



MASTERARBEIT

Reisezeitberechnung und Störungserkennung mit Bluetooth-Kennungen

Verfasser:

Martin Margreiter

Betreuer:

**Dr.-Ing. Matthias Spangler (Lehrstuhl für Verkehrstechnik)
Christian Carstensen (ABD Nordbayern, Nürnberg)**

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG	1
1 EINLEITUNG	1
2 ALLGEMEINES ZU BLUETOOTH	3
2.1 Ursprung und Namensgebung	3
2.2 Der Bluetooth-Standard	3
2.3 Sendeleistung und Reichweite	4
2.4 Bluetooth-Stationsadresse	6
2.5 Verwendung zur Fahrzeug-Detektion	6
2.6 Vergleich mit der Erfassung durch Kameras	10
3 BERECHNUNG VON REISEZEITEN	14
3.1 Datengrundlage	14
3.1.1 Datentabelle STAGE_BT_DATEN / STAGE_BT_DATEN_HIST	14
3.1.2 Datentabelle MQ_WERT	17
3.1.3 Datentabelle MQ_LOCATION_KONFIG	18
3.1.4 Datentabelle LOCATION_CONFIG	19
3.2 Detektionsquoten	21
3.3 Berechnungs-Methodik	26
3.4 Herausforderungen und potentielle Fehlerquellen	29
3.4.1 Mehrfachdetektionen	30
3.4.2 Erkennung von Reisezeit-relevanten Bluetooth-Pärchen	31
3.4.3 Multiple Geräte in einem Fahrzeug	33
4 VALIDIERUNG DER REISEZEIT-DATEN	35
4.1 Mögliche Fehlerquellen in der Reisezeit-Berechnung	35
4.2 Unterschiedliche Verfahren der Filterung	36
4.2.1 Filter für niedrige Geschwindigkeiten	36
4.2.2 Filter anhand 24-Stunden-Mittelwert	38
4.2.3 Filter anhand Viertelstunden-Mittelwerten	41
4.2.4 Filter anhand beider Nachbarschaftswerte	43
4.3 Ergebnisse aus den Filterungs-Verfahren	47
5 AUTOMATISCHE ERKENNUNG VON STÖRUNGEN	49

5.1 Störungserkennung und sich daraus ergebende Vorteile	49
5.2 Verwendetes Verfahren.....	50
5.3 Problematik.....	54
6 ABGLEICH MIT DATEN VON LOKALEN MESSSTELLEN	55
6.1 Datengrundlage	55
6.2 Resultate	56
7 PROTOTYPISCHE UMSETZUNG MIT JAVA.....	59
8 TESTS ANHAND VON REALDATEN.....	62
8.1 Testgebiet und Testzeitraum	62
8.2 Datengrundlage	65
8.3 Ergebnisse	66
8.3.1 Auswertung für den 26.01.2010	66
8.3.2 Auswertung für den 23.06.2010	71
8.3.3 Auswertung für den 25.09.2009	74
GLOSSAR.....	78
QUELLENVERZEICHNIS	79
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	81
TABELLENVERZEICHNIS	83

KURZFASSUNG

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die verkehrstechnische Anwendung von Bluetooth-Technologie auf Autobahnen eingegangen. Mittels neben der Fahrbahn installierter Antennen können Bluetooth-Geräte in vorbeifahrenden Fahrzeugen erfasst und anhand ihrer weltweit eindeutigen Kennung wieder erkannt werden. Auf Grundlage dieser Detektionen, angewandt an mehreren Messquerschnitten im zu betrachtenden Verkehrsnetz, lassen sich repräsentative Reisezeiten auf den ausgewählten Routen ermitteln.

Eine der Zielsetzungen hierbei besteht darin, die vorliegenden Realdaten der Versuchsstrecken in Nordbayern für die anschließende Auswertung aufzubereiten. Hierzu werden die detektierten Reisezeiten auf ihre Plausibilität überprüft, um beispielsweise Fahrzeuge heraus zu filtern, die kurzzeitig die Autobahn an einer Raststätte oder Anschlussstelle verlassen haben und damit die Ergebnisse verfälschen würden.

Ein besonderes Augenmerk liegt auch auf der automatisierten Erkennung von Verkehrsstörungen auf Basis der ermittelten durchschnittlichen Geschwindigkeiten, die sich aus dem streckenbezogenen Kehrwert der Reisezeiten berechnen. Hierzu wird ein Verfahren vorgestellt, welches zwischen zwei Bluetooth-Empfängern Änderungen in der mittleren sowie auch der erreichbaren Maximalgeschwindigkeit identifiziert und damit Behinderungen im Verkehrsablauf erkennen kann.

Um die entwickelten Methoden an den vorliegenden Realdaten der Autobahndirektion Nordbayern zu testen, wurde prototypisch eine Java-Applikation entwickelt, die Bluetooth-Datensätze von beliebigen Teststrecken einlesen und verarbeiten kann. Zusätzlich erfolgt im Anschluss eine umfassende Auswertung der Ergebnisse in Diagrammen sowie Tabellen.

1 EINLEITUNG

Verkehr und Mobilität spielen in unserer heutigen Gesellschaft eine herausragende Rolle. Durch den stetig ansteigenden Automobilverkehr vor allem auf bundesdeutschen Autobahnen bei einem gleichzeitig annähernd konstant bleibenden Infrastruktur-Angebot in der Bundesrepublik rückt die optimale Ausnutzung des vorhandenen Straßennetzes zunehmend in den Vordergrund. Da Neubauten im Bereich der Automobil-Infrastruktur auch in Zukunft eher die Ausnahme bilden werden, wandert der Fokus mehr und mehr auf das Erhöhen sowie Ausschöpfen der maximalen Kapazität von bereits existierenden Straßen. Hierbei ist es die Aufgabe von Verkehrssteuerung und Verkehrsmanagement lokale Störungen und Engpässe rechtzeitig zu erkennen und deren negative Auswirkungen für das Verkehrsnetz sofern möglich direkt zu vermeiden oder zumindest in deren Intensität und Wirkungsradius einzuschränken.

Grundlage hierfür müssen detaillierte und aktuelle Daten über das momentane Verkehrsgeschehen sein, da nur damit effektiv auf drohende Kapazitätsreduktionen reagiert werden kann. Neben der mobilen Verkehrsüberwachung wie beispielsweise durch Hubschrauber, freiwillige Verkehrsmelder oder Floating Car Data (FCD) stehen hierbei vielerorts stationäre Messstellen zur Verfügung wie zum Beispiel Induktionsschleifen oder Verkehrskameras. Gemeinsam haben die meisten dieser aktuellen Systeme jedoch die teuren Anschaffungs- und Betriebskosten, die meist nicht flächendeckende und lückenlose Realisierbarkeit oder die komplizierte nachträgliche Installation in vorhandene Infrastruktur. Relativ neu in diesem Segment ist die Verwendung von Bluetooth-Empfängern, die aktivierte Bluetooth-Geräte an Bord von Fahrzeugen wiedererkennen sollen, um deren Reisezeiten zu ermitteln. Nach ersten Voruntersuchungen scheint diese Technologie erfolgsversprechend im Bereich der Reisezeitmessung auf Autobahnen. Im Folgenden soll näher auf die Verwendung von Bluetooth-Technik in der Verkehrsdatenerfassung eingegangen werden.

Die Datengrundlage für vorliegende Ausarbeitung bilden Bluetooth-Daten die seit 2009 auf mehrere Teststrecken im nordbayerischen Raum erhoben wurden und die von der Verkehrs- und Betriebszentrale (VBZ) der Autobahndirektion Nordbayern (ABDNB) in Fischbach bei Nürnberg zur Verfügung gestellt wurden. Ziel dieser Arbeit ist es die praktische Verwendbarkeit der vorhandenen detektierten Bluetooth-Kennungen zu untersuchen, sowie anhand einer prototypischen Auswerteprogrammierung in der Programmiersprache Java die vorläufigen Ergebnisse für die Reisezeitauswertung zu präsentieren.

In folgender Arbeit wird zu aller erst auf die Bluetooth-Technologie im Allgemeinen eingegangen, sowie deren Tauglichkeit zu Berechnung von Reisezeiten. Anschließend werden die hierbei durchgeführten Schritte zur Validierung und Filterung der

erfassten Datensätze näher erläutert, anhand derer die ermittelten Reisezeiten auf ihre Plausibilität und Repräsentativität für die weitere Evaluation durchleuchtet werden. Weiterhin wird das verwendete Verfahren zur automatischen Störungserkennung auf den Teststrecken näher erläutert, mit dem auf Basis von Veränderungen in den Reisezeiten Beeinträchtigungen im Verkehrsablauf detektiert werden. Nachfolgend wird die Überprüfung der verfügbaren Bluetooth-Daten mittels Abgleich zu ebenfalls vorhandenen Informationen von vor Ort fest installierten Induktionsschleifen zur Verkehrsmessung behandelt. Zum Schluss dieser Arbeit werden die Ergebnisse der Auswertungen mit Realdaten in einem definierten Testgebiet vorgestellt, die die Möglichkeiten dieses Systems näher beleuchten sollen.

2 ALLGEMEINES ZU BLUETOOTH

2.1 Ursprung und Namensgebung

Hinter der Bezeichnung Bluetooth verbirgt sich ein auf Funkwellen basierendes, kabelloses System zum Austausch von Daten, das vor allem für tragbare elektronische Geräte sowie Zubehörkomponenten verwendet wird. Seinen Ursprung hat Bluetooth in einer 1994 durchgeführten Studie des schwedischen Telekommunikationsunternehmens Ericsson zur Entwicklung eines kostengünstigen, energiesparenden und drahtlosen Übertragungssystems zwischen Mobiltelefonen und deren Zubehör [vgl. MERKLE 2002, S. 19] . Im Mai 1998 wurde von Ericsson zusammen mit Nokia, dem weltgrößten Hersteller von Mobiltelefonen aus Finnland, sowie den Unternehmen Intel, IBM und Toshiba, die sogenannte Bluetooth Special Interest Group (SIG) gegründet [vgl. LÜDERS 2007, S. 20] . Dieses Expertenforum forcierte unter den Zielen klein, preiswert und Low-Power-tauglich (für mobile Geräte mit Akkунutzung) die Entwicklung der Funkschnittstelle und deren Markteinführung [vgl. WOLLERT 2002, S. 18] . Innerhalb von etwa acht Jahren nach Gründung der SIG wurden, laut einer Pressemitteilung der Arbeitsgruppe, im Jahr 2006 [vgl. BLUETOOTHSIG 2006] bereits über eine Milliarde Geräte mit Bluetooth Technologie verkauft.

Die Bezeichnung Bluetooth ist eine Anspielung auf den historischen Hintergrund der Herkunftsländer der beiden skandinavischen Initiatoren des Standards: Ericsson und Nokia. Der Name geht zurück auf den nordischen Stammeskönig Harald Blaatand, Bluetooth der Zweite. In der Zeit von 950 bis 981 nach Christus war Harald der erste alleinige König über ganz Dänemark, welches er vorher durch seine Politik der Vereinigung geeint hatte. Ihm wird außerdem zugesprochen, durch seine Christianisierung von Dänemark und den skandinavischen Ländern die bis dato herrschenden Glaubenskriege beendet und dadurch im groben Sinne eine Harmonisierung und Vereinheitlichung vollzogen zu haben [vgl. WOLLERT 2002, S. 16] .

Bei der entwickelten Funktechnologie soll demnach durch den Namen Bluetooth auf die Harmonisierung und Vereinheitlichung unterschiedlicher Geräte und Gerätetypen auf einen gemeinsamen Datenübertragungs-Standard angespielt werden.

2.2 Der Bluetooth-Standard

Bluetooth ist, anders als viele andere gleichartige Funkstandards, ein offener Industriestandard. Dies bedeutet, dass die Verwendung der Technologie in dem dafür vorgesehenen Frequenzband gebührenfrei, lizenzfrei sowie für Jedermann verfügbar ist.

Die Benutzung erfordert keine offizielle Betriebsgenehmigung von internationalen oder nationalen Telekommunikations- und Regierungsbehörden [vgl. MULLER 2001, S. 35] . Dieser Status des offenen Standards hat bisher, und wird auch weiterhin in der Zukunft, die Verbreitung der Bluetooth-Technologie stark fördern [vgl. MERKLE 2002, S. 23] .

Das von Bluetooth benutzte, lizenzlose 2,4 GHz-ISM-Band ist für die kostenlose und freie Verwendung in den Bereichen Industrial, Scientific und Medical (ISM) vorgesehen [vgl. MERKLE 2002, S. 68] . Der zu verwendende Frequenzabschnitt hat eine Bandbreite von 83,5 MHz im Bereich von 2400 MHz bis 2483,5 MHz [vgl. WOLLERT 2002, S. 50] . Einen weiteren großen Vorteil bei der Verwendung dieser Frequenzen stellt dessen weltweite freie Verfügbarkeit – mit gewissen Einschränkungen in Frankreich – dar [vgl. MERKLE 2002, S. 68] .

2.3 Sendeleistung und Reichweite

Die verfügbaren Angaben für die maximal erzielbaren Übertragungsraten im Basisband des Bluetooth-Systems mit normalem Modulationsverfahren sind unterschiedlich, liegen jedoch alle im Bereich von etwa 720 Kilobit pro Sekunde, beziehungsweise 90 Kilobyte pro Sekunde: 720 kBit/sec [vgl. LÜDERS 2007, S. 237] , 721 kBit/sec [vgl. MERKLE 2002, S. 69] , 723,2 kBit/sec [vgl. MULLER 2001, S. 35] und 730 kBit/sec [vgl. WOLLERT 2002, S. 24] . Die Wellenlänge im 2,4 GHz-Frequenzband beträgt circa 12,5 cm [vgl. LÜDERS 2007, S. 232] .

In der Literatur geht man, je nach eingesetztem Leistungsverstärker, typischerweise von Reichweiten zwischen 10 Metern bei 0dBm-Modulen, und 100 Metern bei 20 dBm-Modulen, aus [vgl. WOLLERT 2002, S. 22] . Diese Werte werden jedoch als theoretische Werte bezeichnet, wobei in der Praxis, durch die erhöhte Empfängerempfindlichkeit aktueller Chipsätze, die Reichweiten wohl noch höher liegen [vgl. WOLLERT 2002, S. 36] . Je nach Sendeleistungsklasse des Chipsatzes werden in der Literatur unterschiedliche Ausgangsleistungen sowie maximal überbrückbare Entfernungen genannt:

Powerclass	P_{\max} output	P_{\min} output	Reichweite
1	100 mW (20 dBm)	1 mW (0 dBm)	100-300 m
2	2,5 mW (4 dBm)	0,25 mW (-6 dBm)	10-100 m
3	1 mW (0 dBm)	N/A	10-30 m

Tab. 2.1: Leistungsklassen [vgl. WOLLERT 2002, S. 52] , [vgl. MERKLE 2002, S. 89]

Bei einer um 20 dBm gesteigerten Empfängerempfindlichkeit bei Geräten der Sendeleistungsklasse 1 kann laut Literaturangaben unter Freiraumbedingungen und ohne Hindernisse eine Reichweite von bis zu 300 Meter erzielt werden [vgl. LÜDERS 2007, S. 255] .

Einschränkungen in der Reichweite sowie der Empfangsleistungen können, neben Hindernissen, auch durch andere Funknetze im selben 2,4 GHz-Band hervorgerufen werden. Mögliche weitere Netze die dieses lizenzfreie Band benützen wären exemplarisch [vgl. LÜDERS 2007, S. 253] :

- Andere Bluetooth-Netze
- Netze nach dem Standard IEEE 802.11 b/g (Wireless LAN)
- Netze nach dem Standard ZigBee (Anwendung hauptsächlich in der Gebäudeautomation und der industriellen Automatisierungstechnik)
- Spezielle Funksysteme wie drahtlose Videoübertragungssysteme oder Baby-Telefone
- Amateur-Funk
- Mikrowellenherde

Seit der Bluetooth-Version 1.2 aus dem Jahre 2003, wird zur Reduzierung der Störungsanfälligkeit ein spezielles Verfahren namens Adaptive Frequency Hopping verwendet. Alle mit dieser Version ausgestatteten Chipsätze wechseln jede Millisekunde die Übertragungsfrequenz und detektieren dabei auch Wellenbereiche, die über einen längeren Zeitraum von Störungen betroffen sind. Diese beeinträchtigten Segmente werden automatisch bei allen weiteren Frequenzwechslern gemieden [vgl. LÜDERS 2007, S. 253] .

