aufgehoben)
6	5	23.04.2012 09:11	23.04.2012 09:26	(Meldung aufgehoben)

Geschwindigkeits- und Reisezeitanalyse

Ebenso wie im vorangegangenen Beispielfall, werden auch hier Trajektorien berechnet. Der Distanzfaktor wird wiederum mit $p=0.55$ angesetzt. In Abbildung 52 ist der Geschwindigkeitscontourplot der streckenzugeordneten Trajektorien ersichtlich. Dabei handelt es sich um die Fahrtrichtung 2 (Richtung Wien). Somit ist der Streckenverlauf von unten nach oben (entgegen der kumulieren Distanz) zu sehen.

**Abbildung 52: Geschwindigkeitscontourplot der A4 in Fahrtrichtung Wien – 23.04.2012**

Ab 7:30 ist bei km 13 eine prägnante Änderung der Geschwindigkeiten feststellbar. Dies deckt sich sehr gut mit der Version 0 der TMC-Meldungen. In gleicher Weise ist die Stauauflösung ab 8:50 gut ersichtlich. Anhand der raschen und deutlichen Änderung der Geschwindigkeit ist der Schockwellenverlauf, sowohl in aufbauender wie auch in auflösender Richtung deutlich zu erkennen.

4.4.2 Analysen im urbanen Bereich

Im Gegensatz zum ländlichen Bereich, sind für das städtische Gebiet keinerlei Vergleichsdaten vorhanden. Daher besteht das Hauptaugenmerk dieses Kapitels in der Gesamtstreckenauswertung einer wichtigen Verkehrsachse im Grazer Stadtgebiet und der Routenzuweisung anhand definierter ID-Pfade diverser IDs, welche einerseits visuell dargestellt und andererseits als durch Berechnung des Jaccard-Koeffizienten ermittelt werden.

Gesamtstreckenauswertung am Beispiel Bergmannngasse-Weinzöttlstraße

Der erste Abschnitt beschäftigt sich mit der Geschwindigkeitsauswertung einer Strecke im Grazer Stadtgebiet, wie sie auf Abbildung 53 ersichtlich ist. Dabei werden die aus GPS-Auswertung gewonnen Erkenntnisse insofern verwendet, dass jener Abschnitt einmal mit den realen Basisstationen und einmal mit deren Keulenpunkten berechnet und verglichen werden.

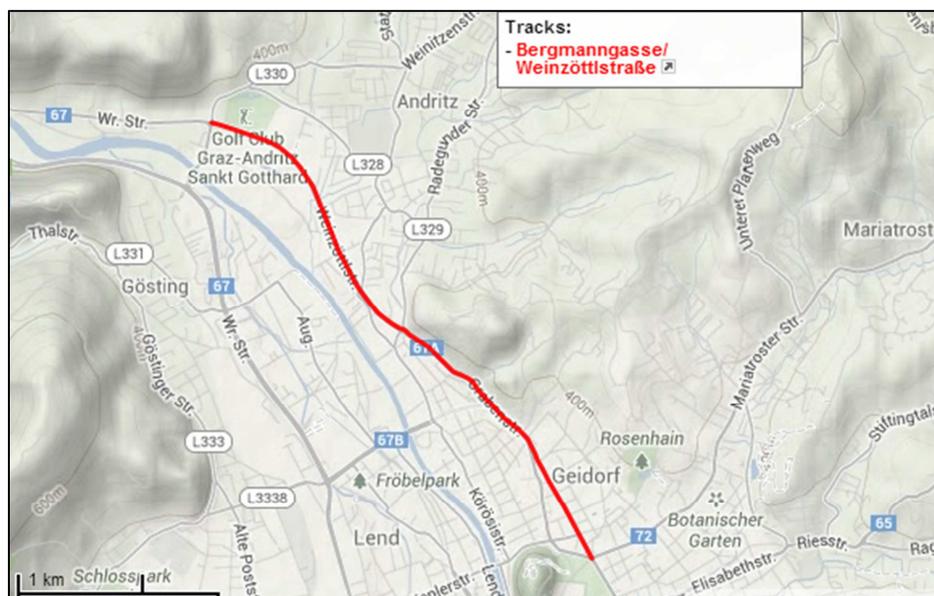


Abbildung 53: Übersicht über den innerstädtischen Analysebereich

Mit den verwendeten Filtereinstellungen von $t_{\min} = 20\text{sec}$, $t_{\max} = 40\text{min}$, $d_{\min} = 50\text{m}$, $d_{\max} = 10\text{km}$ und einer maximalen Richtungsabweichung von $\Delta\alpha_{\max} = 45^\circ$ wurden die Trajektorien berechnet. Zur Vermeidung von großen Ausreißern wurde ein Aktualisierungsintervall von 15 Minuten benutzt. Zur visuellen Darstellung sind die Ganglinien beider Herangehensweisen in den Abbildung 54 und Abbildung 55 angeführt. Darin sind jeweils 2 Ganglinien abgebildet. Die erste Ganglinie (blau, durchgezogen) errechnet sich aus dem arithmetischen Mittel jeder detektierten Geschwindigkeit (entspricht jeder gültigen Ortsveränderung) pro Zeitintervall. Zur Ermittlung der zweiten Ganglinie wird zuerst die mittlere Reisegeschwindigkeit jedes gültigen Tracks ermittelt. Damit ergibt sich pro Track ein Wert. Weiters werden alle Werte innerhalb eines Zeitintervalls gemittelt und aufgetragen.

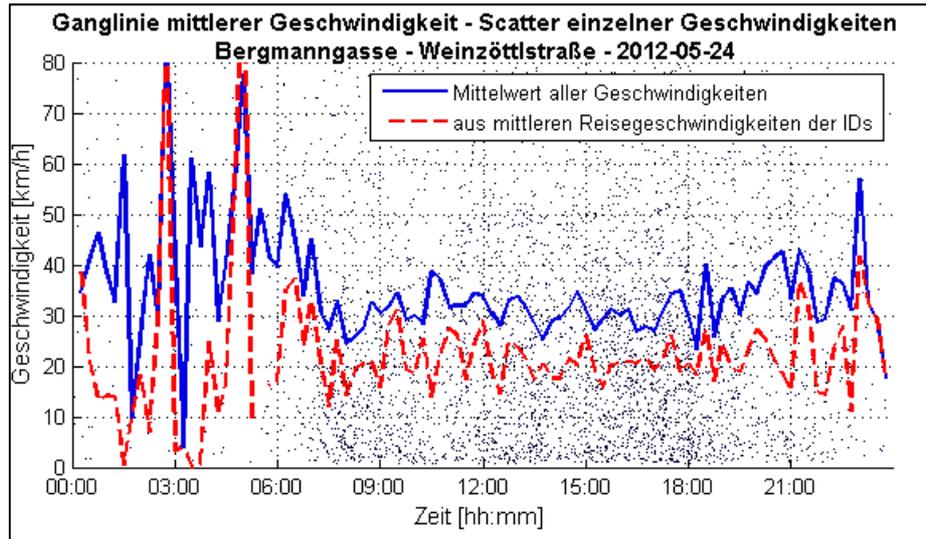


Abbildung 54: Geschwindigkeitsganglinien und Scatterplot valider Geschwindigkeiten – Bergmannsgasse/Weinzöttlstraße – 24.05.2012 – ohne BTS-Zuweisung

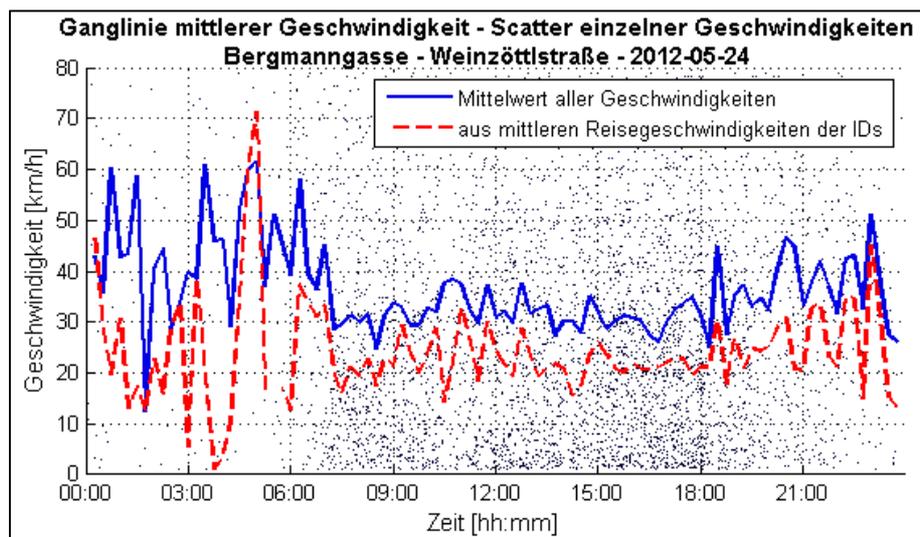


Abbildung 55: Geschwindigkeitsganglinien und Scatterplot valider Geschwindigkeiten – Bergmannsgasse/Weinzöttlstraße – 24.05.2012 – nach BTS-Zuweisung

In Tabelle 21 sind die Kennwerte der Tagesauswertung des 24.05.2012 gegenübergestellt. Dabei wurden jeweils die Mittelwerte der Median und die Standardabweichung der Daten im Tagesverlauf untersucht. Wie aus den vorigen Abbildungen ersichtlich ist, streuen die Werte in den Nachtstunden deutlicher, was aus der kleineren Anzahl an gültigen Tracks hervorgeht. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse auch nach den verschiedenen Tageszeiten unterteilt, wobei die Kürzel „T1“ für den Zeitraum zwischen 06:00 – 22:00 Uhr und „T2“ für den Bereich zwischen 22:00 – 06:00 stehen. Generell sind größere Standardabweichungen der Daten ohne Basisstationszuordnung ersichtlich. Besonders von Interesse sind mittleren Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen der Ermittlung mit bzw. ohne vorherige Basisstationszuweisung. Tagsüber liegen die Abweichungen im Mittel zwischen 1.5 und 3 km/h. Auf Basis dieser Ergebnisse und insbesondere aufgrund fehlender Vergleichsdaten kann hier nicht wirklich ein besseres Verfahren ausgemacht werden.

Tabelle 21: Geschwindigkeitskennwerte der Streckenauswertung Bergmannsgasse/Weinzöttelstraße – 24.05. 2012

Kennwerte	mit BTS-Zuweisung			ohne BTS-Zuweisung			Geschwindigkeitsdiff.		
	Total [km/h]	T1 [km/h]	T2 [km/h]	Total [km/h]	T1 [km/h]	T2 [km/h]	Total [km/h]	T1 [km/h]	T2 [km/h]
ungewichtete Mittelwertbildung									
Mittelwert	36.42	33.66	42.40	37.15	34.52	42.84	3.89	2.16	7.65
Median	33.63	32.10	42.91	33.95	33.12	40.72	2.16	1.54	4.81
SD	9.02	5.76	11.67	11.73	5.93	17.88	6.86	1.74	11.16
gewichtete Mittelwertbildung									
Mittelwert	24.01	23.39	25.39	23.53	22.91	24.93	5.03	2.85	9.93
Median	21.88	21.91	19.70	21.58	21.74	18.37	2.86	2.43	4.95
SD	10.03	5.17	16.43	13.72	5.69	23.42	7.60	2.17	12.05

Routenüberprüfung anhand Anwendung des Jaccard-Koeffizienten

Eine weitere Überprüfung im urbanen Bereich gilt der Routendetektion. Wie bereits erwähnt, sind die Zellaufenthaltszeiten bewegter Benutzer aufgrund kleinerer Zellen in städtischen Regionen deutlich kürzer. Daher scheint es für diesen Fall legitim, diverse Ähnlichkeitsmetriken anzuwenden. Eine anwendbare Form ist hierbei anhand des Jaccard-Koeffizienten zu finden. Dabei werden die Mengen A und B auf ihre Gemeinsamkeiten verglichen. Der Jaccardkoeffizienten J aus den beiden Mengen A und B errechnet sich durch Division der Schnittmenge von A und B durch die Vereinigungsmenge der Elemente aus A und B gemäß Formel 4.2

$$J(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} \quad (4.2)$$

Auf die Mobilfunkdaten bezogen handelt es sich bei den Mengen A und B um die Koordinaten der Normroute im Vergleich zu jenen einer ID. Durch Anwendung der Beziehung aus 4.2 würden nur jene IDs einen Koeffizienten von 1 erlangen, wenn eine totale Übereinstimmung mit der Normroute existieren würde. In Realität ist es jedoch egal wenn die eine oder andere Basisstation nicht aufscheint. Vielmehr ist es wichtig ob sich die ID an anderen Basisstationen, welche nicht auf der Normroute liegen, anmelden. Ist dies der Fall, ist dies ein Indiz dafür, dass sich die ID nicht auf der untersuchten Route bewegt. Aus diesem Grund muss der Ansatz der Wertermittlung folgend adaptiert werden, wobei A die Menge der ID-Koordinaten und B die Normroute darstellt. Dadurch ergibt sich der adaptierte Jaccardkoeffizient J_{ad} folgend:

$$J_{ad}(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A|} \quad (4.3)$$

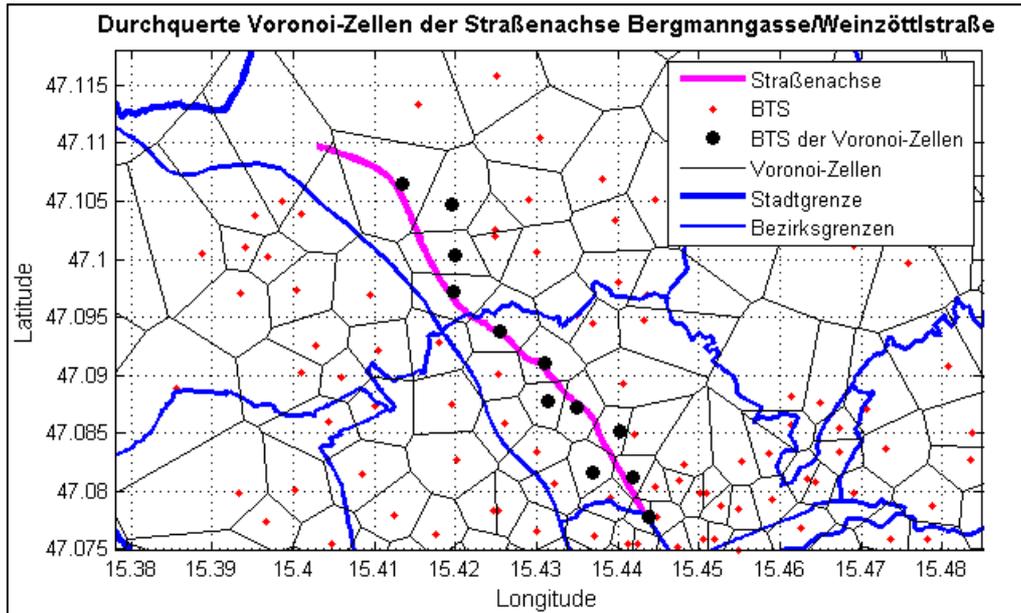


Abbildung 56: Norm-Basisstationsroute bzgl. der Voronoi-Zellen entlang Bergmannngasse/Weinzöttlstraße - Graz

Diese Methode führt unweigerlich zu einem weiteren Problem – der Definition einer Normroute. Im ersten Ansatz werden für diese alle Basisstationen gewählt, deren Voronoi-Zellen die Strecke schneiden. Für den innerstädtischen Bereich des Straßenzuges Bergmannngasse/Weinzöttelstraße ergeben sich dadurch 12 unterschiedliche Basisstationsstandorte (siehe Abbildung 56).

In weiterer Folge werden wieder die Daten für den 24.05.2012 herangezogen, welche bereits auf ein Bereichsrechteck mit folgenden Werten eingegrenzt wurden:

- Latitude: 47.073000- 47.115000
- Longitude: 15.395000 - 15.450000

Wie auch bei den Methoden in Kapitel 3 werden in weiterer Folge über längere Zeit stationäre IDs gesplittet, wobei der Wert t_{\max} im Sinne der Vergleichbarkeit wiederum mit 40 Minuten angenommen wurde. Im nächsten Schritt wurden alle stationären Zellen gelöscht. Daraufhin wurde der adaptierte Jaccardkoeffizient für alle IDs berechnet, wobei nur jene IDs gespeichert wurden welche über dem jeweiligen Schwellwert des Koeffizientenwertes lagen. Diese Schwellwerte wurden in 0.1er Schritten zwischen 0.1 und 1 berechnet.

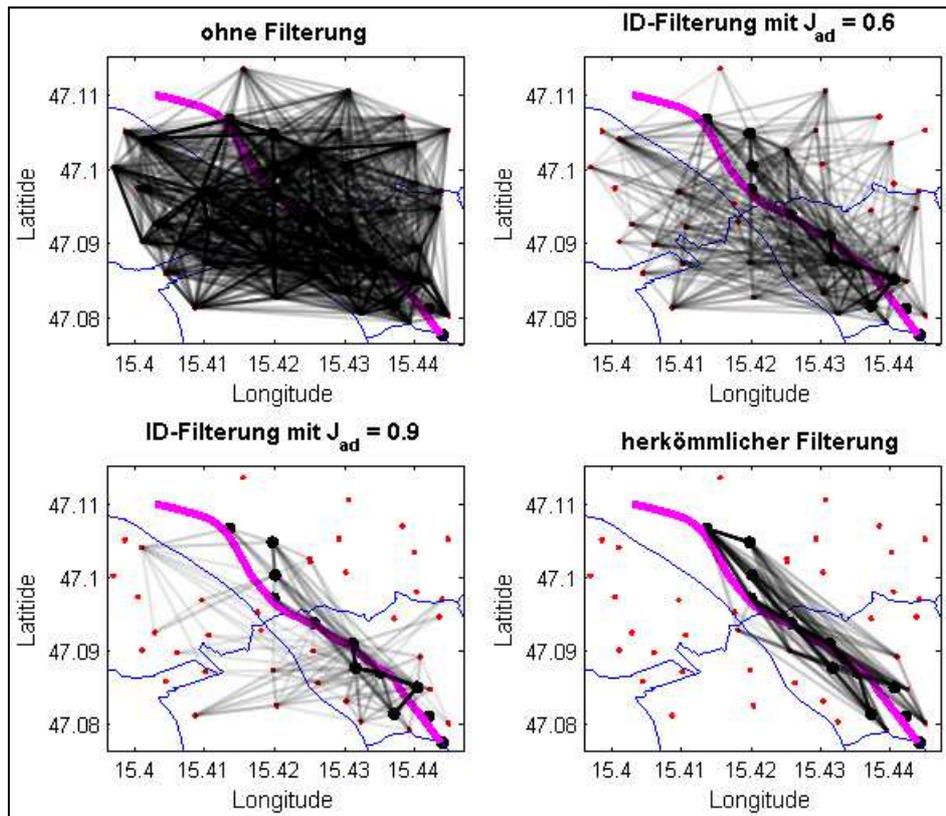


Abbildung 57: Innerstädtische BTS-Übergänge ohne-, mittels adaptiertem Jaccardkoeffizienten- und per herkömmlicher Filterung

Abbildung 57 zeigt die Übergänge zwischen den einzelnen Zellen, wobei die Farbintensität mit steigender Häufigkeit zunimmt. Das erste Bild (links oben) zeigt die Daten ohne Filterung. Die starke Netzstruktur ist gut erkenntlich und überschattet die Straßenachse, welche in magenta dargestellt ist. Die nächsten beiden Bilder (rechts oben, sowie links unten) zeigen die Zellübergänge, welche sich aus der Betrachtung der gemäß des adaptierten Jaccardkoeffizienten gültigen IDs ergeben. Mit $J_{ad} = 0.6$ ist bereits eine Konzentration auf den unmittelbaren Umgebungsbereich der Straße zu erkennen. Bei Erhöhung des Schwellwertes auf $J_{ad} = 0.9$ wird dies noch deutlicher. Bei Anwendung der herkömmlichen Filtermethoden wie sie in Kapitel 3 vorgestellt wurden, konzentrieren sich alle Zellübergänge im Bereich der Straßenachse.