Auf Grund dieser Methodik zur Vermeidung von Empfangsbeeinträchtigungen und dem Fehlen von potentiellen weiteren Störquellen – mit eventueller Ausnahme des Amateurfunks – sollte die Störanfälligkeit bei der Erfassung von Bluetooth-Kennungen auf Autobahnen nahezu vernachlässigbar sein. Eine denkbare weitere Fehlerquelle von anderen drahtlosen Datenübertragungssystemen wäre der unter LKW-Fahrern beliebte CB-Funk. Dieser operiert jedoch in einem anderen Frequenzband (circa 27 GHz) und spielt demnach keine Rolle bei der Beeinträchtigung der Bluetooth-Übertragungen. Auch die Kommunikation der On-Board-Units (OBU) in mautpflichtigen Lastkraftwägen mit den Toll Collect-Kontrollbrücken auf deutschen Autobahnen fällt als relevante Störquelle aus, da dort die Datenübertragungen via Infrarot-Technologie von Statten gehen.

Einen weiteren Einfluss auf die Empfangsreichweite von schnell fahrenden Objekten auf der Autobahn spielt das Meldeintervall der Bluetooth-Geräte. Laut Literaturangaben suchen Bluetooth-Module, die sich im Standby-Zustand befinden, nur alle 1,28

Sekunden nach möglichen anderen Bluetooth-Übertragungspartnern in der näheren Umgebung [vgl. MERKLE 2002, S. 69] . Ein Fahrzeug, welches sich beispielsweise mit einer Geschwindigkeit von 200 Kilometern pro Stunde fortbewegt, könnte in diesem Zeitraum bereits eine Strecke von über 70 Metern zurückgelegt haben, bis sich das Bluetooth-Gerät an Board erneut meldet.

2.4 Bluetooth-Stationsadresse

Jedes Bluetooth-Gerät verfügt über eine weltweit eindeutige und zweifelsfreie Identifikationsnummer, die sogenannte Bluetooth Device Address beziehungsweise Bluetooth Stationsadresse. Vergleichbar mit der MAC-Adresse (Media Access Control) bei Ethernetkarten, für den Zugriff auf das Local Area Network (LAN) bei Computern und anderen Multimediageräten, enthält jeder Chipsatz bei der Herstellung eine spezifische und einmalige Kennung. Für Bluetooth-Module besteht diese 48 Bit lange Adresse aus drei Teilen [vgl. MERKLE 2002, S. 124] :

- 24 Bit LAP (Lower Address Part)
- 8 Bit UAP (Upper Address Part)
- 16 Bit NAP (Nonsignificant Address Part)

Der untere Adressteil LAP enthält eine herstellerspezifische Identifikationsnummer, also den spezifischen Code des Unternehmens welches den Chipsatz erstellt und produziert hat. Dieser Teil hat eine Länge von 24 Bit [vgl. LÜDERS 2007, S. 231] . UAP bezeichnet den sogenannten oberen Adressteil der 48 Bit langen Stationsadresse. Mit 8 Bit ist dies das kleinste Nummernsegment. In diesem Bereich wird die firmeninterne laufende Produktnummer gespeichert, die dem Bluetooth-Gerät, zusammen mit dem Herstellercode aus dem LAP, eine weltweit einmalige Identifikationskennung verleiht [vgl. MERKLE 2002, S. 124] . Aus diesem Grunde stellen diese beiden Adressteile auch den sogenannten signifikanten Bereich der Stationsadresse dar. Durch die gemeinsame Länge von 32 Bit ergeben sich hierdurch 2^{32} , also über vier Milliarden, unterschiedliche Zahlen-Kombinationen. Die verbleibenden 16 Bit werden dem Nonsignificant Address Part (NAP) und damit dem sogenannten unbedeutenden Adressteil zugeordnet [vgl. WOLLERT 2002, S. 68] .

2.5 Verwendung zur Fahrzeug-Detektion

Die Verwendung von Bluetooth-Kennungen zur Detektion von Fahrzeugen auf Autobahnen, beziehungsweise im Verkehrsnetz allgemein, beruht auf der Annahme, dass sich ausreichend viele aktive Bluetooth-Module an Board der Fahrzeuge befinden,

um Aussagen bezüglich der Reisezeiten der Verkehrsteilnehmer und der verkehrlichen Situation auf der Fahrstrecke zu treffen.

Die inzwischen immense Verbreitung von Bluetooth-fähigen Geräten steht außer Frage. Obwohl die Technik erst im Jahre 1998 ihre eigentliche Markteinführung durch Bildung der Bluetooth SID-Arbeitsgruppe erhalten hat, wurden im Jahr 2004 bereits mehr als 150 Millionen Bluetooth-Module verkauft. Im darauffolgenden Jahr 2005 stieg die Anzahl an verkauften Geräten auf über 300 Millionen [vgl. LÜDERS 2007, S. 227] . Schon 2006 waren weltweit mehr als eine Milliarde Bluetooth-fähige Elektronikgeräte im Umlauf [vgl. BLUETOOTH SIG 2006] . Diese große Anzahl an Geräten an sich lässt jedoch noch keine Schlussfolgerung zu, ob und in wie weit sich deren Identifikationskennungen auch zur Reisezeitermittlung auf Autobahnen verwenden lassen. Hierzu stellen sich zwei wichtige Fragen:

- Wie viele Bluetooth-Geräte befinden sich tatsächlich an Bord der zu betrachtenden Fahrzeuge?
- Wie viele dieser Geräte haben ihre vorhandene Bluetooth-Technik auch aktiviert?

Um die erste Frage zu klären, folgt zuallererst eine exemplarische Liste des Großteils der in Frage kommenden elektronischen Geräte, die teilweise über eine Bluetooth-Schnittstelle verfügen:

- Notebooks
- Netbooks
- PDAs
- Smartphones
- Handys
- kabellose Head-Sets
- nachrüstbare Freisprecheinrichtungen
- separate GPS-Empfänger
- nachrüstbare Navigationscomputer
- Digitalkameras
- Camcorder
- Fahrzeuge mit Bluetooth-Vorbereitung

Inwieweit Insassen eines Fahrzeuges mobile Geräte mit Bluetooth-Funktionalität mitführen und zusätzlich deren Bluetooth-Modul auch noch aktiviert haben, lässt sich nur schwer ermitteln. Laut einer im Juni 2010 durchgeführten Untersuchung der

c.c.com Andersen & Moser GmbH im Auftrag der Autobahndirektion Nordbayern wurden auf einer Teststrecke im Großraum Nürnberg Reisezeitmessungen via Bluetooth-Kennungen erprobt. Die verwertbar erfassten Fahrzeuge mit aktiver Bluetooth-Technik stellen laut diesem Bericht einen Anteil von etwa 30 Prozent aller im gleichen Zeitraum durch lokale Messschleifen detektierten Verkehrsteilnehmer [vgl. WEINZERL 2010, S. 27] . Es wird angenommen, dass hierbei ein Großteil der erfassten Bluetooth-Geräte auf die inzwischen weit verbreitete Ausstattung von Neufahrzeugen mit Bluetooth-Vorbereitung zurückzuführen ist.

Eine Anfrage bei zehn der am stärksten vertretenen Automarken in Deutschland (VW, Opel, Mercedes, Ford, BMW/Mini, Audi, Renault/Dacia, Toyota/Lexus, Peugeot und Fiat) offenbarte, dass fast alle Hersteller Daten zur prozentualen Ausstattung ihrer Neufahrzeuge mit Bluetooth-Konnektivität nicht für veröffentlichungsfähig halten. Nur die beiden japanischen Produzenten Mazda und Toyota stellten Daten zur Verfügung. Nach Angaben der Toyota Deutschland GmbH wurden 60 bis 65 Prozent aller bisher in 2010 bestellten Neufahrzeuge mit Bluetooth-Technologie ausgeliefert [vgl. TOYOTA 2010] . Auch bei den aktuellen Modellen der Mazda Motors Deutschland GmbH verfügt ein ähnlicher Prozentsatz der Neuwagen über diese Ausstattung: Mazda5: 25%, Mazda6: 90%, Mazda CX-6: 99% sowie Mazda MX-5: 59% [vgl. MAZDA 2010] .

Es ist anzunehmen, dass vor allem im Mittelklasse- und Premium-Segment ein mindestens ebenso hoher Anteil aller neu produzierten Autos dementsprechend ausgerüstet wird. Doch auch im Niedrigpreissegment findet die Bluetooth-Technologie sicherlich eine große Verbreitung, nicht zuletzt auf Grund der immer günstiger werdenden Bluetooth-Module, die inzwischen für nur noch wenige Euro zu haben sind.

Zur Detektion von Fahrzeugen oder an Bord befindlichen Geräten mit Bluetooth-Konnektivität spielt die Sendeleistung der Module eine entscheidende Rolle. Die bereits vorab erwähnten Reichweiten von bis zu 300 Metern werden ausschließlich bei der Verbindung von Geräten der Sendeleistungsklasse 1 erreicht. Bei mobilen Bluetooth-Geräten wie Handys, deren Stromversorgung über Akkus gewährleistet wird, ist anzunehmen, dass auf Grund des weitaus geringeren Stromverbrauchs zumeist Chipsätze der Sendeleistungsklasse 3 verbaut werden [vgl. WOLLERT 2002, S. 51] . Bluetooth-Module der Klasse 1 verfügen über eine maximale Ausgangsleistung von 100 mW, die damit um den Faktor 100 höher liegt als die Sendeleistung der Klasse 3. Anwendungsgebiete sind hierbei hauptsächlich Geräte mit fester, gesicherter Stromversorgung, die nicht von einer meist geringen Akkukapazität abhängig sind. Die Bluetooth-Vorbereitung in Fahrzeugen sowie definitiv die aufzustellenden Empfangsstationen zur Messdatenerfassung dürfen demnach wohl dieser Leistungsklasse zugeordnet werden, deren Reichweite im Bereich von 100 Metern angegeben wird [vgl. WOLLERT 2002, S. 52] . Auf der Autobahn treten demzufolge wohl am häufigsten die Kombinationen der Sendeleistungsklassen 3 und 1 sowie 1 und 1 auf.

Die auf der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Teststrecke eingebauten Bluetooth-Messstationen enthalten neben einem gewöhnlichen, im Handel erhältlichen Bluetooth-Modul zusätzlich eine herkömmliche 2,4 GHz Standard-Stubantenne mit Rundstrahler in vertikaler Ausrichtung [vgl. WEINZERL 2010, S. 19]. Wird diese Empfangseinheit neben den Pannestreifen, beziehungsweise im Optimalfall direkt zwischen den beiden Richtungsfahrbahnen platziert, ist die in der Literatur zu findende Reichweite von etwa 100 Metern weitaus ausreichend um alle Fahrstreifen abzudecken. Nichts desto trotz scheint die Platzierung einen Einfluss auf die Qualität der Messresultate zu haben. So zeigt sich bei den durch die c.c.com Andersen & Moser GmbH durchgeführten Untersuchungen, sowie auch bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten eigenen Auswertungen, eine Diskrepanz in den Detektionsquoten der beiden Richtungsfahrbahnen. Auf der Teststrecke auf der Bundesautobahn A7 zwischen Würzburg und Ulm wurde das Bluetooth-Empfangsgerät westlich der Autobahn platziert, also neben der Fahrbahn Fahrtrichtung Süden nach Ulm. Die Detektionsquoten von Bluetooth-Pärchen auf der näheren Fahrbahn in Fahrtrichtung Süden lagen in den beiden Auswertungszeiträumen bei 32 und 18 Prozent. Im selben Zeitraum wurden auf der, in Bezug auf die Messstation weiter entfernten, Fahrbahn Richtung Norden nur 29 und 14 Prozent Bluetooth-Pärchen im Verhältnis zum Gesamtverkehrsaufkommen erfasst.

Auch bei der für diese Ausarbeitung durchgeführten Datenanalyse wurden exemplarische Detektionsquoten für denselben Streckenabschnitt erfasst:

Zeitraum der Messdaten	Detektionsquoten		Diskrepanz
	Fahrtrichtung Süden (näherer Fahrstreifen)	Fahrtrichtung Norden (entfernter Fahrstreifen)	
21.01.2010	21	17	4
22.01.2010	25	18	7
23.01.2010	19	10	9
24.01.2010	11	8	3
25.01.2010	30	22	8
26.01.2010	33	30	3
27.01.2010	26	23	3
28.01.2010	16	10	6
21.06.2010	48	42	6
22.06.2010	50	49	1
23.06.2010	49	48	1
24.06.2010	44	45	-1

Tab. 2.2: Vergleich der Detektionsquoten auf den beiden Richtungsfahrbahnen

Auch hier erkennt man bei allen Auswertungen einen Unterschied in der Quote der erkannten Bluetooth-Pärchen je nach Entfernung des überprüften Fahrstreifens zur Detektionseinheit.

Bedenken bei der Detektion bei hohen Fahrtgeschwindigkeiten scheinen ebenfalls unbegründet, da mittels der Bluetooth-Empfänger auch Reisezeiten über 200 km/h ermittelt wurden. Nach einer bereits durchgeführten Voruntersuchung der Technischen Universität München gleichen sich die ermittelten Durchschnittsgeschwindigkeiten der Bluetooth-Empfänger und der Induktionsschleifen so weit, dass von einer Erfassung aller Geschwindigkeitsbereiche durch die Bluetooth-Technologie auszugehen ist [vgl. SPANGLER1 2010, S. 9] .

2.6 Vergleich mit der Erfassung durch Kameras

Eine alternative Lösung zur Erfassung von Fahrzeugstichproben mittels Detektion und Wiedererkennung an Bord befindlicher Bluetooth-Technologie stellt die automatisierte Kennzeichenerfassung dar. Bei diesem, auch als Automatic Number Plate Recognition (ANPR) bezeichneten, System werden mittels einer Kamera auf Infrarotlicht-Basis Kennzeichen meist aus der Frontalen als Bilder erfasst und mittels eines Bildverarbeitungs-Algorithmus erkannt [vgl. RECKER 2008, S. 9] . Im Vergleich zur

Detektion durch Bluetooth-Empfänger stellen sich einige mögliche Vor- sowie auch Nachteile dar.

Positiv an der Kennzeichenerfassung sind die vergleichsweise hohen Detektionsquoten. So konnten in einer Untersuchung des Lehrstuhls für Verkehrstechnik der Technischen Universität München im Jahr 2008 durchschnittliche Erfassungsraten zwischen 85 und 100 Prozent erzielt werden [vgl. RECKER 2008, S. 27]. Dies stellt die Detektionsquoten mit aktuellen Bluetooth-Empfängern mit etwa 30 bis 40 Prozent [vgl. WEINZERL 2010, S. 7] in den Schatten. Werte im Bereich von 100 Prozent scheinen beim Bluetooth-Verfahren fast unmöglich, da nicht angenommen werden kann, dass auch in Zukunft ein solch hoher Prozentsatz an Fahrzeugen über etwaige aktive Bluetooth-Geräte an Bord verfügt.

Vorteile der Kennzeichendetektion sind weiterhin die zusätzlichen Daten, die dadurch gewonnen und für diverse weitere Analysen verwendet werden könnten. Während bei der Bluetooth-Detektion an einer einzelnen Station an sich weder Informationen über die Fahrzeugart noch die gewählte Fahrspur oder Fahrtrichtung erfasst werden können, existieren bei Kameras hierfür weitreichende Möglichkeiten. Durch die explizite Zuordnung einer Kamera zu einer speziellen Fahrspur stellt die Ermittlung von Spur und Richtung keine weiteren Probleme dar. Auch eine Erkennung des Fahrzeugtyps (beispielsweise LKW, PKW oder Bus) über die Identifikation der unterschiedlichen Fahrzeugkonturen wäre denkbar.

Neben diesen Vorteilen lassen sich jedoch auch einige potentielle Nachteile der automatisierten Kennzeichenerfassung gegenüber der hier behandelten Detektion von Fahrzeugen über ihre Bluetooth-Kennung identifizieren. Am eindeutigsten ist hierbei die aufwendige und teure Konzeption und Installation eines solchen Systems. Neben jeweils einer separaten Kamera pro zu überwachendem Fahrstreifen in jeder Fahrtrichtung wird zusätzlich noch eine lokale Rechneinheit für den Bildverarbeitungs-Algorithmus erforderlich. Auch wird für die Montage der einzelnen Kameraeinheiten eine vorhandene Straßenbrücke beziehungsweise eine Kontroll- oder Schilderbrücke – die in einigen Fällen eventuell erst konstruiert werden muss – benötigt, um die vorteilhafte frontale Überkopf-Detektion der Fahrzeuge zu gewährleisten. Die Kameras müssen hierzu einzeln und manuell von kundigem Fachpersonal eingestellt und justiert werden, um einen optimalen Blickwinkel auf die Kennzeichen der passierenden Fahrzeuge zu gewährleisten [vgl. RECKER 2008, S. 10]. Die Installation eines Bluetooth-Empfängers im Vergleich dazu, erfordert im Vergleich dazu weitaus geringere finanzielle und zeitintensive Aufwendungen, da nur ein Gerät für einen gesamten Querschnitt benötigt wird, dessen Positionierung keinen größeren Anforderungen genügen muss und für den keine aufwändigen Installationen, lokalen Rechneinheiten oder komplexe Bildverarbeitungssoftware von Nöten sind. Ein solches Empfänger-Gerät besteht meist nur aus einer simplen Stab-Antenne sowie einem handelsüblichen Bluetooth-Modul, das neben einer minimalen Stromversorgung und einem

GPRS-Sender zur Übermittlung der Messdaten keinerlei weitere Komponenten benötigt.