Ein weiterer interessanter Aspekt ist der Vergleich der Anzahl der Zellübergänge und der gefundenen Trajektorien sowie die Anzahl der IDs. Dieser Vergleich ist in Tabelle 22 ersichtlich. Dabei sind zum einen Absolutwerte, und zum anderen der prozentuelle Anteil vom Ausgangswert ohne Filterung sichtbar. Die absolute Anzahl der Zellübergänge kann durch Ausschluss der IDs unter einem J_{ad} -Wert von 0.6 bereits auf rund 11% Prozent der ursprünglichen Zellwechsel reduziert werden. Wenig überraschend ist die Tatsache, dass auf Basis der herkömmlichen Filterung deutlich mehr IDs gefunden werden konnten als mittels adaptiertem Jaccardkoeffizienten, da durch Löschen von IDs, welche durch Prüfung des Koeffizienten ausgeschlossen werden mussten, Zellübergänge im Analysebereich verloren gehen.

Tabelle 22: Zellübergangsdaten im untersuchten urbanen Bereich

	ohne Filterung	Jad = 0.6		Jad = 0.9		herkömmliche Filterung	
		Anzahl	[%]	Anzahl	[%]	Anzahl	[%]
Zellübergänge	503738	57291	11.37	16527	3.28	8555	1.70
Trajektorien	192038	7513	3.91	2956	1.54	6604	3.44
IDs	75815	5926	7.82	2364	3.12	6346	8.37

Eine weitere Frage betrifft den Anteil gleicher IDs nach herkömmlicher Filterung vs. Filterung auf Basis des adaptierten Jaccardkoeffizienten. So konnten nur rd. 15% jener IDs mit einem Wert $J_{ad} = 0.9$ bei den Daten der herkömmlichen Filterung gefunden werden. Bei $J_{ad} = 0.6$ konnten immerhin noch rd. 25% gleiche IDs ermittelt werden. Der Umstand, dass der Großteil der IDs, der gemäß des adaptierten Jaccardkoeffizienten gültig ist, nicht in den Daten der herkömmlichen Filterung aufscheint, ist auf dem ersten Blick überraschend. Die Betrachtung der Abbildung 57 liegt nahe, dass es sich bei vielen dieser IDs um kreuzende User handelt, welche den Analysebereich nur in einem sehr kleinen Bereich kreuzen. Bei der herkömmlichen Filterung geht dieser Umstand mit dem Richtungswinkelkriterium ein. Für Analysen mittels adaptiertem Jaccardindex scheint es angebracht, eine Mindestanzahl an normäquivalenten Basisstationen anzugeben.

5 Diskussion und Ausblick

5.1 Zusammenfassung und Bewertung der Methoden

Für den gesamten Ablauf zur Ermittlung der Verkehrslage wurden mehrere Methoden vorgestellt. Abgesehen von den notwendigen Vorarbeiten, wie der erforderlichen Berechnung der realen Basisstationsstandorte, war es wichtig, dass alle konzipierten Methoden echtzeitfähig sind. Aufgrund dieser Echtzeitforderung kann maximal im Bereich des Aktualisierungsintervalls gewartet bzw. überprüft werden, ob sich eine ID mit hoher Wahrscheinlichkeit im Untersuchungsraum bewegt. Da am hochrangigen Straßennetz die Zeitdifferenz zwischen Zellwechseln relativ lange ist (üblicherweise 2-3 Zellwechsel in einem 10min-Aktualisierungsintervall bei ungestauten Verhältnissen), können herkömmliche Ähnlichkeitsmetriken nur bedingt angewandt werden.

Ein weiteres Problem, welches sich aus der Anwendung div. Metriken ergeben würde, ist die Forderung nach einer Normroute zwischen Zellen entlang einer Straßenachse. Die gültigen GPS-Messfahrten zwischen Klagenfurt und Graz bestätigen dieses Problem. Trotz beinahe identem Nutzerverhalten waren nur 2.2% der Basisstationen an allen drei Fahrten beteiligt. Deshalb wurde im Bereich der Geschwindigkeits- und Reisezeitermittlung, welche die prioritäre Anwendung darstellt, auf eine Punkt-zu-Punkt-Überprüfung übergegangen. Wie die Ergebnisse in Kapitel 4 zeigen, können durch diese Methode mithilfe geeigneter Filtereinstellungen gute Resultate erzielt werden. Besonders der Vergleich mit den Querschnittsdaten des nördlicheren Querschnittes liefert mit einem Korrelationswert von 0.73 eine gute Ähnlichkeit und beweist wiederum die gute Anwendbarkeit von Mobilfunkdaten. Der südlicher liegende Querschnitt wurde ebenfalls analysiert. Dieser lieferte jedoch deutlich schlechtere Ergebnisse. Da dieser Messquerschnitt gegen Ende des Untersuchungsbereiches liegt, waren diese Resultate nicht überraschend. Es zeigt sich, dass der Umgebungsbereich entlang der Strecke deutlich (ab 5km aufwärts) größer sein muss als der Analysebereich, insbesondere im Hinblick darauf, dass der erste lokalisierte Zellwechsel einer ID im betrachteten Bereich nicht in die Analyse mit eingehen sollte.

Eine weitere Problemzone der Methode ist die Betrachtung von Strecken mit hohem Tunnelanteil. Üblicherweise sinkt die empfangene Signalstärke sowie die –qualität am Tunnelportal rapide, was auch bei den Messfahrten zwischen Klagenfurt und Graz gut zu beobachten war. Bei manchen Fahrten kam es dabei sogar zu Verbindungsabbrüchen. Innerhalb der Tunnelanlage ermöglichen Tunnelfunkanlagen, welche über Leitungen mit einer Basisstation verbunden sind, eine Kommunikation mit der Außenwelt. Auch wenn es nun zu keinem Verbindungsabbruch kommt, ist für diesen Fall die allgemeine Methode nicht korrekt. Hierfür müssten Messfahrten unternommen werden, um zu eruieren, wie weit das Signal in den Tunnel reicht, bzw. wann eine Übergabe erfolgt.

Im Gegensatz zur Geschwindigkeits- und Reisezeitanalyse, kann weder die Aktivitätsanalyse noch die Mastendynamik eine Unterscheidung hinsichtlich der Fahrtrichtung bieten, da beide nur Umgebungsbereiche analysieren. Ereignet sich ein Zwischenfall, kann dieser zwar detektiert, aber keiner Fahrtrichtung zugeordnet werden. Während die Aktivitätsanalyse mithilfe historischer Daten gute Ergebnisse für den Beispielfall lieferte, waren jene der Mastendynamik deutlich weniger überzeugend und liefern noch Potenzial nach oben.

5.2 Zukünftige Forschungsfragen

Es hat sich gezeigt, dass die entwickelten Methoden grundsätzlich funktionieren. Dennoch sind vor einer denkbaren realen Anwendung einige Fragen noch zu klären. Eine davon betrifft die zuvor angesprochene Problematik der Definition einer Normroute insbesondere im städtischen Bereich. Die Verwendung von Voronoi-Zellen zur Definition von Normrouten kann als guten ersten Ansatz gewertet werden. Eine alternative und möglicherweise bessere Methode könnte hier ein „Hidden Markov Model“ (HMM) darstellen, wie es bei [Fosler-Lussier, 1998] erklärt wird. Dabei werden Vorhersagen auf Basis von Ausgangszuständen und mittels Übergangswahrscheinlichkeiten ermittelt. Infolge längerer Beobachtungen könnten Übergangswahrscheinlichkeiten von Basisstationen in der Nähe von Straßenachsen analysiert werden und daraus eine verbesserte Normroute ermittelt werden. Zeitliche Beobachtungen lassen darauf schließen, dass diese Übergangswahrscheinlichkeiten nicht tagesstationär sind, was sicherlich genauer betrachtet werden sollte.

Wie bereits erwähnt, ist die Filterung von parallel verlaufenden Straßen eine sehr schwierige Aufgabe welche mit den entwickelten Methoden nicht gelöst werden kann. Wie schon bereits in Abschnitt 2.7 erwähnt, könnten hier Nutzerähnlichkeiten wie bei [Ying et al., 2010] oder [Li et al, 2008] möglicherweise eine Verbesserung liefern. Voraussetzung dafür ist dafür nicht nur eine Normroute sondern auch Normaufenthaltszeiten in den einzelnen Zellen. So können Normrouten und –zeiten für die hochrangige wie auch die Parallelstraße ermittelt und verglichen werden.

Weiters sind die Handoverpunkte, welche bei den Analysen auf Freilandstrecken verwendet wurden, von Interesse. Da von den GPS-Referenzmessfahrten zwischen Klagenfurt und Graz nur 3 gültige übrig blieben, war eine seriöse Ermittlung der Handoverpunkte bzw. deren Streuung nicht möglich. Deren Ermittlung für die gegebenen Daten wäre wünschenswert. [Gundlegård, Karlsson, 2010] haben solche Analysen in Schweden bereits durchgeführt. Sie weisen ebenfalls darauf hin, dass die Streuung im Bereich von Handoverpunkten im UMTS-Netz deutlich geringer ist. Leider werden UMTS-Handoverpunkte in den verwendeten Daten (noch) nicht erfasst.

In dieser Arbeit wurden drei verschiedene Methoden vorgestellt, wie die Verkehrslage analysiert werden kann. Alle drei Methoden wurden getrennt auf ihre Funktionsfähigkeit hin überprüft, jedoch nie zu einer Gesamtabschätzung fusioniert. Ebenso fehlt ein geeignetes Prognosemodell, welches mit einer vernünftigen Sicherheit Prognosen für das folgende Intervall machen kann. Diese Daten könnten im Ereignisfall durch Verknüpfung mit Alternativrouten in weiterer Folge als Basis für mobile dynamische Wegweiser dienen, wie sie bei [Hebenstreit, 2013] beschrieben werden.

Wie bereits in Abschnitt 3.2 erwähnt, bietet der Mobilfunkbetreiber zwei Datenstreams in unterschiedlicher Qualität an, wobei gemäß [Telekom Austria Group, 2011] die Daten der besseren Version Informationen wie CellID oder Location Area Code (LAC) beinhalten. Bei Verwendung eines mobilfunkfähigen Endgerätes können diese Informationen ebenfalls ausgelesen werden. Dadurch könnten gemessene Informationen leichter mit jenen aus dem Datensatz abgeglichen und die Suche der richtigen ID erleichtert werden. Zusätzlich werden in der genannten Version auch Informationen zum Zelltyp (Rundstrahl- oder Winkelstrahlantenne) sowie dem Leistungstyp angegeben. Durch das Wissen über die Leistungslevels könnten die Handoverpunkte besser berechnet werden. Zu guter

letzt existieren in der besseren Version deutlich mehr GPS-Daten, welche aufgrund ihrer leichteren Zuordenbarkeit zur Straßeninfrastruktur und ihrer höheren zeitlichen Auflösung ebenfalls sehr nützlich hinsichtlich der Verkehrsageschätzung sein könnten.

Literaturverzeichnis

Bücher:

- Baehr, H. D.; Stephan, K. (2010): *Wärme- und Stoffübertragung*, 7.Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Bronstein, I.; Semendjajew K.; Musiol G.; Mühlig H. (2008): *Taschenbuch der Mathematik*, Harri Deutsch Verlag
- Gruber F. J.; Joeckel R. (2012): *Formelsammlung für das Vermessungswesen*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 16. Auflage
- Kohlen, Ralf (2004): *Routenidentifikation in Verkehrsnetzen auf der Grundlage unscharfer Ortungsinformationen (GSM)*, Shaker Verlag
- Ottmann, T.; Widmayer, P. (2012): *Algorithmen und Datenstrukturen*, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2012, 5.Auflage
- Sauter, M (2011): *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme*, Vieweg+Teubner Verlag
- Schlittgen, R. (2001): *Angewandte Zeitreihenanalyse*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH München
- Tittman, P. (2011): *Graphentheorie – Eine anwendungsorientierte Einführung*, Carl-Hanser Verlag München
- Treiber, M; Kesting A. (2010): *Verkehrsdynamik und –simulation*, Springer Verlag
- Walke, B. (2000): *Mobilfunknetze und ihre Protokolle – Band 1*, Teubner Verlag
- Zhao Y. (1997): *Vehicle Location and Navigation Systems*, Artech House Publishers

Artikel aus Tagungsbänden oder Fachmagazinen:

- Bar-Gera, Hillel (2007): *Evaluation of a cellular phone-based system for measurements of traffic speeds and travel times: A case study from Israel*, In: Transportation Research Part C 15 (2007)
- Caceres, N; Wideberg, J. P.; Benitez, F. G. (2008): *Review of traffic data estimations extracted from cellular networks*, In: Intelligent Transport Systems Vol 2 (2008), S.179-192
- Demissie, Merkebe Getachew; De Almeida Correia, Gonçalo Homem; Bento, Carlos (2013): *Intelligent road traffic status detection system through cellular networks handover information: An exploratory study*, In: Transportation Research Part C 32 (2013) S.76-88
- Fiadino P.; Valerio D.; Ricciato F.; Hummel K. (2012): *Steps towards the Extraction of Vehicular Mobility Patterns from 3G-Signalling Data*, In: Traffic Monitoring and Analysis - 4th International Workshop, TMA 2012, Vienna, Austria, März 2012 Proceedings, S.66-80
- Gundlegård D; Karlsson J. M. (2008): *Handover location accuracy for travel time estimation in GSM and UMTS*, IET Intelligent Transport Systems, März 2009, S.87-94
- Janecek, A.; et al. (2012): *Incident detection from cellular network signalling*, 19th ITS World Congress, 2012, Wien
- Körner M. (2011): *Nutzungsmöglichkeiten von Floating Car Data zur Verkehrsflussoptimierung*, In: Angewandte Geoinformatik 2011: Beiträge zum 23. AGIT-Symposium Salzburg ; Herausgeber: Strobl, J.; Blaschke, T.; Griesebner, G. - Berlin; S.381 - 386

- Li Q., Zheng Y., Xie X., Chen Y., Liu W., Ma W. Y. (2008): *Mining user similarity based on location history*, In: ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems (ACM GIS 2008)
- Lighthill, M. J.; Whitham, G.B. (1955): *On kinematic waves – II. A theory of traffic on long crowded roads*; In: Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Band 229, S.317-345
- Quintero, R.; et al. (2011): *Extended Floating Car Data System – Experimental Study*; IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011, Baden-Baden
- Steenbruggen, J.; et al. (2012): *Data from telecommunication networks for incident management: An exploratory review on safety and security*, Transport Policy (2012)
- Ying, J. J-C; Lu, E. H-C; Lee, W-C; Weng, T-C; Tseng, V.S. (2010): *Mining User Similarity from Semantic Trajectories*, In: Proceedings of the 2nd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Location Based Social Networks, S.19 - 26
- Wardrop, J.G. (1952): *Some theoretical aspects of road traffic research*, In ICE Proceedings: Engineering Divisions, Band 1, Ausgabe 3, (1952), S.325 –362

Dissertationen, Diplomarbeiten:

- Fischer, J. (2012): *Track Aggregation with Use of Fréchet Distance*, Freie Universität Berlin, Bachelorarbeit
- Hebenstreit, C. (2013): *Konzeption und Anwendung von mobilen dynamischen Wegweisern am hochrangigen Straßennetz*, Technische Universität Graz, Diplomarbeit
- Kühnel, C. (2011): *Verkehrsdaterfassung mittels Floating Car Observer auf zweistreifigen Landstraßen*, Universität Kassel, Dissertation
- Leitzke, C. (2012): *Reisezeitermittlung im motorisierten Individualverkehr mit Hilfe drahtloser Kommunikationstechnologien*, Universität Kassel, Dissertation
- Linauer, M. (2005): *Generierung streckenbezogener Verkehrsdaten als Basis für den Einsatz in Verkehrstelematiksystemen*, Universität für Bodenkultur Wien, Dissertation
- Listl, G. (2003): *Anwendung neuer Technologien zur Erfassung des Verkehrsablaufs*, Universität Kassel, Dissertation
- Schick, P. (2003): *Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses*, Universität Stuttgart, Dissertation
- Schlaich, J. (2010): *Nutzung von Mobilfunkdaten für die Analyse der Routenwahl*, Universität Stuttgart, Dissertation

Aus dem Internet:

3rd Generation Partnership Project (3GPP)

<http://www.3gpp.org/> [Datum des Zugriffs: 05.01.2013]

Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) (2013): *3D-Referenzsysteme für Österreich*

http://www.bev.gv.at/pls/portal/docs/PAGE/BEV_PORTAL_CONTENT_ALLGEMEIN/0200_PROD_UKTE/PDF/SYSTEME_LANDESVERMESSUNG_2012.PDF [Datum des Zugriffs: 07.05.2013]

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (2008) – *Öffentliche Mobilfunknetze und ihre Sicherheitsaspekte*

https://www.bsi.bund.de/cae/servlet/contentblob/487520/publicationFile/30774/oefmobil_pdf.pdf [Datum des Zugriffs: 20.11.2012]

Conningtech.Wordpress

<http://conningtech.wordpress.com/2008/05/08/mobile-network-evolution-gsm-to-umts/>
[Datum des Zugriffs: 01.03.2013]

Fosler-Lussier, E. (1998) – *Markov Models and Hidden Markov Models: A Brief Tutorial*

<http://www.di.ubi.pt/~jpaulo/competence/tutorials/hmm-tutorial-1.pdf>
[Datum des Zugriffs: 10.09.2013]

Evenden, Gerald I. (1995) *Cartographic Projection Procedures for the UNIX Environment - A User's Manual*, U.S. Geological Survey Open-file Report 90-284

<http://pubs.usgs.gov/of/1990/of90-284/ofr90-284.pdf> [Datum des Zugriffs: 30.06.2013]

Geoportal Graz

<http://www.geoportal.graz.at/cms/beitrag/10198844/4754238>
[Datum des Zugriffs: 20.08.2013]

GIS Steiermark

<http://www.gis.steiermark.at/cms/ziel/14292094/DE/> [Datum des Zugriffs: 07.05.2013]

GPS-Visualizer,

<http://www.gps-visualizer.com>, [Datum des Zugriffs: 01.07.2013]

HUT Communications Laboratory (2002) – *BSS Radio Parameters*

<http://www.comlab.hut.fi/opetus/260/3v053.pdf> [Datum des Zugriffs: 01.03.2013]

IVV Geowissenschaften der WWU Münster (IVV-Geo)

http://ivvgeo.uni-muenster.de/Vorlesung/GPS_Script/einfuehrung_vermessung.html
[Datum des Zugriffs: 01.07.2013]

Lehrstuhl für Nachrichtentechnik, Technische Universität München (LNT/TUM) - *Ein Lerntutorial für Nachrichtentechnik im world wide web*

<http://www.lntwww.de/> [Datum des Zugriffs: 01.09.2013]

Lipinski, Klaus (2012) *ITwissen.info*

<http://www.itwissen.info/definition/lexikon/received-signal-strength-RSS.html> [Datum des Zugriffs: 20.11.2012]

Katrein

<http://www.kathrein.pl/down/9987102.pdf> [Datum des Zugriffs: 01.02.2013]

Matlab Online-Hilfe

<http://www.mathworks.com> [Datum des Zugriffs: 01.08.2012]