Eine Problematik, die beiderlei Systeme betrifft, stellt der Datenschutz bei der Erfassung der Fahrzeuge dar. Zur Bluetooth-Variante lässt sich hierbei sagen, dass mit der Ermittlung der Geräte-Identifikationsnummern keine allzu sensiblen Daten erhoben werden, da sich die Kennungen nach aktuellem Wissensstand nicht ohne weiteres einer spezifischen Person zuordnen lassen. Ebenso besteht die Möglichkeit, die Kennungen, direkt nach deren Erfassung vor Ort, mittels einer kryptologischen Hashfunktion irreversibel zu verschlüsseln und erst im Anschluss an die Verkehrsrechenzentrale weiterzuleiten. Komplexer stellt sich diese Thematik bei der Erfassung von Kennzeichen dar. Da bei den Straßenverkehrsbehörden jedes Kennzeichen zum Fahrzeughalter in Verbindung gebracht werden kann, handelt es sich hierbei um einen äußerst sensiblen Bereich des Datenschutzes. Die aktuelle Rechtslage zur automatischen Kennzeichenerfassung, vor allem durch die Forderung der staatlichen Exekutivorgane nach Zugriff auf diese Daten, ist kompliziert und noch nicht in endgültiger Fassung geklärt. Es existieren bereits einige Urteile diesbezüglich, wie beispielsweise die Entscheidung des Ersten Senats des Deutschen Bundesverfassungsgerichts vom 11. März 2008, der unter anderem festlegt, dass „die automatisierte Erfassung von Kraftfahrzeugkennzeichen nicht anlasslos erfolgen oder flächendeckend durchgeführt werden darf“ [vgl. BVERFG 2008] , jedoch wiederum mit der Ausnahme, dass „die stichprobenhafte Durchführung einer solchen Maßnahme gegebenenfalls zu Eingriffen von lediglich geringerer Intensität zulässig sein kann“ [vgl. BVERFG 2008] . Obwohl selbstverständlich auch bei der Übertragung der Kamera-Daten eine nicht wieder rückgängig zu machende Verschlüsselung angewandt werden kann, ist diese datenschutzrechtliche Problematik noch nicht endgültig geklärt.

Weitere Untersuchungen zur Verwendung beider Systeme sind im Bereich der Witterungseinflüsse von Nöten. Obwohl die Bluetooth-Geräte ausschließlich im 2,4 GHz-Frequenzband operieren, wäre eine Beeinflussung durch starken Regen oder Schneefall denkbar, beziehungsweise durch reflektierende Wasser-, Eis- und Schneeflächen, die das Übertragungsverhalten in Abhängigkeit von Witterung und Jahreszeit beeinträchtigen könnten. Auch bei der automatisierten Kennzeichenerfassung scheint die Witterung einen Einfluss auf die Detektionsquoten zu haben [vgl. RECKER 2008, S. 23] . So wurden im Rahmen der Untersuchung durch die Technische Universität München 2008 zwei unterschiedliche Fahrzeug-Detektionen auf Autobahnen durchgeführt, bei denen ein störender Einfluss des Wetters vermutet wurde:

- Autobahn A 8 [vgl. RECKER 2008, S. 17] :
 - Wetterlage: wechselhaft, bewölkt, mit kurzen Schauern

- Geschwindigkeitsbegrenzung: unbeschränkt
- Detektionsrate: 57 Prozent
- Autobahn A 9 [vgl. RECKER 2008, S. 20] :
 - Wetterlage: trocken, bedeckt
 - Geschwindigkeitsbegrenzung: 80 km/h
 - Detektionsrate: 97 Prozent

Ob die gravierenden Unterschiede in den Detektionsquoten allein auf die schlechtere Witterung zurückzuführen sind oder aber auch auf die höheren Geschwindigkeiten, die eine erfolgreiche Kennzeichen-Erfassung möglicherweise zusätzlich erschweren, bleibt jedoch auch im Resultat der von der Universität durchgeführten Expertise ungeklärt.

3 BERECHNUNG VON REISEZEITEN

3.1 Datengrundlage

Die Datengrundlage für vorliegende Arbeit bildet die Verkehrsdatenbank der Verkehrs- und Betriebszentrale (VBZ) der Autobahndirektion Nordbayern (ABDNB) in Fischbach bei Nürnberg. In dieser auf Oracle basierenden Datenbank finden sich alle relevanten Informationen der Messstellen im Autobahnnetz des nordbayerischen Raums. Für vorliegende Arbeit wurden hierbei zwei unterschiedliche Datensätze verwendet:

Daten der Bluetooth-Messstationen in den Datentabellen:

- Datenbank: ABDNB, Benutzer: VRZMQ, Tabelle: STAGE_BT_DATEN
- Datenbank: ABDNB, Benutzer: VRZMQ, Tabelle: STABE_BT_DATEN_HIST

Daten der Fahrbahn-integrierten Messschleifen in den Datentabellen:

- Datenbank: ABDNB, Benutzer: VRZMQ, Tabelle: MQ_WERT

Zusätzlich dazu wurden zwei Tabellen zur Verknüpfung der Identifikationsnummern der Messschleifen mit den tatsächlichen Positionen in der vorhandenen Verkehrsinfrastruktur benutzt:

- Datenbank: ABDNB, Benutzer: VRZMQ, Tabelle: MQ_LOCATION_KONFIG
- Datenbank: ABDNB, Benutzer: VRZMQ, Tabelle: LOCATION_KONFIG

3.1.1 Datentabelle STAGE_BT_DATEN / STAGE_BT_DATEN_HIST

In der Datentabelle STAGE_BT_DATEN, ebenso wie in der Archivtabelle STAGE_BT_DATEN_HIST für ältere Datensätze, werden alle Detektionen von Bluetooth-Kennungen für alle installierten Messquerschnitte rund um die Uhr gespeichert. Für diese Arbeit relevante Informationen zur Auswertung der Reisezeit finden sich in den Tabellenspalten drei, vier und sechs. In der nachfolgenden, erklärenden Tabelle über das Erscheinungsbild und den Umfang der einzelnen Datensätze zu den erfassten Bluetooth-Kennungen wurden die verwendeten Elemente unterstrichen dargestellt:

Spaltenbezeichnung	Inhaltsdefinition	Beispielwert
STAGE_BT_DATEN_ID	NUMBER(10,0)	11072719
DATUM	DATE	27.04.10
<u>UNIXZEIT</u>	<u>NUMBER(10,0)</u>	<u>1272355174</u>
<u>BD_ADDR</u>	<u>VARCHAR2(50 BYTE)</u>	<u>00:13:E0:0E:7E:A2</u>
COD	VARCHAR2(6 BYTE)	520204
<u>MESSPUNKT</u>	<u>VARCHAR2(2 BYTE)</u>	<u>H</u>
UPLOAD_TIMESTAMP	DATE	27.04.10
STAGE_IMPORT_STATUS_ID	NUMBER(3,0)	102
BT_DATEIDATUM	DATE	27.04.10
FTP_IMPORTDATUM	DATE	27.04.10
DB_IMPORTDATUM	DATE	27.04.10
VBZ_DATUM	DATE	27.04.10

Tab. 3.1: Datentabelle STAGE_BT_DATEN / STAGE_BT_DATEN_HIST

Hinter der Spalte mit der Bezeichnung Unixzeit verbirgt sich der eindeutige Zeitstempel der erfolgreichen Detektion. Diese in der Informationstechnologie übliche Darstellungsform für ein Datums- und Zeit-Format gibt die Anzahl der verstrichenen Sekunden seit dem 1. Januar 1970 um 00:00 Uhr UTC (Universal Time Coordinated) Koordinierte Weltzeit wieder. Laut Inhaltsdefinition enthält diese Spalte Nummern mit jeweils zehn 10 Stellen vor dem Dezimaltrennzeichen, sowie keine Nachkommazahlen. Der in der Tabelle angegebene Musterwert 1272355174 steht zum Beispiel in der mitteleuropäischen Zeitzone UTC+1 für den 27. April 2010 09:59:34 Uhr.

Die Spalte BD_ADDR stellt in einer maximal 50-stelligen hexadezimalen Zahl (0 bis F) die Bluetooth Stationsadresse des detektierten Bluetooth-Chipsatzes dar. Diese weltweit einmalige Zeichenfolge dient zur eindeutigen Identifizierung des Geräts. Ein Großteil der Datensätze beinhaltet diese originale Adresse in einer 12-stelligen Hexadezimalzahl mit allen Ziffern jeweils in Zweierpärchen getrennt durch einen Doppelpunkt. In einigen Datensätzen neueren Datums tauchen zusätzlich bei einzelnen Messstationen – wahrscheinlich Empfängern neuerer Generation – verschlüsselte Stationsadressen der detektierten Bluetooth-Module auf. Um für die Software-Implementierung eine äquivalente Datenbasis zu erhalten, wurden von diesem ebenfalls hexadezimalen 40-stelligen Zahlencode nur die ersten 12 Stellen als Vergleichswerte herangezogen. Eine solch abgeschnittene 12-stellige Hexadezimalzahl bietet immer noch 281.474.976.710.655 mögliche Zahlenkombinationen und sollte

demnach ausreichen, um für die Bluetooth-Kennung auch im verkürzten Zustand eine eindeutige Zuordnung der sich dahinter verbergende Geräte zu gewährleisten.

Als dritte maßgebliche Information aus der vorhandenen Datentabelle wird die alphabetische Bezeichnung des Messpunktes (auch bezeichnet als BT_STATION) ausgelesen, welcher die Detektion der Bluetooth-Kennung zu dem gegebenen Zeitpunkt durchgeführt hat. Folgende installierte Messstellen waren zum Zeitpunkt der Auswertung der Daten bekannt:

Station	Bezeichnung	Straße	Position	Messstart	Messende
A	AS Alfeld	A 6	km 820,101	03.09.09 15:04:53	24.03.10 08:56:38
B	AS Nürnberg-Langwasser	A 6	km 791,678	03.09.09 15:04:48	25.04.10 12:25:01
C	AS Neuendettelsau	A 6	km 759,701	03.09.09 15:05:03	25.04.10 12:59:59
D	AS Kitzingen	A 7	km 672,051	03.09.09 15:05:22	25.04.10 12:23:37
E	PWC Wolfsgraben	A 7	km 677,600	21.01.10 09:18:52	28.01.10 09:18:59
F	AK Nürnberg-Ost	A 6	km 793,070	28.01.10 12:33:39	26.02.10 09:49:57
G	Notrufsäule Parkplatz Brunn AS Nürnberg-Fischbach	A 9	km 377,694	26.02.10 09:50:45	23.03.10 10:00:53
H	Notrufsäule Nähe AK Biebelried	A 3	km 303,500	15.03.10 11:13:06	14.04.10 08:34:18
I	Messstelle Nähe AK Feuchtwan- gen/Crailsheim	A 7	km 740,051	24.03.10 12:07:06	25.04.10 12:25:22
J	Messstelle A9 Nähe AK Nürnberg- Ost	A 9	km 380,459	31.03.10 09:34:20	06.04.10 12:27:04

Tab. 3.2: Liste der Bluetooth-Messstationen und deren Bezeichnung

3.1.2 Datentabelle MQ_WERT

Zur Validierung und Kontrolle der Daten der Bluetooth-Detektoren wurden zusätzlich Daten von bereits über längere Zeit fest installierten Messschleifen herangezogen. Als Grundlage dienten hier die Datensätze der Datentabelle MQ_WERT, die ausschnittsweise aus folgenden Spalten besteht, die im Umfang dieser Arbeit für die weiteren Auswertungen verwendet wurden:

Spaltenbezeichnung	Inhaltsdefinition	Beispielwert
<u>MQ_ID</u>	<u>NUMBER(10,0)</u>	<u>93</u>
DATUM	DATE	23.04.08
<u>DATUM_MINUTE</u>	<u>NUMBER(10,0)</u>	<u>1208941320</u>
LAUF_ID	NUMBER(10,0)	-1
ERSTELLT_AM	DATE	20.05.08
QKFZ_WERT	NUMBER(10,0)	2340
QPKW_WERT	NUMBER(10,0)	1860
QLKW_WERT	NUMBER(10,0)	480
VKFZ_WERT	NUMBER(10,0)	101
<u>VPKW_WERT</u>	<u>NUMBER(10,0)</u>	<u>110</u>
<u>VLKW_WERT</u>	<u>NUMBER(10,0)</u>	<u>65</u>
VKFZG_WERT	NUMBER(10,0)	103
VPKWG_WERT	NUMBER(10,0)	0
VLKWG_WERT	NUMBER(10,0)	0
SKFZ_WERT	NUMBER(10,0)	14
SPKW_WERT	NUMBER(10,0)	0
SLKW_WERT	NUMBER(10,0)	0
KKFZ_WERT	NUMBER(10,0)	23
<u>KPKW_WERT</u>	<u>NUMBER(10,0)</u>	<u>17</u>
<u>KLKW_WERT</u>	<u>NUMBER(10,0)</u>	<u>7</u>
ALKW_WERT	NUMBER(10,0)	21

Tab. 3.3: Datentabelle MQ_WERT

Aus der recht umfangreichen Tabelle der Messschleifen wurden folgende Werte ausgelesen:

- MQ_ID
- DATUM_MINUTE
- VPKW_WERT
- VLKW_WERT
- KPKW_WERT
- KLKW_WERT

Die Messquerschnitt-Identifikationsnummer MQ_ID ist eine vierstellige eindeutige Nummer, deren Zuordnung und Bedeutung in den später erklärten Datentabellen MQ_LOCATION_KONFIG sowie LOCATION_KONFIG näher erläutert wird. Sie stellt die Bezeichnung der Messschleife dar, für die die vorliegenden Datensatz-Werte übermittelt wurden.

Trotz etwas anderslautender Bezeichnung stellt die Spalte DATUM_MINUTE wiederum die, aus der Tabelle für die Bluetooth-Messergebnisse bereits bekannte, Unixzeit in Sekunden dar. Die Bezeichnung Minute rührt offensichtlich daher, dass die vorhandenen Datensätze jeweils in Schritten zu je einer Minute die Daten der Messschleifen erfassen. Die Unixzeit in der vorhandenen Datentabelle wird dementsprechend jeweils um 60 Sekunden im Vergleich zur vorherigen Datenerhebung weitergezählt.

In den Spalten VPKW_WERT sowie VLKW_WERT finden sich die gemittelten Geschwindigkeiten von Personenkraftwagen sowie Lastkraftwagen, sofern Fahrzeuge dieser Kategorie im Messzeitraum vorhanden waren. Der Messzeitraum umfasst, wie bereits vorab erwähnt, 60 Sekunden. Die Einheit der Geschwindigkeiten ist Kilometer pro Stunde.

Als weitere Informationen werden die gemessenen Quantitäten der beiden zu unterscheidenden Fahrzeugkategorien erfasst. Unter den Einträgen KPKW_WERT sowie KLKW_WERT enthält die Tabelle die jeweilige Anzahl an detektierten Fahrzeugen während einer Minute. Auf das zusätzliche Einlesen der kombinierten Kfz-Werte wurde im Rahmen der Softwareimplementierung verzichtet, da teilweise gewisse Diskrepanzen zwischen Summenwert und der Summe der Einzelwerte – wie auch bei dem Beispieldatensatz erkennbar – vorhanden sind.

3.1.3 Datentabelle MQ_LOCATION_KONFIG

MQ_LOCATION_KONFIG stellt eine einfache Datentabelle dar, die die Zuordnung der MQ_ID von Messschleifen im Zuständigkeitsbereich der Autobahndirektion Nordbay-

ern beinhaltet. Jeder der vierstelligen MQ_IDs wird hierbei eine ebenfalls vierstellige LOCATION_KONFIG_ID zugeordnet. Die Funktion der LOCATION_KONFIG_ID wird im weiteren Verlauf noch näher definiert. Im Groben lässt sich über diese Nummer die exakte Position der Messschleife im Autobahnnetz bestimmen.