Oe3

<http://oe3.orf.at/verkehr/stories/370103/> [Datum des Zugriffs: 01.09.2013]

Open Data Steiermark,

<http://www.data.steiermark.at/> [Datum des Zugriffs: 05.05.2013]

Open Street Map - OSM

<http://www.openstreetmap.org> [Datum des Zugriffs: 21.08.2013]

PROJ.4 - *Cartographic Projections Library*

<http://trac.osgeo.org/proj/> [Datum des Zugriffs: 30.06.2013]

Sunday, D. (2012): *Inclusion of a point in a Polygon*

http://geomalgorithms.com/a03-_inclusion.html [Datum des Zugriffs: 01.11.2012]

RTR Telekom Monitor

https://www.rtr.at/de/komp/TKMonitor_4_2012/TM4-2012.pdf [Datum des Zugriffs: 15.01.2013]

Normen:

3rd Generation Partnership Project (2003): *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) – Radio subsystem synchronisation (Release 1999)*, Technical Specification Group GSM/Edge Radio Access Network (3GPP TS 05.10 V8.12.0 – 2003-08)

ASFINAG (2013): *Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA) Technische Spezifikation – Technisches Planungshandbuch der ASFINAG, Version 2.00*

European Telecommunications Standards Institute (1996): *Digital cellular telecommunications system (Phase2+); Location Services (LCS); (Functional description) – Stage 2 (GSM 03.71 version 7.0.3 Release 1998)*

European Telecommunications Standards Institute (1996): *Digital cellular telecommunications system (Phase2+); Mobile Application Part (MAP) specification (GSM 09.02)*

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2001): *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*

National Research Council, Transportation Research Board (2000): *Highway capacity manual*; TRB Business Office, Washington, DC

Software, Applikationen und Skripte

[SW01] – Felix B., *Call Meter 3G: DIE monitor App*, Mobile Applikation für Android Smartphones, Version: August 2013, Verfügbar unter:

<https://play.google.com/store/apps/details?id=de.ub0r.android.callmeter>

[SW02] – Google Inc., *MyTracks*, Mobile Applikation für Android-Smartphones, Version: August 2013, Verfügbar unter:

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.android.maps.mytracks&hl=de>

[SW03] – Nindl,E; *cartographic coordinate system filter cs2cs.m* (Matlab-File), Version: Juli 2013, Verfügbar unter:

<https://github.com/nine/matlab-cs2cs/blob/master/cs2cs.m>

[SW04] – Van Laven,K.; *Find nearest neighbor on sphere* (Matlab Files), Version April 2013, Verfügbar unter:

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28844-find-nearest-neighbors-on-sphere>

Sonstige Quellen:

Aurenhammer, F.; Aichholzer O.; Bittner P. (1997) *Geometrische Algorithmen* , Manuskript (Vorlesungsbegleiter) der Vorlesung Geometrische Algorithmen an der Technischen Universität Graz

Telekom Austria Group (2013): *A1 Mobil Traffic Data Service – How-To*, Draft V1.2, Februar 2013

Telekom Austria Group (2011): *Output Stream Specification - Option B*, Version 2.2.1, Dezember 2011

Anhang A

Folgende Tabelle listet die in Abschnitt 4.3 verwendeten Sets und deren Einstellungen im Detail. Von den 4464 (10-min Intervalle im Zeitraum 01.05. – 31.05.2012) konnten insgesamt 4232 (94.8%) gültige Vergleichspaare ermittelt werden. Die restlichen Daten fehlen entweder aufgrund fehlerhafter Stundenfiles oder fehlender Messdaten.

Set	tmin [min]	tmax [min]	dmin [m]	dmax [m]	$\Delta\alpha_{\max}$ [°]	Umkreis [m]	HO-Factor p [-]
1	1	90	50	10000	67	5000	0.55
2	2	90	50	10000	67	5000	0.55
3	3	90	50	10000	67	5000	0.55
4	1	90	50	10000	67	5000	0.60
5	2	90	50	10000	67	5000	0.60
6	3	90	50	10000	67	5000	0.60
7	2	90	50	10000	67	5000	0.50
8	2	90	100	10000	67	5000	0.55
9	3	90	100	10000	67	5000	0.55
10	3	90	50	10000	67	5000	0.50
11	2	90	50	10000	67	5000	0.65
12	2	90	50	10000	45	5000	0.55
13	3	90	50	10000	67	5000	0.65
14	2	90	100	10000	45	5000	0.55
15	2	45	50	10000	67	5000	0.55
16	2	90	50	10000	45	5000	0.60
17	2	45	50	10000	67	5000	0.60
18	2	90	50	10000	45	5000	0.65
19	2	60	50	10000	67	5000	0.55
20	2	60	150	10000	67	5000	0.55
21	2	90	50	10000	30	5000	0.55
22	2	90	50	10000	30	5000	0.60
23	2	90	50	10000	30	5000	0.65
24	1	90	50	10000	30	5000	0.55
25	2	120	50	10000	30	5000	0.55
26	2	90	50	15000	30	5000	0.55
27	2	90	50	20000	30	5000	0.55
28	2	90	50	15000	30	5000	0.60
29	2	90	50	8000	30	5000	0.55
30	2	90	50	20000	30	5000	0.60
31	2	90	50	5000	30	5000	0.55

Folgende Tabelle beinhaltet die Ergebnisse aller Sets für den gesamten Zeitbereich

Set	Geschwindigkeitsbezogen						Verkehrsstärkenbezogen					
	max [km/h]	mean [km/h]	median [km/h]	min [km/h]	sd [km/h]	r [-]	max [-]	mean [-]	median [-]	min [-]	sd [-]	r [-]
1	154	15.4	13.0	2.9E-04	12.7	0.446	0.87	0.18	0.17	5.1E-03	0.06	0.899
2	109	12.1	9.8	1.5E-03	10.0	0.517	0.87	0.16	0.16	9.8E-03	0.06	0.891
3	109	12.3	10.4	2.4E-03	9.7	0.463	0.87	0.15	0.15	5.2E-03	0.06	0.885
4	145	17.1	15.2	3.3E-03	12.0	0.478	0.87	0.18	0.17	5.1E-03	0.06	0.899
5	109	12.8	10.7	5.3E-03	10.0	0.539	0.80	0.16	0.16	9.8E-03	0.06	0.890
6	109	12.2	10.2	1.2E-04	9.7	0.500	0.80	0.15	0.15	5.2E-03	0.06	0.884
7	109	10.4	7.9	3.2E-03	9.6	0.433	0.73	0.16	0.16	5.2E-03	0.06	0.891
8	109	12.1	9.8	1.5E-03	10.0	0.517	0.87	0.16	0.16	9.8E-03	0.06	0.891
9	109	12.3	10.4	2.4E-03	9.7	0.463	0.87	0.15	0.15	5.2E-03	0.06	0.885
10	109	12.0	10.1	1.6E-02	9.6	0.423	0.80	0.15	0.15	5.2E-03	0.06	0.884
11	109	12.5	10.5	2.2E-03	9.9	0.546	0.87	0.17	0.16	9.8E-03	0.06	0.890
12	109	11.6	9.4	1.9E-04	9.8	0.508	0.80	0.16	0.16	6.5E-03	0.06	0.890
13	109	11.6	9.4	2.8E-03	9.7	0.517	0.80	0.16	0.15	5.2E-03	0.06	0.884
14	109	11.6	9.4	1.9E-04	9.8	0.508	0.80	0.16	0.16	6.5E-03	0.06	0.890
15	109	12.1	9.8	1.5E-03	10.0	0.517	0.87	0.16	0.16	9.8E-03	0.06	0.891
16	109	12.1	10.0	2.5E-03	9.7	0.530	0.73	0.16	0.16	6.5E-03	0.06	0.889
17	109	12.8	10.7	5.3E-03	10.0	0.539	0.80	0.16	0.16	9.8E-03	0.06	0.890
18	109	11.9	9.8	2.0E-03	9.6	0.540	0.87	0.17	0.16	6.5E-03	0.06	0.889
19	109	12.1	9.8	1.5E-03	10.0	0.517	0.87	0.16	0.16	9.8E-03	0.06	0.891
20	109	12.1	9.8	1.5E-03	10.0	0.517	0.87	0.16	0.16	9.8E-03	0.06	0.891
21	109	11.5	9.2	4.7E-05	10.0	0.501	0.73	0.16	0.15	9.8E-03	0.06	0.887
22	109	11.9	9.7	3.4E-04	9.9	0.523	0.67	0.16	0.15	9.8E-03	0.06	0.887
23	109	11.7	9.6	2.2E-03	9.7	0.542	0.80	0.16	0.16	9.8E-03	0.06	0.887
24	485	16.0	11.9	3.1E-03	18.3	0.264	0.73	0.17	0.16	5.1E-03	0.06	0.892
25	109	11.5	9.2	4.7E-05	10.0	0.501	0.73	0.16	0.15	9.8E-03	0.06	0.887
26	109	12.5	10.6	3.4E-04	9.9	0.486	0.67	0.20	0.20	3.7E-03	0.07	0.872
27	104	11.7	9.6	8.5E-03	9.8	0.479	0.73	0.22	0.21	3.7E-03	0.08	0.865
28	109	12.9	11.2	4.9E-03	9.8	0.507	0.67	0.20	0.20	3.7E-03	0.08	0.871
29	109	12.8	10.1	3.1E-03	11.2	0.496	0.67	0.11	0.11	6.2E-03	0.05	0.878
30	97	12.8	11.1	7.2E-05	9.6	0.494	0.73	0.23	0.22	3.7E-03	0.08	0.865
31	117	17.8	14.4	3.0E-02	15.1	0.414	0.21	0.05	0.04	0.0E+00	0.02	0.777

In folgender Tabelle sind die Ergebnisse aller Sets zwischen 06:00 und 22:00 Uhr gelistet

Set	Geschwindigkeitsbezogen						Verkehrsstärkenbezogen					
	max [km/h]	mean [km/h]	median [km/h]	min [km/h]	sd [km/h]	r [-]	max [-]	mean [-]	med [-]	min [-]	sd [-]	r [-]
1	73	12.8	11.2	5.0E-03	9.5	0.512	0.87	0.19	0.19	5.1E-03	0.06	0.829
2	66	10.5	9.0	1.5E-03	8.1	0.592	0.87	0.17	0.17	9.8E-03	0.06	0.818
3	74	11.5	10.1	7.2E-03	8.4	0.583	0.87	0.16	0.16	9.0E-03	0.05	0.811
4	72	15.0	14.1	1.8E-02	9.5	0.552	0.87	0.19	0.19	5.1E-03	0.06	0.829
5	67	11.2	9.9	5.3E-03	8.2	0.612	0.80	0.17	0.17	9.8E-03	0.06	0.816
6	75	11.1	9.7	1.2E-04	8.3	0.598	0.80	0.16	0.16	9.0E-03	0.05	0.808
7	63	8.8	7.0	4.9E-03	7.7	0.550	0.73	0.17	0.17	6.5E-03	0.05	0.818
8	66	10.5	9.0	1.5E-03	8.1	0.592	0.87	0.17	0.17	9.8E-03	0.06	0.818
9	74	11.5	10.1	7.2E-03	8.4	0.583	0.87	0.16	0.16	9.0E-03	0.05	0.811
10	73	11.3	10.0	1.6E-02	8.3	0.560	0.80	0.16	0.15	9.0E-03	0.05	0.809
11	82	11.0	9.7	4.9E-03	8.2	0.618	0.87	0.18	0.17	9.8E-03	0.06	0.817
12	61	10.0	8.4	1.9E-04	7.9	0.590	0.80	0.17	0.17	6.5E-03	0.05	0.816
13	88	10.4	8.8	2.8E-03	8.2	0.606	0.80	0.17	0.16	9.0E-03	0.05	0.808
14	61	10.0	8.4	1.9E-04	7.9	0.590	0.80	0.17	0.17	6.5E-03	0.05	0.816
15	66	10.5	9.0	1.5E-03	8.1	0.592	0.87	0.17	0.17	9.8E-03	0.06	0.818
16	59	10.6	9.2	2.5E-03	8.0	0.610	0.73	0.17	0.17	6.5E-03	0.05	0.815
17	67	11.2	9.9	5.3E-03	8.2	0.612	0.80	0.17	0.17	9.8E-03	0.06	0.816
18	82	10.4	8.9	2.0E-03	8.0	0.617	0.87	0.18	0.17	6.5E-03	0.06	0.816
19	66	10.5	9.0	1.5E-03	8.1	0.592	0.87	0.17	0.17	9.8E-03	0.06	0.818
20	66	10.5	9.0	1.5E-03	8.1	0.592	0.87	0.17	0.17	9.8E-03	0.06	0.818
21	61	9.9	8.4	4.7E-05	7.9	0.582	0.73	0.17	0.16	9.8E-03	0.05	0.811
22	62	10.4	8.9	3.4E-04	8.0	0.603	0.67	0.17	0.16	9.8E-03	0.05	0.810
23	82	10.3	8.7	7.5E-03	8.0	0.617	0.80	0.17	0.17	9.8E-03	0.06	0.812
24	316	12.6	10.1	3.1E-03	13.3	0.366	0.73	0.18	0.17	5.1E-03	0.06	0.818
25	61	9.9	8.4	4.7E-05	7.9	0.582	0.73	0.17	0.16	9.8E-03	0.05	0.811
26	106	11.4	10.1	3.4E-04	8.5	0.579	0.67	0.22	0.21	3.7E-03	0.07	0.779
27	89	10.4	8.6	8.5E-03	8.4	0.561	0.73	0.23	0.23	3.7E-03	0.08	0.767
28	106	12.0	10.9	8.8E-03	8.5	0.597	0.67	0.22	0.21	3.7E-03	0.07	0.777
29	95	10.9	8.9	1.4E-02	9.0	0.549	0.67	0.12	0.11	6.2E-03	0.04	0.805
30	89	12.0	10.8	7.2E-05	8.5	0.577	0.73	0.25	0.24	3.7E-03	0.08	0.766
31	116	15.2	12.5	3.0E-02	12.4	0.440	0.20	0.05	0.04	0.0E+00	0.02	0.681

Nachstehende Tabelle listet die Ergebnisse aller Sets zwischen 22:00 und 06:00 Uhr

Set	Geschwindigkeitsbezogen						Verkehrsstärkenbezogen					
	max [km/h]	mean [km/h]	med [km/h]	min [km/h]	sd [km/h]	r [-]	max [-]	mean [-]	med [-]	min [-]	sd [-]	r [-]
1	154	20.80	17.83	2.9E-04	16.1	0.336	0.52	0.15	0.14	9.8E-03	0.07	0.752
2	109	15.49	12.54	1.1E-02	12.4	0.367	0.51	0.14	0.13	9.8E-03	0.06	0.738
3	109	14.01	10.97	2.4E-03	11.9	0.269	0.48	0.13	0.12	5.2E-03	0.06	0.719
4	145	21.31	19.07	3.3E-03	15.2	0.363	0.52	0.15	0.14	9.8E-03	0.07	0.752
5	109	15.88	12.93	2.0E-02	12.4	0.393	0.51	0.14	0.13	9.8E-03	0.06	0.740
6	109	14.23	11.50	8.6E-03	11.9	0.324	0.48	0.13	0.13	5.2E-03	0.06	0.723
7	109	13.65	10.64	3.2E-03	11.9	0.230	0.52	0.14	0.13	5.2E-03	0.06	0.732
8	109	15.49	12.54	1.1E-02	12.4	0.367	0.51	0.14	0.13	9.8E-03	0.06	0.738
9	109	14.01	10.97	2.4E-03	11.9	0.269	0.48	0.13	0.12	5.2E-03	0.06	0.719
10	109	13.38	10.24	2.7E-02	11.7	0.220	0.52	0.13	0.12	5.2E-03	0.06	0.714
11	109	15.48	12.47	2.2E-03	12.2	0.397	0.52	0.14	0.14	9.8E-03	0.07	0.733
12	109	15.02	11.94	9.3E-03	12.2	0.351	0.51	0.14	0.13	9.8E-03	0.06	0.735
13	109	14.10	11.18	1.0E-02	11.8	0.344	0.48	0.14	0.13	5.2E-03	0.07	0.720
14	109	15.02	11.94	9.3E-03	12.2	0.351	0.51	0.14	0.13	9.8E-03	0.06	0.735
15	109	15.49	12.54	1.1E-02	12.4	0.367	0.51	0.14	0.13	9.8E-03	0.06	0.738
16	109	15.16	12.27	4.8E-03	12.0	0.374	0.51	0.14	0.13	9.8E-03	0.06	0.738
17	109	15.88	12.93	2.0E-02	12.4	0.393	0.51	0.14	0.13	9.8E-03	0.06	0.740
18	109	14.81	12.15	2.2E-03	11.8	0.381	0.52	0.14	0.14	9.8E-03	0.07	0.732
19	109	15.49	12.54	1.1E-02	12.4	0.367	0.51	0.14	0.13	9.8E-03	0.06	0.738
20	109	15.49	12.56	1.1E-02	12.4	0.367	0.51	0.14	0.13	9.8E-03	0.06	0.738
21	109	14.83	11.87	1.5E-02	12.5	0.354	0.49	0.13	0.13	9.8E-03	0.06	0.732
22	109	14.89	12.02	2.6E-02	12.3	0.377	0.49	0.14	0.13	9.8E-03	0.06	0.736
23	109	14.65	11.88	2.2E-03	12.1	0.388	0.52	0.14	0.13	9.8E-03	0.07	0.733
24	485	22.89	17.06	5.4E-03	24.3	0.138	0.52	0.14	0.13	1.0E-02	0.06	0.753
25	109	14.83	11.87	1.5E-02	12.5	0.354	0.49	0.13	0.13	9.8E-03	0.06	0.732
26	109	14.64	11.97	1.5E-02	11.9	0.348	0.62	0.17	0.16	9.8E-03	0.08	0.735
27	104	14.28	11.55	1.3E-02	11.7	0.343	0.67	0.18	0.17	9.8E-03	0.08	0.737
28	109	14.67	12.00	4.9E-03	11.8	0.368	0.62	0.18	0.17	9.8E-03	0.08	0.740
29	109	16.74	13.70	3.1E-03	14.0	0.384	0.44	0.10	0.09	9.8E-03	0.05	0.675
30	97	14.29	11.84	1.2E-02	11.5	0.354	0.67	0.19	0.18	9.8E-03	0.08	0.744
31	117	23.76	20.13	3.3E-02	18.8	0.324	0.21	0.05	0.04	5.2E-03	0.03	0.474

Nachstehende Tabelle beinhaltet die Ergebnisse der Daten im Zeitraum Montag - Freitag