Die Datentabelle umfasst lediglich zwei Spalten, da sie nur zur Zuordnung der beiden Identifikationsnummern dient. Insgesamt sind in der Datenbank 616 Verknüpfungseinträge vorhanden. Exemplarisch sind im Folgenden einige im Zuge dieser Arbeit verwendete Messstellen aus der Datenliste dargestellt:

LOCATION_CONFIG_ID	MQ_ID
1676	299
1701	300
1804	242
1811	301
1841	247
1911	309
1912	243
1972	240
2000	245
2018	246
2027	241
2031	310
2051	302
2062	244

Tab. 3.4: Datentabelle MQ_LOCATION_CONFIG

3.1.4 Datentabelle LOCATION_CONFIG

Die zugeordnete LOCATION_CONFIG_ID lässt sich nun anhand einer weiteren Tabelle, der LOCATION_CONFIG, einer konkreten Position im Autobahnnetz zuordnen. In dieser Liste sind zu insgesamt 3497 IDs genauere Informationen gespeichert. Im Detail stellt sich diese Tabelle wie folgt dar:

Spaltenbezeichnung	Inhaltsdefinition	Beispielwert
<u>LOCATION_KONFIG_ID</u>	<u>NUMBER(10,0)</u>	<u>1975</u>
<u>BEZEICHNUNG</u>	<u>VARCHAR2(250 BYTE)</u>	<u>HFS A9 SW 379.9</u>
LOCATION_ID	NUMBER(5,0)	12752
<u>STRASSE_ID</u>	<u>NUMBER(10,0)</u>	<u>9</u>
<u>RICHTUNG_ID</u>	<u>NUMBER(5,0)</u>	<u>2</u>
<u>POSITION_KM_PHYS</u>	<u>NUMBER(7,3)</u>	<u>379.9</u>
MQ_TYP_ID	NUMBER(3,0)	1
KNOTENNR	NUMBER(10,0)	3264530
ABDS_KNOTENNR	NUMBER(10,0)	(null)
ABDS_HEX	VARCHAR2(10 BYTE)	(null)
GEO_OBJEKT_ID	NUMBER(10,0)	1410
LOCATION_TYP_ID	VARCHAR2(10 BYTE)	(null)
<u>KOMMENTAR</u>	<u>VARCHAR2(250 BYTE)</u>	<u>AS Fischbach</u>
IB	NUMBER(3,0)	217
SM	NUMBER(3,0)	7
FG	NUMBER(3,0)	1
DE_KANAL	NUMBER(3,0)	33
ERSTELLT_AM	DATE	(null)

Tab. 3.5: Datentabelle LOCATION_KONFIG

Als interessant für die weitere Auswertung im Rahmen dieser Arbeit werden, neben der zur Zuordnung notwendigen LOCATION_KONFIG_ID, folgende Felder gesehen:

- BEZEICHNUNG
- STRASSE_ID
- RICHTUNG_ID
- POSITION_KM_PHYS
- KOMMENTAR

In die Bezeichnung fließt, neben der Angabe des Fahrstreifens, auch der Name der Autobahn, die Fahrtrichtung in Himmelsrichtung sowie die Kilometrierung ein. Obwohl in der Liste unterschiedliche Abkürzungen für die verschiedenen Fahrstreifen

auftauchen, wie beispielsweise UEFS1 oder Rechts, werden, laut Angabe der Autobahndirektion Nordbayern, alle Messwerte für alle Fahrstreifen einer Richtung allein unter dem Akronym HFS zusammengefasst. Zu den betreffenden LOCATION_KONFIG_IDS mit anderslautenden Abkürzungen für die Fahrstreifen finden sich diesbezüglich auch keine Zuordnungen zu einer MQ_ID in der Tabelle MQ_LOCATION_KONFIG.

Als STRASSE_ID wird die numerische Bezeichnung der Autobahn im Netz der Bundesautobahnen in Deutschland verstanden. Sie taucht ebenfalls, ergänzt durch das Präfix A für Autobahn, in der Spalte BEZEICHNUNG auf.

Der Inhalt der fünften Spalte gibt die Fahrrichtung an, für welche die Messschleife Daten liefert. Mögliche Werte sind 1 beziehungsweise 2. Auf der hier ausgewerteten Teststrecke auf der A 7 zwischen der Anschlussstelle Kitzingen und der Park- und WC-Anlage Wolfsgraben steht eine 1 für die Fahrrichtung Nord-Ost, also in Richtung Würzburg, während der Wert 2 die Richtungsfahrbahn Süd-West nach Ulm bezeichnet.

POSITION_KM_PHYS bestimmt den Messquerschnitt in seiner Lage auf der Autobahn durch seine Kilometrierung. Als Beispiel sei hier wiederum die Bundesautobahn A 7 zwischen Würzburg und Ulm genannt. Die Kilometrierung beginnt auf der A 7 am deutsch-dänischen Grenzübergang in Ellund mit dem Kilometer 0,0, nimmt also nach Süden kommend zu. Von den beiden näher betrachteten Bluetooth-Messstationen steht beispielsweise der Empfänger an der nördlicheren Anschlussstelle Kitzingen bei Kilometer 672,051. Die südlich gelegene Station an der Park- und WC-Anlage Wolfsbrunn liegt bei 677,600 Kilometern.

Im Kommentar jedes Datensatzes sind die offiziellen Bezeichnungen von Weg- und Ortsmarken der näheren Umgebung zu dem jeweiligen Messquerschnitt angegeben.

3.2 Detektionsquoten

Als Detektionsquote wird das Verhältnis von brauchbaren Detektionen durch die Bluetooth-Empfängerstationen zur Gesamtanzahl an Fahrzeugen – meist aus Daten der Induktionsschleifen – auf dem vorgegebenen Messquerschnitt bezeichnet.

Hierbei ist zu beachten, dass Messschleifen nur richtungsbezogen Fahrzeuge erfassen, wohingegen sich aus der Detektion einer Bluetooth-Kennung durch ein einzelnes Bluetooth-Empfängergerät keine Fahrtrichtung des Fahrzeugs ableiten lässt. Zur Korrektur wird die Anzahl an erfassten Kfz anhand ihrer Bluetooth-ID pauschal mit dem Faktor 0,5 multipliziert, um eine ungefähre Aufteilung in die jeweiligen Fahrtrichtungen zu erreichen. Diese Pauschalisierung beruht auf der Annahme, dass sich innerhalb eines vollen Tages der Verkehr quantitativ auf beiden Richtungsfahrbahnen die Waage hält. Ausnahmen könnten hierbei natürlich besondere Ereignisse darstel-

len, die zu einer ungleichen Verteilung des Verkehrs in den beiden Richtungen führt, wie beispielsweise Ferienbeginn und -ende, sowie Sperrungen oder Unfälle, die nur eine Richtung betreffen und deshalb zu größerem Ausweichverkehr führen. Da dies auf der gewählten Teststrecke in beiden Auswertezwischenräumen nicht der Fall war, wurde vereinfachend nur das bereits erwähnte gleichmäßige Aufteilungsverfahren auf die Testdaten angewandt.

Zur Verbesserung der richtungsabhängigen Verkehrsaufteilung zur Bestimmung der Detektionsquoten wäre für weitere Versuche folgende Methode eine mögliche Anwendung: Sollte der untersuchte Querschnitt auf beiden Richtungsfahrbahnen gleichermaßen Induktionsschleifen zur Verkehrsmessung besitzen, könnte deren Verhältnis in der Anzahl der letztstündig detektierten Fahrzeuge ermittelt werden. Anhand dieser Quote könnte nun ebenfalls die Gesamtanzahl an erfassten Bluetooth-Kennungen auf diesem Messquerschnitt auf die beiden Richtungen umgelegt werden.

Zur Ermittlung der Detektionsquoten ist der Begriff der Mehrfachdetektionen von Bedeutung. Mehrfachdetektionen entstehen in Abhängigkeit der Fortbewegungsgeschwindigkeit des Fahrzeugs mit dem zu detektierenden Bluetooth-Gerät an Board, sowie der Detektionsreichweite, die sich aus der Sendeleistung des Geräts sowie der Empfangsleistung der Messstation ergibt. Bei langsam fahrenden Kfz mit hoher Sendeleistungsklasse besteht die Möglichkeit, dass ein und dieselbe Bluetooth-Kennung mehrfach erfasst wird. Diese Mehrfacherkennungen müssen im Zuge der Datenaufbereitung identifiziert und entfernt werden.

Die aus der Subtraktion der Mehrfachdetektionen von der Gesamtanzahl der erfassten Bluetooth-Geräte entstehende Summe an Bluetooth-Geräten wird im weiteren Verlauf dieser Ausarbeitung als Anzahl an Einzeldetektionen bezeichnet.

Die Detektionsquote einer Bluetooth-Empfängerstation ermittelt sich also nach folgender Formel:

$$D_A = \frac{f_{AB} \cdot n_{BT}(A)_{single}}{n_M(A)_{AB}} \cdot 100\%$$

mit D_A = Detektionsquote Bluetooth-Station am Messquerschnitt A [%]

f_{AB} = Gewichtungsfaktor für Fahrtrichtung von A nach B [-] (hier:0,5)

$n_{BT}(A)_{single}$ = Anzahl Einzeldetektionen der Bluetooth-Station bei A [Fz]

$n_M(A)_{AB}$ = Detektionen der Messschleife bei A in Richtung A nach B [Fz]

Eine weitere, fast noch als wichtiger zu betrachtende Quote stellt die Detektionsquote für eine vorgegebene Route dar. Diese Kenngröße gibt an, wie viele sogenannte Bluetooth-Pärchen im Verhältnis zum durchschnittlich gemessenen Verkehrsaufkommen auf einer Strecke von einer Bluetooth-Station zu einer zweiten Messstelle erfasst wurden. Ein Bluetooth-Pärchen umschreibt eine zweifach erfasste Bluetooth-ID, die sowohl am Beginn der betrachteten Route, wie auch an deren Ende durch die installierten Empfänger erfolgreich detektiert wurde:

```
device 10028667604754:
  D    2010-06-24 19:04:22
  E    2010-06-24 19:08:12
```

Abb. 3.1: Beispiel für ein einzelnes Bluetooth-Pärchen

Die in obiger Abbildung dargestellte, exemplarische Bluetooth-Chipsatz-Kennung 10028667604754 wurde zum Beispiel sowohl an der Empfängerstation D wie auch an der Messstelle E mit zugehörigem Datums- und Zeitstempel erfasst. In Kombination dieser beiden Werte für eine mögliche Reisezeitbestimmung wird hierbei von einem Bluetooth-Pärchen gesprochen.

Zu einer spezifischen Geräte-Kennnummer können jederzeit auch mehrere Bluetooth-Pärchen existieren. Typische Ursache hierfür ist, dass ein Fahrzeug mehrfach die betroffene Auswertungstrecke passiert, beispielsweise auf dem Weg zur Arbeit und dem anschließenden Nachhauseweg in entgegengesetzter Richtung, wie exemplarisch in folgendem Ausschnitt gezeigt:

```

device 46957026066380:
  D    2010-06-24 06:29:33
  E    2010-06-24 06:33:13

  E    2010-06-24 17:21:38
  D    2010-06-24 17:25:23

```

Abb. 3.2: Beispiel für zwei Bluetooth-Pärchen mit derselben Kennung

Die erste Pärchen-Bildung in obiger Abbildung erfolgt am Morgen des 24. Juni in Fahrtrichtung nach Station E. Das zweite separate Pärchen wird einige Stunden später in der entgegengesetzten Richtung von Messpunkt E nach D erkannt. Entgegen den Detektionen einzelner Empfängerstationen können bei der Routenbetrachtung die erfassten Fahrzeuge bereits richtungsbezogen ermittelt werden. Durch die Prämisse der Nichtexistenz negativer Reisezeiten kann für jedes Bluetooth-Pärchen eine Start- sowie eine Endstation identifiziert werden.

$$D_{AB} = \frac{n_{BT}(AB)_{pairs}}{0.5 \cdot (n_M(A)_{AB} + n_M(B)_{AB})} \cdot 100\%$$

mit D_{AB} = Bluetooth-Detektionsquote für die Route von A nach B [%]

$n_{BT}(AB)_{pairs}$ = Anzahl Bluetooth-Pärchen-Detektionen von A nach B [Fz]

$n_M(A)_{AB}$ = Detektionen der Messschleife bei A in Richtung A nach B [Fz]

$n_M(B)_{AB}$ = Detektionen der Messschleife bei B in Richtung A nach B [Fz]

Zur Ermittlung des durchschnittlichen realen Verkehrsaufkommens werden die gemessenen Werte der nächstgelegenen Induktionsschleife beim Bluetooth-Messpunkt A sowie der nächstgelegenen Messschleife bei der Empfängerstation B gemittelt.

Als Vergleichswerte dienen hierzu die 2010 ermittelten Detektionsquoten der c.c.com Andersen & Moser GmbH [vgl. WEINZERL 2010, S. 7] :

für den Auswertungseitraum 21.06.2010 (00:00 Uhr) bis 27.06.2010 (23:59 Uhr):

Messpunkt	Verkehrsaufkommen im Auswertungszeitraum	Anzahl der BT-IDs ohne Mehrfach-Scans	BT-Erfassungsquote
Kitzingen (D)	160.551	61.108	38%
Wolfsgraben (E)	160.551	58.349	36%

Tab. 3.6: Vergleichswerte Stations-Detektionsquote Juni 2010

Als BT-Erfassungsquote wird hierbei die Detektionsquote einer Bluetooth-Empfänger-Station bezeichnet, die Detektionsquote (Pärchenbildung) steht für die Erfassungsquote auf einer Route. Zusätzlich zu den im Juni durchgeführten Messreihen wurden bereits im Januar auf der gleichen Strecke Bluetooth-Empfänger einer älteren Generation erprobt deren Detektionsquoten ebenfalls in vorliegendem Endbericht dargestellt wurden [vgl. WEINZERL 2010, S. 8].

für den Auswertungszeitraum 21.01.2010 (09:18 Uhr) bis 28.01.2010 (09:18 Uhr):

Messpunkt	Verkehrsaufkommen nach Auswertungszeitraum	Verkehrsaufkommen der jeweiligen FR ohne Mehrfach-Scans	Anzahl der BT-IDs BT-Pärchen	Detektionsquote (Pärchenbildung)
Kitzingen (D)	Wolfsgraben (E) 144.74	82.957 30.196	26.498	21,92%
Wolfsgraben (E)	Kitzingen (D) 144.74	77.594 33.086	22.389	23,29%

Tab. 3.8: Vergleichswerte Routen-Detektionsquote Juni 2010

von	nach	Verkehrsaufkommen der jeweiligen FR	Anzahl der BT-Pärchen	Detektionsquote (Pärchenbildung)
Kitzingen (D)	Wolfsgraben (E)	72.304	13.331	18%
Wolfsgraben (E)	Kitzingen (D)	72.437	10.024	14%

Tab. 3.9: Vergleichswerte Routen-Detektionsquote Januar 2010

Im Vergleich der Tabellen deutlich zu erkennen ist die deutlich höhere allgemeine Detektionsquote der getesteten Bluetooth-Empfänger der neuen Generation im Juni im Verhältnis zu den älteren Geräten, die im Januar 2010 ihren Einsatz hatten. Allein die Routen-Detektionsquote der Bluetooth-Stationen der neueren Version BLIDS V30 erreichen einen annähernd doppelt so hohen Wert wie die Detektoren der früheren Version BLIDS V20 vom Anfang des Jahres 2010.

Problematisch bei der Ermittlung der Detektionsquoten stellt der Fakt dar, dass durchaus auch Fahrzeuge existieren können, die gleichzeitig mehrere aktive Bluetooth-Geräte an Bord haben. Dies kann die reale Detektionsquote in ihrer Höhe verfälschen. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird diese Problematik der multiplen Geräte in einem Fahrzeug dementsprechend noch näher erläutert.

3.3 Berechnungs-Methodik

Zur Bestimmung der endgültigen Reisezeiten auf dem zu betrachtenden Querschnitt sind mehrere vorlaufende Schritte nötig, in denen die vorhandenen Datensätze evaluiert werden. In ihrer Rohform liegen die Daten für jeden Auswertetag sortiert nach dem Zeitstempel der erfolgten Detektion vor:

Unixzeit	Bluetooth-Kennung	Messstation
1272300001	00:01:01:01:AA:AA	A
1272300002	00:02:02:02:BB:BB	A
1272300003	00:03:03:03:CC:CC	A
1272300003	00:03:03:03:CC:CC	A
1272300004	00:03:03:03:CC:CC	A
1272300041	00:01:01:01:AA:AA	C
1272300052	00:02:02:02:BB:BB	B
1272300054	00:03:03:03:CC:CC	B

Abb. 3.3: Beispiel für Bluetooth-Rohdaten

Der erste Schritt besteht darin, aus dieser Liste alle Bluetooth-Kennungen herauszufiltern, die an diesem Tag die auszuwertenden Messstationen passiert haben. Einzelne Kennungen werden hierbei wie individuell erkannte Fahrzeuge behandelt. Zusätzlich werden für jede dieser bereits identifizierten Gerätekennummern alle weiteren auftauchenden Detektionen mit ihrem zugehörigen Unixzeitstempel gespeichert. Aus der vormals einfachen Auflistung entsteht dadurch ein sortierter Überblick über alle detektierten Bluetooth-Module samt jeglicher erfolgten Erfassung dieses Geräts an einer der ausgewählten Empfängerstationen:

Bluetooth-Kennung	Unixzeit	Messstation
00:01:01:01:AA:AA	1272300001	A
00:02:02:02:BB:BB	1272300002	A
	1272300052	B
00:03:03:03:CC:CC	1272300003	A
	1272300003	A
	1272300004	A
	1272300054	B

Abb. 3.4: Beispiel für Daten nach der Sortierung nach Bluetooth-Kennungen

Die für vorliegende exemplarische Auswertung nicht relevante Bluetooth-Empfängerstation C wurde in obigem Beispiel aus den zu betrachtenden Datenlisten gelöscht. Nun kann für jede beliebige Kennung bereits annähernd der zurückgelegte Weg sowie die dafür benötigte Reisezeit abgelesen werden. In einem weiteren Schritt wird nun für jede relevante Bluetooth-Kennung einzeln die Sinnhaftigkeit der

dazu erfassten Routen-Daten überprüft. Dies soll dazu dienen, bereits in einem frühen Schritt alle erfolgten sogenannten Mehrfachdetektionen zu entlarven und den Datensatz davon zu befreien. Allen Mehrfachdetektionen gemeinsam sind sich wiederholende, zeitlich nahe Detektionen desselben Bluetooth-Geräts an derselben Messstation. Vereinfachend wurde zur Definition dieser zeitlichen Nähe ein fixer Zeitwert in Sekunden angenommen. Er beträgt im momentanen Status des prototypischen Auswerte-Programms 20 Sekunden. Die Festlegung auf diesen Zahlenwert basiert auf folgender Annahme für den normal fließenden Verkehr: Die meisten Mehrfachdetektionen entstehen bei langsam fahrenden Fahrzeugen wie LKWs, mit hoher Senderreichweite der an Bord befindlichen Bluetooth-Geräte. Wird für einen LKW eine Geschwindigkeit von 80 Kilometern pro Stunde angenommen sowie eine Sendeleistung von 200 Metern, so resultiert daraus, dass der LKW in etwa diese 20 Sekunden benötigt, um den 400 Meter breiten Empfangsradius der Messstation zu durchqueren und dadurch eine erneute zu wertende Detektion vermeidet.

Eine weitere Festlegung im Rahmen dieser Arbeit gilt für die Auswahl der als repräsentativ erscheinenden Detektionszeit. Hierbei wurde festgesetzt, dass jeweils die zeitlich am Frühesten erfolgte Detektion zusammen mit ihrem Zeitstempel als weiterer Vergleichswert zu verwenden ist. Sofern dieses Verfahren bei jeglicher Station gleichermaßen durchgesetzt wird, sollten sich daraus keinerlei negative Effekte für die Bestimmung der effektiven Reisezeit ergeben.

Ebenfalls gefiltert werden in diesem Schritt alle detektieren Bluetooth-Kennungen die im Rahmen des Auswertzeitraums nur an maximal einer der zur Bestimmung von Reisezeiten mindestens notwendigen zwei Messstationen detektiert wurden.

Für den bereits bekannten exemplarisch gewählten Datensatz der hierbei zur Veranschaulichung der Verfahrensschritte dienen soll ergibt sich folgendes Resultat nach Durchführung des zweiten Evaluations-Schrittes:

Bluetooth-Kennung	Unixzeit	Messstation
00:02:02:02:BB:BB	1272300002	A
	1272300052	B
00:03:03:03:CC:CC	1272300003	A
Bluetooth-Kennung	Unixzeit	Messstation
00:02:02:02:BB:BB	1272300054	B
	1272300002	A
	1272300052	B
00:03:03:03:CC:CC	1272300003	A
	1272300054	B
00:04:04:04:DD:DD	1272300004	A
	1272300051	B
	1272300405	B
	1272300452	A
00:05:05:05:EE:EE	1272300004	A
	1272300706	A
	1272300759	B
	1272300999	A

Abb. 3.6: Beispiel für Daten vor der Identifikation von Bluetooth-Pärchen

Anhand dieser vorgefilterten Datensätze kann nun die Erkennung von reisezeitrelevanten Bluetooth-Pärchen vorgenommen werden. Hierzu wird der obig verwendete Beispieldatensatz um zwei weitere erfasste Bluetooth-Kennungen erweitert, um das Vorgehen in diesem Verfahrensschritt weiter zu veranschaulichen:

Bei der Bildung von Bluetooth-Pärchen müssen für zeitlich aufeinander folgende Detektionen ein und derselben Kennung zwei Prämissen zutreffen:

- die aktuell zu betrachtende Detektion darf nicht schon einem anderen Bluetooth-Pärchen zugeordnet sein
- beide Detektionen müssen an unterschiedlichen Stationen erfolgt sein

Für vorliegendes Beispiel treffen beide Vorgaben für die ersten beiden Bluetooth-Kennungen ohne Vorbehalt ein. Für das dritte Bluetooth-Modul kann ein Pärchen zwischen der ersten sowie der zweiten Detektion gebildet werden. Ein Pärchen zwischen der zweiten und der dritten ist dadurch nicht mehr möglich, weil die zweite Erfassung mit dem Zeitstempel 1272300051 bereits einem Pärchen zugeordnet ist. Ohne weiteres ist jedoch wiederum die Bildung eines Bluetooth-Pärchens zwischen Detektion Nummer drei und vier möglich. Erkannt wurde dem zufolge eine Fahrtbewegung des Fahrzeugs mit dieser Bluetooth-Kennung von A nach B sowie einige Zeit später eine Fahrt in entgegengesetzter Richtung über B nach A. Für das letzte zu betrachtende identifizierte Bluetooth-Gerät stellt sich die Auswertung schwieriger dar. Das Fahrzeug wurde zweimalig hintereinander an Station A detektiert. Ursache dafür könnte beispielsweise eine Nichtdetektion des Fahrzeugs am Bluetooth-Empfängerstation B sein oder ein vorzeitiges Verlassen der Autobahn zwischen den beiden Stationen. Aus diesem Grund resultiert hieraus kein valides Bluetooth-Pärchen. Für die zweite und dritte Detektion wiederum ist die Pärchenbildung möglich. Die letzte Erfassung zur Unixzeit 1272300999 an Station A wiederum verfügt über keinen Koppel-Partner und wird dementsprechend auch gelöscht. An dieser Stelle kann nicht ohne größeren Aufwand identifiziert werden, ob nun das Pärchen 2-3 oder das Pärchen 3-4 die reale Fahrt des betreffenden Fahrzeugs widerspiegelt. Die für die weitere Auswertung evaluierten Bluetooth-Pärchen sehen demnach wie folgt aus:

Bluetooth-Kennung	Unixzeit	Messstation	Reisezeit
00:02:02:02:BB:BB	1272300002	A	
	1272300052	B	50 Sekunden
00:03:03:03:CC:CC	1272300003	A	
	1272300054	B	51 Sekunden
00:04:04:04:DD:DD	1272300004	A	
	1272300051	B	47 Sekunden
	1272300405	B	
	1272300452	A	47 Sekunden
00:05:05:05:EE:EE	1272300706	A	
	1272300759	B	53 Sekunden

Abb. 3.7: Beispiel für Daten nach der Identifikation von Bluetooth-Pärchen

3.4 Herausforderungen und potentielle Fehlerquellen

Bei der Berechnung von Reisezeiten zwischen zwei Bluetooth-Empfängern steht man mehreren Herausforderungen gegenüber. Problematisch sind falsch erfasste Reisezeiten, die vor der weiteren Auswertung der Daten aus dem Datenpool gefiltert werden müssen, um die Fehlereinflüsse in der Evaluation zu minimieren. Solche fehlerhaften Reisezeiten können dadurch entstehen, dass Fahrzeuge entweder nicht an jeder passierten Messstation erfolgreich erkannt wurden, beziehungsweise, dass die Detektion zwar richtig erfolgt ist, jedoch das Fahrzeug auf dem Weg unmittelbar zwischen zwei Messstationen einen Halt eingelegt hat. In ersterem Fall könnten durch zwischenzeitlich fehlende Detektionen falsche Fahrtrouten erkannt werden, die nicht der eigentlich gefahrenen Strecke entsprechen. Gesetzt dem zweiten Fall, dass ein detektiertes Fahrzeug während dem Befahren der Messstrecke einen Zwischenhalt einlegt, müssen spezielle Filteralgorithmen – die im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch vorgestellt werden – diese nicht brauchbaren Datensätze identifizieren und entfernen. Mögliche Ursachen für solch überlange Reisezeiten von einzelnen Fahrzeugen wären beispielsweise Halte auf Raststätten oder Park- und WC-Anlagen, aber auch ein Verlassen der Autobahn an einer Anschlussstelle mit späterem Wiederaufahren auf dieselbe Teststrecke. Als ebenfalls nicht repräsentativ einzustufen sind Reisezeiten beispielsweise von Pannenfahrzeugen, Service-Fahrzeugen der Autobahnmeister (Mähfahrzeuge, Winterdienst) oder aber auch Schwertransporten [vgl. SPANGLER 2009, S. 50].

Eine weitere Herausforderung stellt die Unterscheidung der detektierten Kraftfahrzeuge in die beiden relevanten Kategorien PKW und LKW dar. Da anhand der vorgenommenen Messung im Grunde keine weiteren Daten außer der Reisezeit und der

daraus errechneten mittleren Geschwindigkeit des Vehikels auf der betrachteten Strecke bekannt sind, stellt sich eine Differenzierung als schwierig dar.

Anhand exemplarischer Untersuchungen an Realdaten der Autobahndirektion Nordbayern wurden mittels des Unterscheidungskriteriums Geschwindigkeit relativ gute und brauchbare Ergebnisse erzielt. Bei einem Schwellwert von 100 Kilometern pro Stunde erfolgte hierbei die Trennung zwischen Last- und Personenkraftwägen. In den allermeisten Fällen waren die hierbei erzielten Schwerverkehrsanteile quasi identisch zu dem durch vorhandene Induktionsschleifen gemessenen Prozentsatz an LKWs am Gesamtverkehrsaufkommen. Einzige Ausnahme bilden Verkehrsstörungen, bei denen auch normale PKWs unter diesen Schwellenwert von 100 km/h rutschen und damit fälschlicherweise als Lastwagen erkannt werden. Eine Lösung für dieses Problem wurde bislang noch nicht gefunden, stellt sich jedoch auch nach eigener Einschätzung als fast unmöglich dar, da hierbei keine weiteren Daten außer der Reisezeit zur Verfügung stehen.

3.4.1 Mehrfachdetektionen

Unter einer Mehrfachdetektion versteht man das mehrmalige Detektieren ein und desselben Bluetooth-Geräts an einer Empfängerstation während einem einmaligen Vorbeifahren an dem betrachteten Messquerschnitt [vgl. SPANGLER1 2010, S. 5] . Da die Sende- und Empfangs-Reichweite von Bluetooth-Modulen oft einige hundert Meter betragen kann und jedes Gerät normalerweise alle 1,28 Sekunden eine Statusmeldung an umgebende andere Geräte abgibt [vgl. MERKLE 2002, S. 69] treten solche mehrmaligen Erfassungen des Öfteren auf. Eine exemplarische Mehrfachdetektion eines Bluetooth-Chipsatzes an einer Messstelle stellt sich folgendermaßen dar:

24.06.10	1277403998	00:25:00:C8:2D:B4	J
24.06.10	1277404008	00:25:00:C8:2D:B4	J
24.06.10	1277404032	00:25:00:C8:2D:B4	J

Abb. 3.8: Exemplarische Mehrfachdetektion einer Bluetooth-Kennung am 24.06.2010

Obige Abbildung zeigt eine beispielhafte Erfassung wie sie am 24.06.2010 an der Empfängerstation J am Autobahnkreuz Nürnberg Ost gemacht wurde. Die Bluetooth-Kennung 00:25:00:C8:2D:B4 wurde laut ihrem Unix-Zeitstempel um 20:36:28 Uhr erfasst. Zehn Sekunden später um 20:36:38 Uhr, sowie nochmals 24 Sekunden darauf, wurden ein und dieselbe Kennung erneut an der Station J detektiert.

Ob sich mehrfache Detektionen desselben Bluetooth-Chipsatzes an der gleichen Empfängerstation dazu eignen an Hand ihrer Häufigkeit auf den aktuellen Verkehrszustand im Bereich der Messstelle zu schließen darf bezweifelt werden. Grundlage

dieser Idee wäre ein möglicher Zusammenhang zwischen der Anzahl der Mehrfachdetektionen und der Aufenthaltszeit im Messbereich, um daraus resultierend eine Aussage zu treffen, welche Fortbewegungsgeschwindigkeit im Bereich einer einzelnen Messstation erzielt wird. Zu viele denkbare Faktoren haben jedoch dahingehend Einfluss auf die Anzahl der Detektionen eines passierenden Bluetooth-Geräts in einem Fahrzeug:

- Senderleistung
- Empfängerleistung
- Position und Lage der Antenne des Geräts
- Abschirmung durch umgebende Fahrzeugkarosserie
- Entfernung der Fahrspur des Fahrzeugs zur Empfängerstation
- örtliche Hindernisse (andere Fahrzeuge, Bepflanzung, Leitplanken, Schilder, etc.)
- Reflektionen
- Einfluss der Wetterlage

Viele dieser Einflussfaktoren auf Mehrfachdetektionen lassen sich nur äußerst schwer ermitteln und beherrschen, weshalb eine relevante Aussagekraft der Anzahl der Erfassungen einer Bluetooth-Kennung an demselben Querschnitt anzuzweifeln ist.

3.4.2 Erkennung von Reisezeit-relevanten Bluetooth-Pärchen

Eine weitere Herausforderung stellt die korrekte Identifizierung von Bluetooth-Pärchen dar, aus deren ermittelter Reisezeit auch konkret verwendbare Daten für die weitere Auswertung gewonnen werden können. Hierzu ergibt sich das Problem, dass auf Grund einzelner fehlender Detektionen eines Fahrzeugs dessen Route falsch zusammengesetzt und ausgewertet wird.

Zur näheren Beleuchtung dieser Thematik wird exemplarisch ein Beispielfahrzeug mit Bluetooth-Ausstattung gewählt, welches den zu untersuchenden Streckenabschnitt A-B vier Mal im betrachteten Zeitsegment durchfährt. Theoretisch würde das Fahrzeug damit acht Mal an einer der beiden Bluetooth-Empfänger identifiziert, wie beispielhaft hier dargestellt:

Detektionen eines Fahrzeugs mit Bluetooth-Kennung:

	Station	Datum	Uhrzeit
1.	A	2010-01-23	08:00:00
2.	B	2010-01-23	08:05:00
3.	A	2010-01-23	10:00:00
4.	B	2010-01-23	10:05:00
5.	A	2010-01-23	12:00:00
6.	B	2010-01-23	12:05:00
7.	A	2010-01-23	14:00:00
8.	B	2010-01-23	14:05:00

Abb. 3.9: Exemplarische Detektionen eines Fahrzeugs zu verschiedenen Zeitstempeln

Umfassende Rahmen symbolisieren in der Abbildung die ermittelten Bluetooth-Pärchen. Liegen alle acht Detektionen dieses Fahrzeugs korrekt vor, stellt eine Bildung von verwendbaren Pärchen kein Problem dar. Alle vier gefahrenen Streckenabschnitte fließen mit einer ermittelten Reisezeit von jeweils exakt fünf Minuten in die weiteren Berechnungen ein.

Wurde das Bluetooth-Gerät an Bord des Fahrzeugs jedoch bei nur einer der acht Vorbeifahrten nicht erfasst, werden alle folgenden Bluetooth-Pärchen falsch gebildet. Fehlt auf obiges Beispiel bezogen nun beispielsweise die erste Detektion der Bluetooth-Kennung, die an der Empfängerstation A gemacht wurde hat dies Auswirkungen auf die weitere Bildung von Reisezeit-relevanten Bluetooth-Pärchen:

Detektionen eines Fahrzeugs mit Bluetooth-Kennung:

	Station	Datum	Uhrzeit
1.	A	2010-01-23	08:00:00
2.	B	2010-01-23	08:05:00
3.	A	2010-01-23	10:00:00
4.	B	2010-01-23	10:05:00
5.	A	2010-01-23	12:00:00
6.	B	2010-01-23	11:05:00
7.	A	2010-01-23	14:00:00
8.	B	2010-01-23	14:05:00

Abb. 3.10: Exemplarische Detektionen eines Fahrzeugs zu verschiedenen Zeitstempeln mit Fehler

Ab der nunmehr ersten erfolgten Detektion an Station B werden alle folgenden Pärchen falsch zusammengesetzt. Die ermittelten Reisezeiten betragen jetzt jeweils eine Stunde und 55 Minuten. Da zu diesem Zeitpunkt der Datenverarbeitung noch keine vollwertigen Vergleichsdaten bereit liegen, kann nicht automatisch ohne unverhältnismäßig großen Aufwand herausgefunden werden, ob diese berechneten Reisezeiten der Realität entsprechen oder nicht.