Set	Geschwindigkeitsbezogen						Verkehrsstärkenbezogen					
	max [km/h]	mean [km/h]	med [km/h]	min [km/h]	sd [km/h]	r [-]	max [-]	mean [-]	med [-]	min [-]	sd [-]	r [-]
1	74	11.77	10.13	2.3E-02	9.00	0.422	0.80	0.15	0.15	8.3E-03	0.06	0.882
2	82	12.79	10.97	2.2E-03	9.68	0.525	0.87	0.17	0.17	9.8E-03	0.06	0.889
3	74	11.69	9.52	1.9E-04	9.57	0.491	0.80	0.16	0.16	6.5E-03	0.06	0.889
4	88	11.79	9.75	1.0E-02	9.41	0.502	0.80	0.16	0.16	8.3E-03	0.06	0.882
5	74	11.69	9.52	1.9E-04	9.57	0.491	0.80	0.16	0.16	6.5E-03	0.06	0.889
6	74	12.22	10.11	1.5E-03	9.76	0.499	0.87	0.16	0.16	9.8E-03	0.06	0.890
7	70	12.27	10.40	2.5E-03	9.49	0.511	0.73	0.16	0.16	6.5E-03	0.06	0.889
8	70	13.03	11.21	1.3E-02	9.77	0.520	0.80	0.16	0.16	9.8E-03	0.06	0.890
9	82	12.11	10.16	2.0E-03	9.40	0.520	0.87	0.17	0.16	6.5E-03	0.06	0.888
10	74	12.22	10.11	1.5E-03	9.76	0.499	0.87	0.16	0.16	9.8E-03	0.06	0.890
11	154	15.53	13.17	2.9E-04	12.62	0.435	0.87	0.18	0.18	5.1E-03	0.06	0.899
12	74	12.22	10.11	1.5E-03	9.76	0.499	0.87	0.16	0.16	9.8E-03	0.06	0.890
13	74	11.50	9.43	4.7E-05	9.57	0.492	0.73	0.16	0.15	9.8E-03	0.06	0.885
14	70	12.04	10.18	3.4E-04	9.50	0.509	0.67	0.16	0.16	9.8E-03	0.06	0.885
15	82	11.93	10.02	2.2E-03	9.42	0.524	0.80	0.17	0.16	9.8E-03	0.06	0.885
16	485	15.80	11.53	3.1E-03	19.14	0.251	0.73	0.17	0.16	5.1E-03	0.06	0.892
17	74	11.50	9.43	4.7E-05	9.57	0.492	0.73	0.16	0.15	9.8E-03	0.06	0.885
18	106	12.65	11.01	3.4E-04	9.53	0.466	0.67	0.20	0.20	3.7E-03	0.08	0.866
19	104	11.77	10.01	8.5E-03	9.45	0.460	0.73	0.22	0.21	3.7E-03	0.08	0.858
20	106	13.20	11.69	4.9E-03	9.43	0.485	0.67	0.21	0.20	3.7E-03	0.08	0.865
21	88	12.80	10.26	3.1E-03	10.70	0.484	0.67	0.12	0.11	9.8E-03	0.05	0.877
22	74	12.22	10.11	1.5E-03	9.76	0.499	0.87	0.16	0.16	9.8E-03	0.06	0.890
23	89	12.95	11.51	7.6E-04	9.33	0.475	0.73	0.23	0.22	3.7E-03	0.08	0.859
24	117	17.40	14.32	3.0E-02	14.28	0.395	0.21	0.05	0.05	6.1E-03	0.02	0.778
25	74	12.28	10.69	2.4E-03	9.26	0.455	0.87	0.15	0.15	8.3E-03	0.06	0.883
26	145	17.45	15.72	3.3E-03	11.94	0.460	0.87	0.18	0.18	5.1E-03	0.06	0.898
27	70	13.03	11.21	1.3E-02	9.77	0.520	0.80	0.16	0.16	9.8E-03	0.06	0.890
28	75	12.26	10.72	1.2E-04	9.34	0.490	0.80	0.15	0.15	8.3E-03	0.06	0.882
29	74	10.11	7.74	3.2E-03	9.21	0.431	0.73	0.16	0.16	6.5E-03	0.06	0.890
30	74	12.22	10.11	1.5E-03	9.76	0.499	0.87	0.16	0.16	9.8E-03	0.06	0.890
31	74	12.28	10.69	2.4E-03	9.26	0.455	0.87	0.15	0.15	8.3E-03	0.06	0.883

Die Ergebnisse der Samstagdaten sind in der nachstehenden Tabelle zu finden

Set	Geschwindigkeitsbezogen						Verkehrsstärkenbezogen					
	max [km/h]	mean [km/h]	med [km/h]	min [km/h]	sd [km/h]	r [-]	Max [-]	Mean [-]	Med [-]	Min [-]	Sd [-]	r [-]
1	63	13.7	12.0	6.4E-02	10.45	0.433	0.52	0.18	0.18	1.0E-02	0.06	0.886
2	57	10.1	8.2	2.5E-02	8.54	0.561	0.51	0.16	0.16	1.0E-02	0.06	0.879
3	80	10.6	7.8	3.0E-02	9.41	0.454	0.48	0.15	0.15	5.2E-03	0.06	0.871
4	63	14.8	13.4	4.4E-02	10.10	0.488	0.52	0.18	0.18	1.0E-02	0.06	0.886
5	56	10.6	8.8	5.3E-03	8.58	0.577	0.51	0.17	0.16	1.0E-02	0.06	0.879
6	80	10.4	7.8	5.4E-02	9.43	0.485	0.48	0.16	0.15	5.2E-03	0.06	0.872
7	58	8.9	7.0	3.7E-02	7.90	0.436	0.52	0.16	0.16	5.2E-03	0.06	0.877
8	57	10.1	8.2	2.5E-02	8.54	0.561	0.51	0.16	0.16	1.0E-02	0.06	0.879
9	80	10.6	7.8	3.0E-02	9.41	0.454	0.48	0.15	0.15	5.2E-03	0.06	0.871
10	81	10.8	8.3	1.6E-02	9.36	0.414	0.46	0.15	0.15	5.2E-03	0.06	0.870
11	58	10.3	8.4	3.5E-02	8.42	0.586	0.51	0.17	0.17	1.5E-02	0.06	0.880
12	56	9.7	7.5	1.0E-03	8.49	0.553	0.51	0.16	0.16	1.0E-02	0.06	0.877
13	80	9.7	7.2	2.8E-03	9.12	0.508	0.48	0.16	0.16	5.2E-03	0.06	0.875
14	56	9.7	7.5	1.0E-03	8.49	0.553	0.51	0.16	0.16	1.0E-02	0.06	0.877
15	57	10.1	8.2	2.5E-02	8.54	0.561	0.51	0.16	0.16	1.0E-02	0.06	0.879
16	57	10.1	8.5	5.6E-02	8.51	0.567	0.51	0.17	0.16	1.0E-02	0.06	0.878
17	56	10.6	8.8	5.3E-03	8.58	0.577	0.51	0.17	0.16	1.0E-02	0.06	0.879
18	58	9.8	7.8	1.8E-02	8.44	0.579	0.51	0.17	0.16	1.5E-02	0.06	0.878
19	57	10.1	8.2	2.5E-02	8.54	0.561	0.51	0.16	0.16	1.0E-02	0.06	0.879
20	57	10.1	8.2	2.5E-02	8.53	0.561	0.51	0.16	0.16	1.0E-02	0.06	0.879
21	98	9.8	7.4	1.4E-02	9.41	0.526	0.49	0.16	0.16	1.0E-02	0.06	0.877
22	97	9.9	7.7	1.2E-02	9.37	0.547	0.49	0.16	0.16	1.0E-02	0.06	0.878
23	95	9.6	7.3	7.6E-03	9.28	0.570	0.49	0.17	0.16	1.5E-02	0.06	0.878
24	98	13.9	10.6	1.3E-02	12.89	0.267	0.46	0.17	0.17	1.0E-02	0.06	0.882
25	98	9.8	7.4	1.4E-02	9.41	0.526	0.49	0.16	0.16	1.0E-02	0.06	0.877
26	98	10.6	8.9	3.1E-02	9.58	0.517	0.62	0.21	0.20	1.5E-02	0.08	0.884
27	98	9.9	7.7	1.3E-02	9.50	0.494	0.67	0.23	0.22	1.5E-02	0.08	0.888
28	97	10.8	9.1	1.4E-01	9.60	0.538	0.62	0.21	0.21	1.5E-02	0.08	0.884
29	98	11.0	7.8	7.8E-03	10.74	0.515	0.40	0.11	0.11	1.0E-02	0.04	0.861
30	97	10.8	8.7	7.2E-05	9.66	0.515	0.67	0.24	0.24	1.5E-02	0.09	0.891
31	108	17.6	14.1	3.0E-02	14.61	0.451	0.14	0.04	0.04	5.2E-03	0.02	0.767