3.4.3 Multiple Geräte in einem Fahrzeug

Da das Hauptaugenmerk der Bluetooth-Schnittstelle darauf liegt mehrere Module miteinander zu vernetzen, kann in vielen Fällen in denen in einem Fahrzeug eine Bluetooth-Kennung detektiert wurde, angenommen werden, dass sich noch weitere aktive Geräte an Bord befinden. Theoretisch betrachtet bietet eine aktivierte Bluetooth-Schnittstelle – mit vor allem bei akkubasierenden Mobilgeräten empfindlichem Akkuverbrauch – keine Vorteile, sofern sie nicht mit anderen Einheiten gekoppelt wird. Nach bisherigen Untersuchungen handelt es sich bei den in den Datensätzen der Autobahndirektion Nordbayern detektierten Bluetooth-Kennungen zu circa einem Drittel um Erfassungen von multiplen Geräten an Bord ein und desselben Fahrzeugs [vgl. SPANGLER1 2010, S. 6] . Allein aus dieser Größenordnung heraus ergibt sich die Notwendigkeit, diese redundanten Detektionen möglichst auszufiltern, um keine Reisezeiten von Fahrzeugen mit mehreren aktiven Geräten an Bord auch mehrfach in die weitere Auswertung einfließen zu lassen.

Zur Verfügung stehende Kriterien, um multiple Geräte zu identifizieren, stellen deren Detektionszeitstempel an den unterschiedlichen Messstationen dar. Betrachtet man nur die Datensätze einer einzelnen Messstation sind die einzigen Merkmale für multiple Geräte zeitlich naheliegende Ersterfassungen von Bluetooth-Kennungen. Daraus könnte man darauf schließen, dass es sich bei den unterschiedlichen detektierten Identifikationsnummern um Geräte handelt, die alle an Bord desselben Fahrzeugs befindlich sind. Diese Bestimmung ist äußerst vage und fehlerbehaftet und kann demnach nicht als praktikabel angesehen werden.

Auch über die Datensätze mehrerer hintereinander liegender Messstationen lassen sich multiple Geräte nur schwer erkennen. Zusätzlich zu dem erst genannten Kriterium der naheliegenden Detektions-Zeitstempel am ersten Empfänger lassen sich bei allen weiteren folgenden Stationen wiederum diese zeitlichen Abstände zwischen den einzelnen erstmaligen Erfassungen vergleichen. Resultiert hieraus erneut für die selben bereits am ersten Querschnitt identifizierten Kennungen, dass die Zeitstempel der Detektion sich nur um wenige Sekunden unterscheiden, beziehungsweise sogar in der selben Sekunde erfolgten, bekräftigt dies die Annahme, dass es sich um Geräte in ein und demselben Fahrzeug handelt. Auch diese Methode bietet Angriffsfläche für zahlreiche Fehlereinflüsse und ist dementsprechend mit Vorsicht anzuwenden. Einfachstes Negativ-Beispiel für eine sicherlich häufiger auftretende Situation sind beispielsweise zwei in Kolonne fahrende Lastwägen. Fahrzeuge dieses Typs überholen sich relativ selten und halten in etwa denselben geringen Abstand zum Vordermann ein. Daraus werden an Bord vorhandene Bluetooth-Geräte auch bei beiden Fahrzeugen etwa zur selben Zeit registriert und zwar bei allen Empfänger-Stationen.

Eine weitere Möglichkeit multiple Geräte in einem Fahrzeug näher zu spezifizieren stellt die sogenannte Class of Device (COD) dar, über die jedes Bluetooth-Modul ver-

fügt. Die COD ist eine 32 Bit lange Nummer die den Typ und die Funktion des Bluetooth-Geräts beschreibt. Sie besteht aus drei Teilbereichen die dies genauer spezifizieren:

- Bereich 1: unterstützter Service des Geräts
- Bereich 2: Hauptgeräte-Klasse / Gerätefamilie
- Bereich 3: Untergeräte-Klasse / Gerätetyp

Wichtig sind hierbei die Bereiche zwei und drei die auch als Major Device Class und Minor Device Class bezeichnet werden.

Neben der Darstellung der COD als 32 Bit-Array ist auch die sechsstellige hexadezimale Schreibweise weit verbreitet. Auch in den Datenbanken der Autobahndirektion Nordbayern findet sich die Class of Device eines jeden detektierten Bluetooth-Chipsatzes als Hexadezimalcode.

Für die oft anzutreffende Identifikation von Telefonen jeglicher Art dient die Hauptgeräte-Klasse „Phone“ mit dem hexadezimalen Zeichencode „200“. Untergeräte-Klassen hierzu, die oft detektiert wurden, sind Mobiltelefone und Smartphones, die durch die Bezeichnungen „Cellular“ mit dem Code „4“ und „Smart“ (Hexadezimalcode: „C“) beschrieben werden. Aus einer COD-Endung „204“ lässt sich demnach ein Mobiltelefon, aus der Endung „20C“ ein Smartphone identifizieren. Weitere Module, die oftmals erfasst werden, sind Audiogeräte wie Head-Sets, die mit dem COD-Code „400“ inklusive zugehöriger Untergeräte-Klasse bezeichnet werden [vgl. HOLMES 2008].

Unter der Annahme, dass normalerweise zu jedem eingeschalteten Head-Set auch ein Telefon mit aktivierter Bluetooth-Schnittstelle vorhanden sein muss, ließen sich unter diesen Voraussetzungen multiple Geräte in einem Fahrzeug besser erkennen. Hierzu wären jedoch noch nachfolgende Untersuchungen nötig, ob diese Systematik in der Praxis soweit realisierbar ist.

4 VALIDIERUNG DER REISEZEIT-DATEN

4.1 Mögliche Fehlerquellen in der Reisezeit-Berechnung

Im Schritt der Validierung wird die Plausibilität der vorhandenen Daten zur Reisezeit überprüft. Datensätze bei denen die Werte offensichtlich falsch vorliegen sollen erkannt und aussortiert werden. Ziel dieses Verfahrens ist es, eine sinnvolle Datengrundlage für die nachfolgend anstehenden Berechnungen zu schaffen.

Denkbare Fehlerquellen, beziehungsweise Einflüsse, die zu unbrauchbarer Erfassung der Reisezeiten führen könnten, wären hierbei:

- Fahrzeuge, die im Verlauf der Teststrecke einen Zwischenhalt einlegen (Rasthof oder Autobahnparkplatz)
- Fahrzeuge, die die Autobahn im Messsegment über eine Ausfahrt verlassen und zu einem späteren Zeitpunkt wieder an der Anschlussstelle einfahren
- Fahrzeuge, die den Abschnitt im Test-Zeitfenster mehrfach befahren und hierbei zur Reisezeitberechnung falsche Bluetooth-Pärchen erfasst werden
- technisch begründete Messfehler der Empfangsstationen

Resultierend daraus existieren auf Grund der Primitivität der erfassten Daten, die nur aus der Bluetooth-Kennung sowie dem zugehörigen Zeitstempel der Detektion bestehen, nur zwei möglich Fehlerresultate. Zu hoch erfasste Reisezeiten sowie zu gering detektierte Reisezeiten, wobei letztere ausschließlich durch technische Fehler in den Messstationen verursacht werden können. In den für diese Arbeit untersuchten Rohdaten der Autobahndirektion Nordbayern konnten keine unplausibel niedrigen Werte beobachtet werden, wodurch das Problem der zu gering erfassten Reisezeiten hier zu vernachlässigen ist. Häufiger, auf Grund der vielfacheren Möglichkeiten für Fehlerursachen, traten zu hoch detektierte Reisezeiten auf. Zur Bereinigung der verwertbaren Daten wurden im Rahmen dieser Arbeit mehrere Filter entworfen und getestet, die die vorhandenen Datensätze validieren und aussortieren sollen:

- Filter für niedrige Geschwindigkeiten
- Filter anhand 24-Stunden-Mittelwert
- Filter anhand Viertelstunden-Mittelwerten
- Filter anhand beider Nachbarschaftswerte

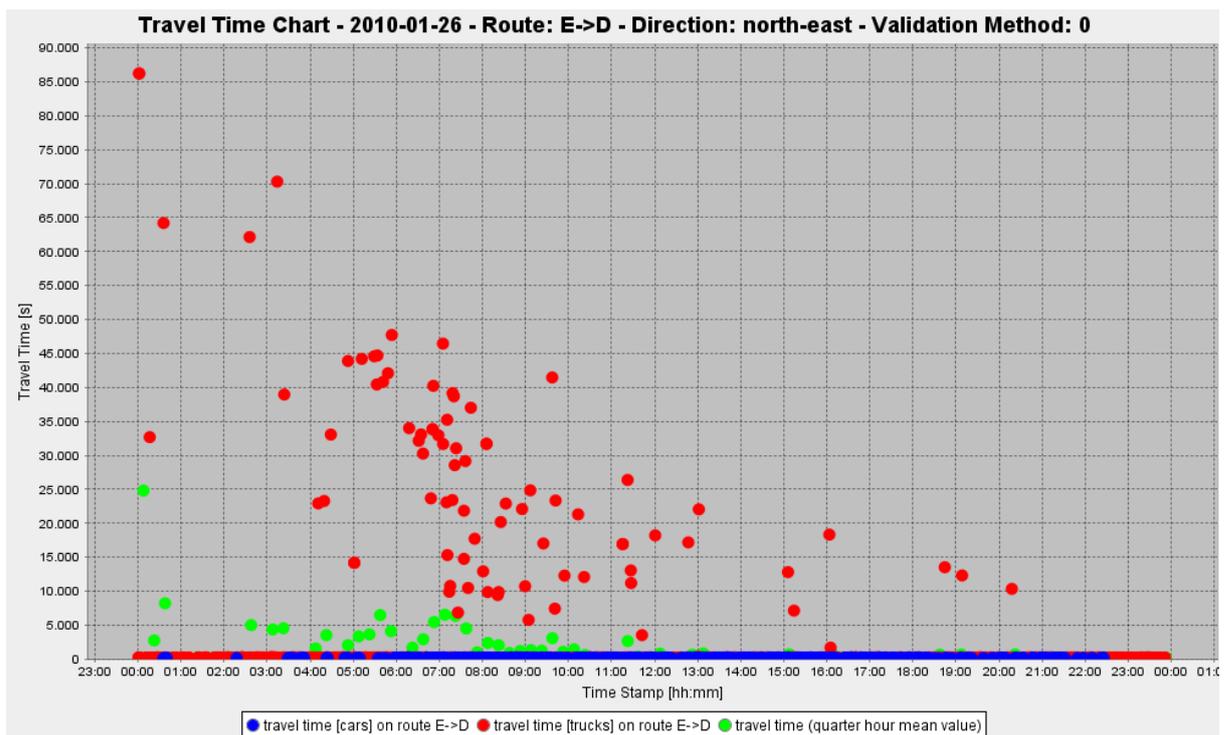


Abb. 4.1: Reisezeit-Rohdaten ohne jegliche Filterung

Ohne eine vorgeschaltete Filterung der Reisezeiten nach ihrer Plausibilität sind vielfach fehlerhafte Zeitbedarfswerte von Fahrzeugen auf der betrachteten Strecke in den Datensätzen vorhanden, wie obiges Beispiel auf einer circa fünfeinhalb Kilometer langen Teststrecke zeigt. Reisezeiten im Bereich von über 20.000 Sekunden, wie sie mehrfach in den Morgenstunden ermittelt wurden, würden in diesem Fall auf eine mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuge von weniger als einem Kilometer pro Stunde hindeuten. Da in vorliegendem Beispiel ein Groß der Fahrzeuge jedoch im Bereich von etwa 200 Sekunden liegt, was einer Durchschnittsgeschwindigkeit von etwa 100 km/h nahe kommt, ist davon auszugehen, dass solche Reisezeiten falsch detektierte Ausreißer darstellen, die für die weitere Evaluierung der Daten entfernt werden müssen.

4.2 Unterschiedliche Verfahren der Filterung

4.2.1 Filter für niedrige Geschwindigkeiten

Der erste vorzustellende Filter entfernt alle Reisezeit-Datensätze, deren durchschnittliche Geschwindigkeit sich innerhalb der Teststrecke unter einem vorzugebenden Schwellenwert befindet. Die Validitätsbedingung für alle untersuchten Reisezeiten setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$\text{Bedingung: } \frac{l_{AB}}{tt(i)_{AB}} \cdot 3,6 \geq v_S$$

mit l_{AB} = Länge der Teststrecke von A nach B [m]

$tt(i)_{AB}$ = Reisezeit des Fahrzeugs i von A nach B [s]

v_S = Schwellenwert der Geschwindigkeit [km/h]

Als Schwellenwert wurde hierbei eine Geschwindigkeit von 10 km/h gewählt.

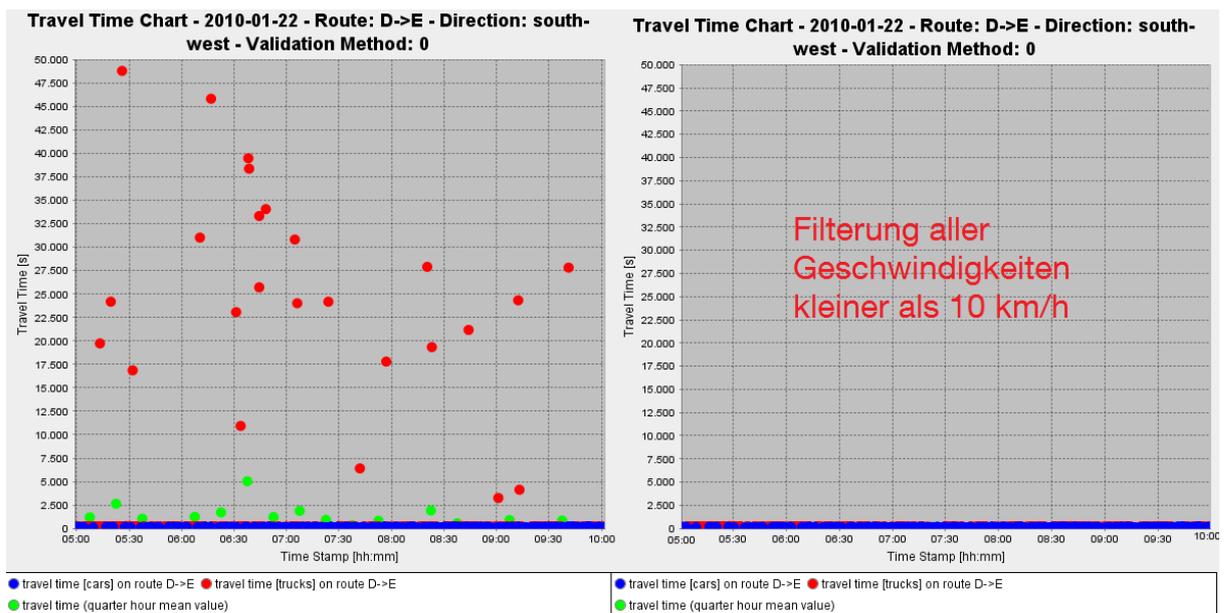


Abb. 4.2: Vergleich: ohne und mit Filterung von niedrigen Geschwindigkeiten

In obiger Abbildung erkennt man, dass die groben Ausreißer innerhalb der Messdaten nach der Filterung komplett entfernt werden. Bei diesem Beispiel betrug die Länge der Teststrecke 5,5 Kilometer. Daraus folgt, dass bei einem voreingestellten Geschwindigkeits-Schwellenwert von 10 km/h alle Fahrzeuge mit einer Reisezeit von mehr als 1980 Sekunden als nicht repräsentativ abgestempelt und aus dem Datenpool entfernt werden.

4.2.2 Filter anhand 24-Stunden-Mittelwert

Die grösste Form der im Rahmen dieser Arbeit getesteten Validierung von Reisezeiten stellt der Filter anhand des 24-Stunden-Mittelwertes der Reisezeiten dar. Das Prinzip dieses Filters beruht darauf, einen Plausibilitätskorridor um den Tagesmittelwert zu bilden innerhalb dem angenommen werden kann, dass sich die Werte in einem für die weitere Evaluierung sinnvollen Bereich bewegen. Für diesen Korridor wurde auf Grund der größeren Abweichungen im Bereich der hohen Reisezeiten kein konstanter Wert für eine maximale Deviation festgelegt, sondern stattdessen ein Abweichungsfaktor k eingeführt. Aus der Multiplikation beziehungsweise Division des 24-Stunden-Mittelwertes der Reisezeit für eine bestimmte Strecke mit diesem Faktor resultieren die obere sowie die untere Schranke des Plausibilitätskorridors. Hierbei ergibt sich der 24-Stunden-Mittelwert der Reisezeit für eine beliebig gewählte Strecke wie folgt:

$$\bar{tt}_{AB} = \frac{1}{n_{AB}} \cdot \sum_{i=0}^{n_{AB}-1} tt(i)_{AB}$$

mit \bar{tt}_{AB} = 24Stunden-Mittelwert der Reisezeit von A nach B [s]

n_{AB} = Anzahl Fahrzeuge auf Strecke von A nach B innerhalb 24h [-]

$tt(i)_{AB}$ = Reisezeit des Fahrzeugs i von A nach B [s]

Daraus lassen sich mit Hilfe des Abweichungsfaktors k folgende Grenzwerte für den Korridor ableiten:

$$tt_{AB,min} = \frac{\bar{t}t_{AB}}{k_{24h}}$$

$$tt_{AB,max} = \bar{t}t_{AB} \cdot k_{24h}$$

mit $tt_{AB,min}$ = unterer Schwellenwert für Reisezeiten [s]

$tt_{AB,max}$ = oberer Schwellenwert für Reisezeiten [s]

$\bar{t}t_{AB}$ = 24-Stunden-Mittelwert der Reisezeit von A nach B [s]

k_{24h} = Abweichungsfaktor für den 24-Stunden-Mittelwert Filter [-]

Reisezeiten, die für plausibel im Hinblick auf eine weiterführende Evaluation der Datensätze angenommen werden, müssen hierbei die nachfolgende Bedingung erfüllen. Alle anderen Reisezeiten für den auszuwertenden Streckenverlauf fließen nicht in die weitere Betrachtung mit ein.

$$\text{Bedingung: } tt_{AB,min} \leq tt(i)_{AB} \leq tt_{AB,max}$$

mit $tt_{AB,min}$ = unterer Schwellenwert für Reisezeiten [s]

$tt(i)_{AB}$ = Reisezeit des Fahrzeugs i von A nach B [s]

$tt_{AB,max}$ = oberer Schwellenwert für Reisezeiten [s]

Wie bereits vorab erwähnt liefert dieser Filter lediglich eine grobe bis teilweise sogar falsche Aussortierung von Reisezeiten. Ein Hauptproblem liegt hierbei darin, dass bereits zur Bildung des 24-Stunden-Mittelwertes alle falschen Reisedatensätze, die in der nachfolgenden Validierung aus dem Datenpool entfernt werden, einbezogen werden. Hieraus resultiert bereits vorab eine Verfälschung des Vergleichswertes, was teilweise zur Filterung von eigentlich plausiblen Daten führen kann.

Um dies zu vermeiden wurde die Verwendung dieses Filters auf mehrere Stufen ausgeweitet. Da bekannt ist, dass der 24-Stunden-Mittelwert, der aus den unbehandelten Rohdaten gebildet wird, nur als grober Vergleichswert geeignet ist, wird dieser Wert iterativ durch systematisches Aussortieren von verzerrenden Ausreißer-Werten in mehreren Schritten verfeinert. Dadurch ist es möglich, nach jedem Iterationsschritt auch den Abweichungsfaktor k weiter anzupassen und damit den Plausibilitätskorridor zu verkleinern, bei gleichzeitig geringem Risiko eigentlich sinnvolle Reisezeiten versehentlich zu löschen.

Für den Prototyp wurde das Filterverfahren in drei Iterationsschritten durchgeführt, wobei für die Deviationsfaktoren jeweils die Werte 10, 5 und 2,5 gewählt wurden.

In folgender Abbildung ist exemplarisch die Filterung anhand des 24-Stunden-Mittelwertes dargestellt. Alle Datensätze für Reisezeiten oberhalb und unterhalb der beiden Schwellenwerte werden aus dem Datenpool entfernt, da sie für als unplausibel identifiziert wurden. Hieraus ist auch sogleich eine mögliche Fehlerquelle dieses Algorithmus festzustellen: Bei einer – im Vergleich zu gewähltem Beispiel – weitaus stärkeren Erhöhung der Reisezeiten zu einer bestimmten Zeit, könnte der oberer Schwellenwert diese Reisezeiten – obwohl in diesem Fall plausibel – aus dem gültigen Wertebereich ausgrenzen.

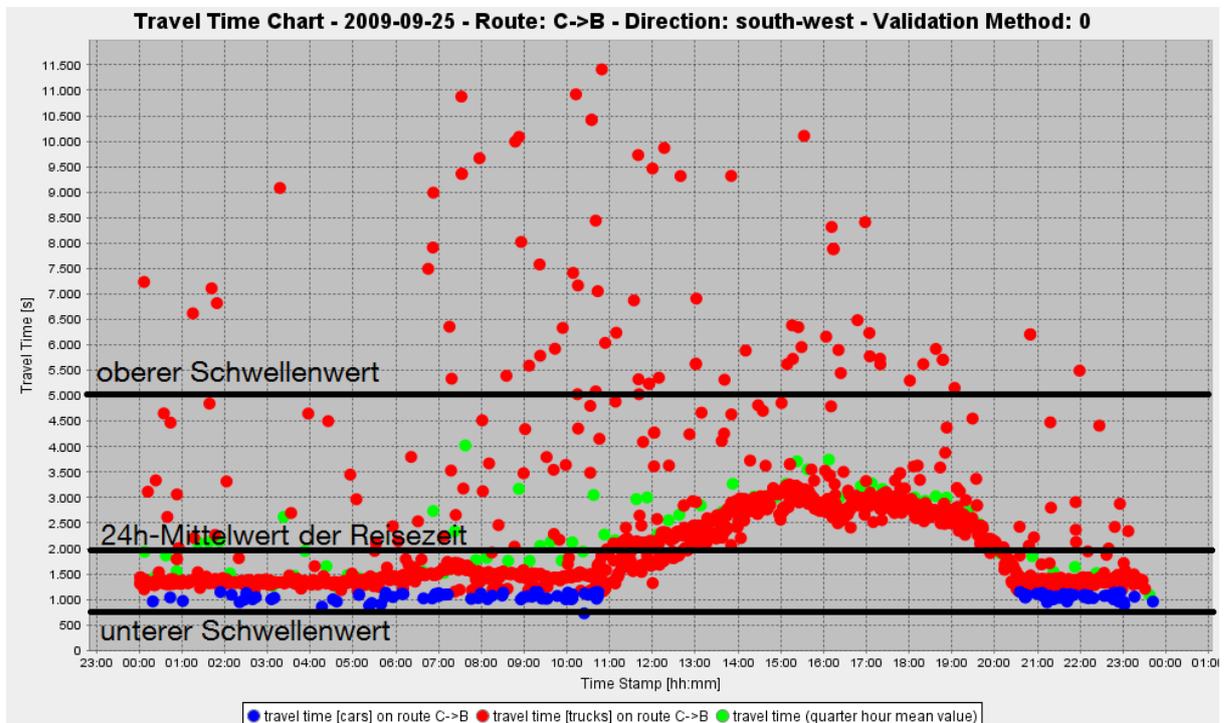


Abb. 4.3: Schwellenwert-Bereiche der Filterung anhand 24-Stunden-Mittelwert

4.2.3 Filter anhand Viertelstunden-Mittelwerten

Eine weitere implementierte Filtermethode ist die Validierung der Reisezeiten anhand von viertelstündlichen Mittelwerten. Hierbei erfolgt die Unterteilung der 24-stündigen Messreihe in 96 Segmente à 15 Minuten. Zur Zuordnung eines Bluetooth-Pärchens zu einem Zeitsegment wird der früheste gespeicherte Zeitstempel zu der jeweiligen Bluetooth-Kennung verwendet, also der Zeitpunkt der ersten Detektion des Fahrzeugs beim Einfahren in die Teststrecke. Analog zur Filterung anhand des 24-Stunden-Mittelwertes wird für jeden Viertelstunden-Abschnitt aus allen dort existenten Reisezeiten ein Mittelwert gebildet.

$$\bar{tt}(T_p)_{AB} = \frac{1}{n(T_p)_{AB}} \cdot \sum_{i=0}^{n(T_p)_{AB}-1} tt_{AB,i} \quad \text{mit } tt(i)_{AB} \in T_p$$

mit T_p = 15-minütiges Zeitsegment zum Startzeitpunkt p

$\bar{tt}(T_p)_{AB}$ = Mittelwert der Reisezeit von A nach B im Zeitsegment T_p [s]

$n(T_p)_{AB}$ = Anzahl Fahrzeuge auf Strecke von A nach B innerhalb T_p [-]

$tt(i)_{AB}$ = Reisezeit des Fahrzeugs i von A nach B [s]

Für jedes einzelne 15-minütige Zeitintervall des Testzeitraums von 24 Stunden werden spezifische Plausibilitätskorridore gebildet, die brauchbare Reisezeiten von den zu löschenden Datensätzen nach oben und unten abgrenzen. Die Schwellenwerte hierfür entstehen nach folgender Systematik:

$$tt(T_p)_{AB,min} = \frac{\bar{tt}(T_p)_{AB}}{k_{15m}}$$

$$tt(T_p)_{AB,max} = \bar{tt}(T_p)_{AB} \cdot k_{15m}$$

mit T_p = 15-minütiges Zeitsegment zum Startzeitpunkt p

$tt(T_p)_{AB,min}$ = unterer Schwellenwert für Reisezeiten im Zeitsegment T_p [s]

$tt(T_p)_{AB,max}$ = oberer Schwellenwert für Reisezeiten im Zeitsegment T_p [s]

$\bar{tt}(T_p)_{AB}$ = Mittelwert der Reisezeit von A nach B im Zeitsegment T_p [s]

k_{15m} = Abweichungsfaktor für den Viertelstunden-Mittelwert Filter [-]

Jedes Bluetooth-Pärchen, bei dem der früheste Zeitstempel innerhalb dieses Zeitsegments liegt, wird nun anhand einer Validitätsbedingung überprüft, analog zum vorab geschilderten Verfahren des 24-Stunden-Mittelwert Filters:

Bedingung: $tt(T_p)_{AB,min} \leq tt(i)_{AB} \leq tt(T_p)_{AB,max}$ mit $tt(i)_{AB} \in T_p$

mit T_p = 15-minütiges Zeitsegment zum Startzeitpunkt p

$tt(T_p)_{AB,min}$ = unterer Schwellenwert für Reisezeiten im Zeitsegment T_p [s]

$tt(T_p)_{AB,max}$ = oberer Schwellenwert für Reisezeiten im Zeitsegment T_p [s]

$tt(i)_{AB}$ = Reisezeit des Fahrzeugs i von A nach B [s]

Dieses Verfahren erzielt durch seine feinere Betrachtungsweise weitaus bessere Ergebnisse als der Filter anhand des 24-Stunden-Mittelwertes. Vorteil hierbei ist, dass selbst grobe Ausreißer ihr Fehlerpotential auf die Validierung nur lokal begrenzt in

ihrem Zeitsegment entfalten können und andere Messergebnisse davon nicht beeinträchtigt werden.

Auch bei dieser Methode zur Überprüfung der Plausibilität wurde ein zusätzlicher Iterationsschritt pro Zeitintervall durchgeführt. Die hierfür gewählten Werte lagen im ersten Iterationsschritt bei 5 sowie bei 2,5 im zweiten Durchlauf.

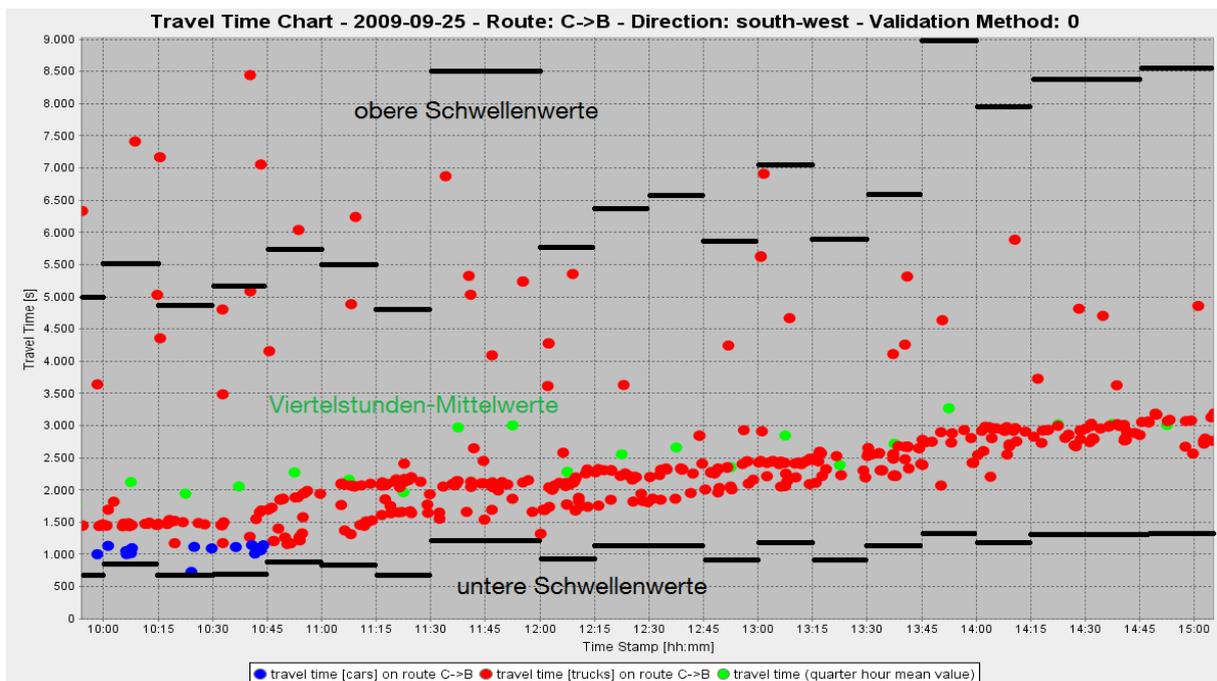


Abb. 4.4: Schwellenwert-Bereiche der Filterung anhand Viertelstunden-Mittelwert

4.2.4 Filter anhand beider Nachbarschaftswerte

Die Filterung anhand der Nachbarschaftswerte stellt die Methodik mit den besten Resultaten dar. Hierbei erfolgt ein Vergleich der Reisezeit des aktuell betrachteten Fahrzeugs mit der Reisezeit des vorausfahrenden und des nachfolgenden Fahrzeugs mit aktiver Bluetooth-Technologie. Die Bestimmung dieser beiden Nachbarfahrzeuge erfolgt zum Zeitpunkt des ersten Auftauchens der Bluetooth-Kennungen im Bereich der ersten Messstation. Bei dem zuerst sowie bei dem zuletzt erfassten Bluetooth-Pärchen auf der Teststrecke existiert jeweils nur ein Nachbarfahrzeug anhand dessen Reisezeit eine Überprüfung auf Validität erfolgen kann. Zur Plausibilisierung werden jeweils nur vorausfahrende Fahrzeuge herangezogen, die bereits validiert wurden. Bei dem Nachfolger ist dies nicht möglich, da die Filterung chronologisch auf Basis der Zeitstempel der ersten Erfassung voran schreitet. Dem Validitätsvergleich mit dem vorausfahrenden Fahrzeug wird aus diesem Grunde auch ein höherer Stellenwert zugeschrieben, da dieser Wert bereits als plausibel akzeptiert wurde.

Zur Filterung der Werte für die Reisezeiten werden in diesem Verfahren zwei unabhängige Validitätsbedingungen verwendet, von denen maximal nur eine eintreten muss. Die erste Kondition orientiert sich ausnahmslos an der bereits validierten Reisezeit des vorausfahrenden Fahrzeugs. Wiederum wird hierfür ein Deviationswert k eingeführt, der den Bereich der zu erwartenden plausiblen Werte nach oben sowie nach unten abgrenzt:

$$tt(i)_{AB,min} = \frac{tt(i-1)_{AB}}{k_N}$$

$$tt(i)_{AB,max} = tt(i-1)_{AB} \cdot k_N$$

mit $tt(i)_{AB,min}$ = unterer Schwellenwert für die Reisezeit des Fahrzeugs i [s]

$tt(i)_{AB,max}$ = oberer Schwellenwert für die Reisezeit des Fahrzeugs i [s]

$tt(i-1)_{AB}$ = Reisezeit vorausfahrenden Fahrzeugs (bereits validiert) [s]

k_N = Abweichungsfaktor für den Nachbarschafts-Werte Filter [-]

Sofern nun folgende erste Bedingung eintritt, gilt der aktuell betrachtete Wert für die Reisezeit eines beliebigen Fahrzeugs als validiert. Eine weitere Untersuchung in Bezug auf Größe der Reisezeit des Nachfolgers unterbleibt, da wie bereits erwähnt, die früher erfassten Reisezeiten bereits den Validierungsprozess erfolgreich durchlaufen haben.

$$\text{Bedingung: } tt(i)_{AB,min} \leq tt(i)_{AB} \leq tt(i)_{AB,max}$$

mit $tt(i)_{AB,min}$ = unterer Schwellenwert für die Reisezeit des Fahrzeugs i [s]

$tt(i)_{AB,max}$ = oberer Schwellenwert für die Reisezeit des Fahrzeugs i [s]

$tt(i)_{AB}$ = Reisezeit des Fahrzeugs i von A nach B [s]

Sofern die erste Kondition nicht zutrifft findet eine weitere Überprüfung statt die sich nun in gleichem Maße der Abweichung der Reisezeit zum nachfolgenden Fahrzeug widmet, ergänzt durch eine zusätzliche Validierung wiederum anhand der Reisezeit des Vorgängers. Analog zur ersten Bedingung existiert hierbei erneut der bereits bekannte Deviationsfaktor k , der den Korridor der plausiblen Werte absteckt. Für die ergänzende Betrachtung des Verhältnisses zur Reisezeit des vorausfahrenden Fahrzeugs wird der sogenannte erweiterte Abweichungsfaktor k^* eingeführt.