Die Ergebnisse der Sonntagsdaten sind folgend gelistet

Set	Geschwindigkeitsbezogen						Verkehrsstärkenbezogen					
	max [km/h]	mean [km/h]	med [km/h]	min [km/h]	sd [km/h]	r [-]	max [-]	mean [-]	med [-]	min [-]	sd [-]	r [-]
1	112	16.6	13.2	9.0E-03	14.48	0.239	0.40	0.16	0.16	1.2E-02	0.06	0.898
2	109	13.3	9.9	2.7E-02	12.26	0.278	0.39	0.14	0.14	1.2E-02	0.06	0.893
3	109	13.9	11.3	7.2E-03	12.09	0.216	0.31	0.13	0.13	1.2E-02	0.05	0.887
4	112	17.0	13.9	1.9E-02	13.89	0.249	0.39	0.16	0.16	1.2E-02	0.06	0.898
5	109	13.2	9.7	6.7E-02	12.15	0.263	0.41	0.14	0.14	1.2E-02	0.06	0.894
6	109	13.2	10.1	2.6E-02	11.82	0.225	0.31	0.13	0.13	1.2E-02	0.05	0.891
7	109	13.1	9.6	6.8E-03	12.27	0.248	0.39	0.14	0.14	1.2E-02	0.05	0.892
8	109	13.3	9.9	2.7E-02	12.26	0.278	0.39	0.14	0.14	1.2E-02	0.06	0.893
9	109	13.9	11.3	7.2E-03	12.09	0.216	0.31	0.13	0.13	1.2E-02	0.05	0.887
10	109	14.5	12.1	7.0E-02	12.12	0.191	0.31	0.13	0.13	1.2E-02	0.05	0.885
11	109	12.8	9.6	2.5E-02	11.84	0.265	0.41	0.15	0.14	1.2E-02	0.06	0.894
12	109	13.0	10.1	7.4E-02	11.91	0.260	0.39	0.14	0.14	1.2E-02	0.06	0.892
13	109	12.3	9.3	1.0E-02	11.62	0.244	0.33	0.14	0.13	1.2E-02	0.05	0.890
14	109	13.0	10.1	7.4E-02	11.91	0.260	0.39	0.14	0.14	1.2E-02	0.06	0.892
15	109	13.3	9.9	2.7E-02	12.26	0.278	0.39	0.14	0.14	1.2E-02	0.06	0.893
16	109	12.7	9.7	4.1E-03	11.80	0.248	0.41	0.14	0.14	1.2E-02	0.06	0.893
17	109	13.2	9.7	6.7E-02	12.15	0.263	0.41	0.14	0.14	1.2E-02	0.06	0.894
18	109	12.4	9.5	2.5E-02	11.47	0.258	0.41	0.14	0.14	1.2E-02	0.06	0.894
19	109	13.3	9.9	2.7E-02	12.26	0.278	0.39	0.14	0.14	1.2E-02	0.06	0.893
20	109	13.3	9.9	2.7E-02	12.26	0.278	0.39	0.14	0.14	1.2E-02	0.06	0.893
21	109	13.1	10.0	1.8E-02	12.08	0.237	0.37	0.14	0.14	1.2E-02	0.05	0.894
22	109	12.6	9.5	2.1E-02	11.94	0.229	0.39	0.14	0.14	1.2E-02	0.05	0.894
23	109	12.3	9.4	2.3E-02	11.49	0.256	0.39	0.14	0.14	1.2E-02	0.06	0.896
24	114	19.1	15.3	9.0E-02	17.59	0.116	0.35	0.15	0.15	1.2E-02	0.06	0.895
25	109	13.1	10.0	1.8E-02	12.08	0.237	0.37	0.14	0.14	1.2E-02	0.05	0.894
26	109	13.1	10.5	3.0E-02	11.67	0.213	0.47	0.18	0.18	1.2E-02	0.07	0.906
27	69	13.0	9.6	2.9E-02	11.50	0.222	0.49	0.20	0.20	1.5E-02	0.08	0.906
28	109	13.1	10.7	8.7E-03	11.64	0.210	0.49	0.19	0.19	1.2E-02	0.07	0.906
29	109	14.5	10.9	1.4E-02	14.05	0.214	0.33	0.09	0.09	6.2E-03	0.04	0.849
30	69	13.6	10.9	1.5E-01	11.09	0.227	0.51	0.22	0.21	1.5E-02	0.08	0.908
31	116	20.6	14.5	1.0E-01	19.83	0.123	0.12	0.03	0.03	0.0E+00	0.02	0.640

Anhang B

Folgende Tabelle listet alle möglichen Eventcodes gemäß [Telekom Austria Group, 2013].

Eventcode	Eventname
1	GB_ATTACH
2	GB_CELL_UPDATE
3	GB_OTHERS
4	GB_ROUTING_AREA_UPDATE_RA_UPDATING
5	IU_CS_PAGING
6	IU_PS_PAGING
7	IU_OTHER_TLLI
8	IU_OTHER_TMSI
9	IUPS_ATTACH
10	IUPS_DETACH
11	IUPS_ROUTING_AREA_UPDATE_RA_UPDATING
12	IUPS_ROUTING_AREA_UPDATE_COMBINED_RA_LA_UPDATING
13	IUPS_ROUTING_AREA_UPDATE_COMBINED_RA_LA_UPDATING_WITH_IMSI_ATTACH
14	IUPS_ROUTING_AREA_UPDATE_PERIODIC_UPDATING
15	IUCS_DETACH
16	IUCS_SMS_MOBILE_ORIGINATED
17	IUCS_SMS_MOBILE_TERMINATED
18	IUCS_SETUP
19	IUCS_CONNECT_ACKNOWLEDGE
20	IUCS_DISCONNECT
21	IUCS_LOCATION_UPDATE_NORMAL
22	IUCS_LOCATION_UPDATE_PERIODIC
23	IUCS_LOCATION_UPDATE_IMSI_ATTACH
24	A_DISCONNECT
25	A_OTHER
26	PAGING_CS
27	DETACH
28	SHORT_MESSAGE_SERVICE
29	MOBILE_TERMINATING_CALL
30	CM_REESTABLISHMENT
31	LOCATION_UPDATE
32	HANDOVER_CELL_UPDATE
33	SUPPLEMENTARY_SERVICE
34	MOBILE_ORIGINATED_CALL
35	EMERGENCY_CALL
36	SETUP
37	CONNECT_ACKNOWLEDGE
40	CLOSURE
41	GB_PAGING_PS
48	GPS_NOTIFY

Anhang C

Folgend befindet sich die Liste der erstellten Matlab-Skripte und Funktionen. Kursive Namensblöcke stehen für Funktionen, welche für das zuvor erwähnte Skript benötigt werden.

Skriptname	Verwendung
<u>Ablauf- bzw. allgemeine Ausführungsskripte</u>	
Datenimport	
Input_Log_Files.m <i>mexiTrafficLoader_v136.mexw64</i> <i>mexiTrafficLoader_v88.mexw64</i> <i>iTraffic2Event_List.m</i> <i>Unix2CET_V02.m</i>	Direktimport und Konvertierung der Daten aus *.log-Files
Input_from_csv.m <i>FileImport.m</i> <i>ImportData.m</i>	Import der csv-Daten nach Export durch iTrafficReader
geographische Bereichsfilterung	
Polygon_basiert.m <i>Bereich.m</i> <i>Distance_Angle_Calculation.m</i> <i>PolyArea.m</i>	Bereichsfilterung per Richtungspolygon
Nearest_V01_Haversine.m <i>FindNearestNeighbors¹</i>	Nearest-Neighbor-Filterung - Haversine-Abstandsmaß [SW04]
Nearest_V02_Metric.m <i>Koordinatentranssfromationsberechnungen²</i>	Nearest-Neighbor-Filterung - metrisches Abstandsmaß
Nearest_V03_Metric.m <i>Koordinatentranssfromationsberechnungen²</i>	Nearest-Neighbor-Filterung - Methode 2 (schneller)
Keulen-Basisstations-zuordnung	
<i>allocateLobes2BTS_V02.m</i>	Funktion der Keulen-BTS-Zuordnung
Berechnung der Geschwindigkeit und Reisezeit	
Geschwindigkeit_Reisezeit.m <i>filterEvents.m</i> <i>exclusivEventFilter.m</i> <i>deleteStationaryCells.m</i> <i>PingPongFilter_V03.m</i> <i>splitIDsOverFilterCriteria.m</i> <i>Make_Trajectories.m</i> <i>bts2roadWithGivenTrajectories.m</i> <i>bts2roadWithGivenTrajectories_withUTM.m</i> <i>allocateSpeedData2WayPoints.m</i> <i>calculateTrafficVolumeperIntervalAndSection.m</i> <i>sectionBasedEvaluation.m</i>	Geschwindigkeits- und Reisezeitanalyse

Mastendynamik	
Ausfuehrung_Mastendynamik.m <i>BTS_dynamics_analysis_V02.m</i> <i>getUserToBTS.m</i>	Mastendynamik - Ermittlung relevanter BTS
Mastendynamik2_Tagesauswertung_beliebiges_Intervall.m	Mastendynamik - Auswertung
Grafische Aufbereitung	
in: Geschwindigkeit_Reisezeit.m <i>Make_Grafics.m</i>	diverse Scatterplots
Plot_TravelTime_Args.m <i>plotTravelTime.m</i>	Ganglinie der geschätzten Reisezeit
plot_contour_data.m <i>contourplot.m</i>	Geschwindigkeitscontourplot
plot_trajectories_arguments.m <i>plotTrajectories.m</i>	Einzeltrajektorienplot
<i>haeufigkeiten_traj_vs_area.m</i>	Häufigkeiten aller Events in Bereich vs. trajektorienauslösende
<i>correllations_plot.m</i>	Plot der Geschwindigkeitskorrelation
<i>v_graph_at_equivalent_waypoint.m</i>	Geschwindigkeitsganglinie an MQ-äquivalenten Streckenpunkt
Aktivitätsanalyse	
Incident_detection.m	Aktivitätsanalyse
plot_frequencies.m <i>exclusivEventFilter.m</i>	Plot der Aktivitäten
plot_frequencies_normiert.m	Aktivitätsanalyse -normiert
<i>plot_frequencies_normier_typenspezifischm</i>	Aktivitätsanalyse -normiert + eventspezifisch

Einmalige Skripte und wichtige Hilfsskripte

Suchen passender Keulenverbände und Errechnen des realen Basisstationsmittelpunktes
real_BTS_center.m <i>getGeometricConditions.m</i> <i>MidPoint.m</i> <i>orthodrom_intersection.m</i> <i>Distance_Angle_Calculation.m</i>
Auslesen_der_Keulen_punkte_V02.m <i>Koordinatentransformationsberechnungen²</i>
Auslesen_unsymmetrischer_Bedingungen.m <i>Koordinatentransformationsberechnungen²</i>
Basisstationsmittelpunkte_aus_Keulen <i>Koordinatentransformationsberechnungen²</i>
evaluate_distanzmatrix.m
matching_lobe_points_to_given_BTS.m

Auslesen und Filtern von Streckeninformationen aus OSM	
Roads_from_Osm.m	
Sensitivitätsanalyse bzgl. Geschwindigkeit/Reisezeit und der Verkehrsstärke	
Sensitivitätsanalyse.m <i>DeleteStationaryIDs_V02.m</i> <i>*gesamter Ablauf aus Geschwindigkeit/Reisezeit</i>	
split_sensitivitaet.m	
sensitivitaet_aw_ordnerweise.m	
boxplots_sensitivitaet.m	
Erstellen der Datei BTS_Info	
making_BTS_Infos.m <i>Koordinatentransformationsberechnungen²</i>	
Suche nach regionsübergreifende Ids	
UsersInArea_A_and_B.m	
² Funktionen der Koordinatentransformationsberechnungen	
MGI_Austria_GK_2_WGS84.m	
UTM_Austria_2_WGS84.m	
WGS84_2_MGI_Austria_GK.m	
WGS84_2_UTM_Austria.m	
cs2cs.m	Entspricht [SW03]
WGS84_2_GaussKruenger_alt.m	
PROJ4-Library	Dokumentation [Evdenden, 1995]