Die Notwendigkeit für diesen zusätzlichen Validierungsschritt ergibt sich aus der Möglichkeit, dass die aktuell zu überprüfende Reisezeit sowie auch der ebenfalls noch nicht validierte Wert des darauf folgenden Fahrzeugs beide nicht plausibel sind. Aus diesem Grunde wird hierbei eine zusätzliche Kontrolle anhand des bereits als plausibel bestätigten Vorgängers erforderlich:

$$tt(i)_{AB,min} = \frac{tt(i+1)_{AB}}{k_N}$$

$$tt(i)_{AB,max} = tt(i+1)_{AB} \cdot k_N$$

$$tt(i)^*_{AB,min} = \frac{tt(i-1)_{AB}}{k^*_N}$$

$$tt(i)^*_{AB,max} = tt(i-1)_{AB} \cdot k^*_N$$

mit $tt(i)_{AB,min}$ = unterer Schwellenwert für die Reisezeit des Fahrzeugs i [s]

$tt(i)_{AB,max}$ = oberer Schwellenwert für die Reisezeit des Fahrzeugs i [s]

$tt(i)^*_{AB,min}$ = unterer erweiterter Schwellenwert des Fahrzeugs i [s]

$tt(i)^*_{AB,max}$ = oberer erweiterter Schwellenwert des Fahrzeugs i [s]

$tt(i+1)_{AB}$ = Reisezeit nachfolgenden Fahrzeugs [s]

$tt(i-1)_{AB}$ = Reisezeit vorausfahrenden Fahrzeugs (bereits validiert) [s]

k_N = Abweichungsfaktor für den Nachbarschafts-Werte Filter [-]

k^*_N = erweiterter Abweichungsfaktor [-]

Anhand dieser Grenzwerte für den Wertekorridor erfolgt nun die Einteilung in plausible Werte, die für die weitere Evaluation erhalten bleiben und in unplausible Werte die aus dem Datenpool der Reisezeiten entfernt werden:

$$\text{Bedingung 1: } tt(i)_{AB,min} \leq tt(i)_{AB} \leq tt(i)_{AB,max}$$

$$\text{Bedingung 2: } tt(i)_{AB,min}^* \leq tt(i)_{AB} \leq tt(i)_{AB,max}^*$$

mit $tt(i)_{AB,min}$ = unterer Schwellenwert für die Reisezeit des Fahrzeugs i [s]

$tt(i)_{AB,max}$ = oberer Schwellenwert für die Reisezeit des Fahrzeugs i [s]

$tt(i)_{AB,min}^*$ = unterer erweiterter Schwellenwert des Fahrzeugs i [s]

$tt(i)_{AB,max}^*$ = oberer erweiterter Schwellenwert des Fahrzeugs i [s]

$tt(i)_{AB}$ = Reisezeit des Fahrzeugs i von A nach B [s]

Für die Tests anhand der Realdaten der Bluetooth-Messungen haben sich hierbei ein Wert von 2,5 für den Abweichungswert k sowie 5,0 für den erweiterten Abweichungswert k^* als praktikabel erwiesen. Ein iteratives Vorgehen, wie in den ersten beiden im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Verfahren wurde auf Grund der bereits guten Ergebnisse nach dem ersten Durchlauf nicht in Betracht gezogen, da auch hierbei durch weitere Iterationen keine relevante Verbesserung der Resultate zu erreichen ist.

4.3 Ergebnisse aus den Filterungs-Verfahren

Beste Resultate der implementierten und untersuchten Filterungsverfahren stellt der zuletzt dargestellte Filter anhand beider Nachbarschaftswerte dar. Sofern nicht zufälligerweise alle Startwerte der Reisezeiten zu Beginn der Auswertung bereits grob falsch sind, werden alle folgenden plausiblen Werte durchgängig gut erkannt. Im Durchschnitt werden von allen drei Filteralgorithmen in Kombination mit dem Niedrig-Geschwindigkeitsfilter etwa ein bis drei Prozent aller Reisezeiten als unbrauchbar aussortiert.

Anschließende Untersuchungen mit weiteren Teststrecken sind erforderlich um die Filter bezüglich ihrer Effektivität genauer zu kalibrieren. Insbesondere was den derzeit gewählten Wert der Abweichungsfaktoren angeht, der rein anhand einiger Betrachtungen der Ergebnisse festgelegt wurde. Eine weitere Absenkung dieses Fak-

tors scheint in manchen Fällen Vorteile in der Validierung der vorhandenen Datensätze zu bewirken, es wäre jedoch angebracht solche Änderungen des Faktors noch an weiteren Beispielen zu testen.

Zu untersuchen wäre weiterhin das Verhalten der Algorithmen bei einer Totalsper- rung aller Fahrspuren einer Autobahn. Ein solches Szenario konnte jedoch in den exemplarisch ausgewählten Datensätzen nicht beobachtet werden.

5 AUTOMATISCHE ERKENNUNG VON STÖRUNGEN

5.1 Störungserkennung und sich daraus ergebende Vorteile

Für Verfahren zur Steuerung und zum Management von Verkehr ist eine frühzeitige Erkennung von Störungen von großer Bedeutung. Eine exakte und schnelle Methode zur Detektion von Veränderungen im Verkehrsablauf ist erforderlich für individuelle und effektive Reaktion des Verkehrsmanagements auf lokale Störungen [vgl. SPANGLER 2009, S. 71]. Ziel ist es durch den Einsatz moderner Technologie Behinderungen vorab zu erkennen, diese Informationen melden, sowie schnell darauf zu reagieren. Aktuelle Verfahren und Methoden wie freiwillige Staumelder, Helikopter oder Kameras sind oftmals nur örtlich begrenzt möglich oder in ihrem Resultat zu langsam und teuer. Eine kostengünstig und einfach zu realisierende Störungserkennung beispielsweise mittels der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Bluetooth-Empfänger würde hierbei immense Vorteile bieten.

Jeder Bundesbürger verbringt pro Jahr etliche Stunden im Verkehrsbehinderungen. Der Volkswirtschaftliche Schaden der durch Staus jährlich alleine in der Bundesrepublik Deutschland entsteht wird auf mehrere Milliarden Euro beziffert.

5.2 Verwendetes Verfahren

Für vorliegende Arbeit wurde ein eigenes Verfahren entwickelt, das anhand der Veränderungen der Reisezeit sowie einiger zusätzlicher Parameter die Entstehung von Verkehrsstörungen auf Autobahnen prognostizieren soll. Der erstellte Algorithmus wurde prototypisch modelliert und umgesetzt und erzielte mit den zur Verfügung stehenden Rohdaten der Bluetooth-Empfänger erfolgreiche Ergebnisse. Die Überprüfung erfolgt, wie auch bereits beim Filter anhand des Viertelstunden-Mittelwertes, jeweils in Zeitintervallen à 15 Minuten. Der erste Schritt des Verfahrens beinhaltet die Ermittlung des Mittelwerts der Geschwindigkeiten aller Fahrzeuge, deren erstmaliger Detektionszeitpunkt innerhalb einer dieser viertelstündigen Zeitspannen liegt.

$$\bar{v}(T_p)_{AB} = \frac{n(T_p)_{AB} \cdot l_{AB}}{\sum_{i=0}^{n(T_p)_{AB}-1} tt_{AB,i}} \cdot 3,6 \quad \text{mit } tt(i)_{AB} \in T_p$$

mit T_p = 15-minütiges Zeitsegment zum Startzeitpunkt p

$\bar{v}(T_p)_{AB}$ = mittlere Geschwindigkeit von A nach B innerhalb T_p [km/h]

l_{AB} = Länge der Teststrecke von A nach B [m]

$n(T_p)_{AB}$ = Anzahl Fahrzeuge auf Strecke von A nach B innerhalb T_p [-]

$tt(i)_{AB}$ = Reisezeit des Fahrzeugs i von A nach B [s]

Hierbei werden selbstverständlich ausschließlich Fahrzeuge in derselben Fahrtrichtung berücksichtigt. Es erfolgt also auf einer Teststrecke zwischen den Bluetooth-Empfänger-Stationen A und B jeweils eine Aufteilung der 24 Stunden des Auswertzeitraums in jeweils 96 15-minütige Takte für die Richtung von A nach B, sowie ebenfalls für die Gegenrichtung von Station B nach Station A.

Ebenfalls wird die maximale auftretende Geschwindigkeit eines Fahrzeugs für jedes Zeitintervall ermittelt:

$$v(T_p)_{AB,max} = \frac{l_{AB}}{\min[tt(i = 0)_{AB} \dots tt(i = n(T_p)_{AB} - 1)_{AB}]} \cdot 3,6 \quad \text{mit } tt(i)_{AB} \in T_p$$

mit T_p = 15-minütiges Zeitsegment zum Startzeitpunkt p

$v(T_p)_{AB,max}$ = maximale Geschwindigkeit von A nach B innerhalb T_p [km/h]

l_{AB} = Länge der Teststrecke von A nach B [m]

$tt(i)_{AB}$ = Reisezeit des Fahrzeugs i von A nach B [s]

$n(T_p)_{AB}$ = Anzahl Fahrzeuge auf Strecke von A nach B innerhalb T_p [-]

Ob der Algorithmus eine Störung im Verkehrsablauf auf dem Autobahnsegment im betrachteten Zeitintervall identifiziert hängt von drei Bedingungen ab, die hierfür parallel eintreten müssen:

$$\text{Bedingung 1: } \bar{v}(T_p)_{AB} \leq v_{S,mean}$$

$$\text{Bedingung 2: } v(T_p)_{AB,max} \leq v_{S,max}$$

$$\text{Bedingung 3: } n(T_p)_{AB} \geq n_{S,min}$$

mit T_p = 15-minütiges Zeitsegment zum Startzeitpunkt p

$\bar{v}(T_p)_{AB}$ = mittlere Geschwindigkeit von A nach B innerhalb T_p [km/h]

$v(T_p)_{AB,max}$ = maximale Geschwindigkeit von A nach B innerhalb T_p [km/h]

$n(T_p)_{AB}$ = Anzahl Fahrzeuge auf Strecke von A nach B innerhalb T_p [-]

$v_{S,mean}$ = Schwellwert für mittlere Geschwindigkeiten [km/h]

$v_{S,max}$ = Schwellwert für maximale Geschwindigkeiten [km/h]

$n_{S,min}$ = Schwellwert für minimale Anzahl an Fahrzeugen [-]

In der ersten Bedingung wird überprüft, ob der Mittelwert aller Geschwindigkeiten im betrachteten Strecken- und Zeitsegment kleiner ist als ein vorgegebener Schwellwert für mittlere Geschwindigkeiten. Es wird hierbei zugrunde gelegt, dass bei einer signifikanten Verkehrsstörung dieser Durchschnittswert einer messbaren Reduzierung unterliegt. Des Weiteren wird angenommen, dass alle Fahrspuren gleichermaßen von einer Verkehrsstörung betroffen sind und dementsprechend auch keine in Relation hohen Maximal-Geschwindigkeiten mehr erzielt werden können. Diese Hypothese fließt in die zweite Bedingung zur Störungserkennung ein. Hierbei wird überprüft, ob alle Geschwindigkeiten in dem Viertelstunden-Zeitraum unterhalb eines vordefinierten Schwellwertes für maximale Geschwindigkeiten liegen. Die letzte Bedingung befasst sich mit den auf der Teststrecke detektierten Fahrzeugen während des Betrachtungszeitraums. Dem liegt folgende Annahme zu Grunde, dass eine relevante Störung nur durch eine gewisse Mindestanzahl an Fahrzeugen zu verursachen ist. Zwar lässt sich die exakte Anzahl innerhalb eines Zeitsegments auf der untersuchten Strecke nicht genau feststellen, da bei weitem nicht alle Fahrzeuge über aktivierte

Bluetooth-Technik an Bord verfügen, jedoch kann hier ein Schwellenwert für die minimale Anzahl an erkannten Bluetooth-Pärchen vorgegeben werden. Dieser Schwellenwert dient bei den vorliegenden Datensätzen meist dazu, Fehldetektionen von Verkehrsstörungen in den späten Nachtstunden zu vermeiden, falls dort in einem Zeitsegment beispielsweise ausschließlich vereinzelte LKW mit niedriger Geschwindigkeit detektiert werden.

Für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte prototypische Detektion von Verkehrsstörungen anhand der Bluetooth-Daten wurden folgende Parameter für die drei vorhandenen Schwellwerte gewählt:

- Schwellwert für Durchschnittsgeschwindigkeit: 80 km/h
- Schwellwert für Maximalgeschwindigkeit: 100 km/h
- Schwellwert für minimal Anzahl an Fahrzeugen: 5 Fahrzeuge

Dies entspricht mit den aktuellen Einstellungen für den Schwellwert zur Erkennung von LKWs (derzeit bei 100 km/h), dass alle Fahrzeuge im Falle einer Störung auf Grund ihrer niedrigen Geschwindigkeit als LKWs erkannt und markiert werden.

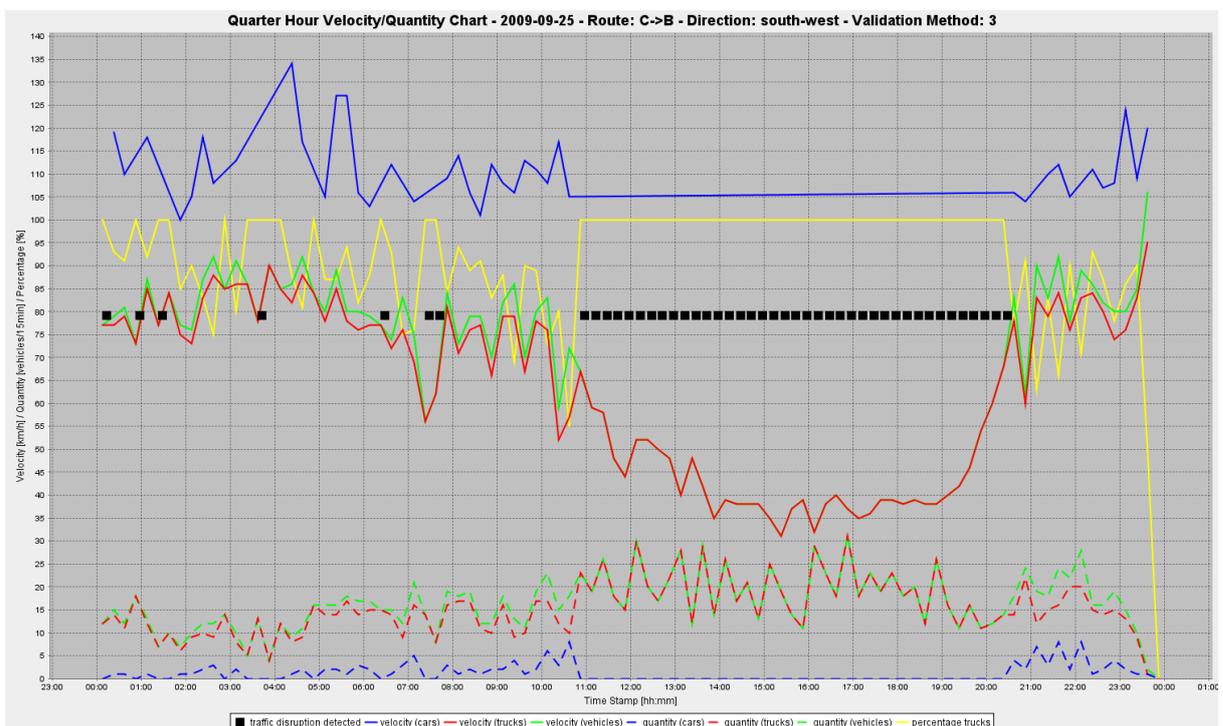


Abb. 5.1: Beispiel einer erkannten Störung auf einer Autobahn

Anzumerken bleibt, dass die derzeit gewählten Viertelstunden-Intervalle bei höherer Verfügbarkeit jederzeit auch verkleinert werden können, sofern die Anzahl an detek-

tierten Fahrzeugen in einem kürzeren Zeitsegment dann noch für eine statistische Auswertung ausreicht. Eine Verkürzung der Zeitintervalle würde eine feinere und zeitlich exaktere Detektion des Beginns sowie der Auflösung einer Verkehrsstörung ermöglichen.

5.3 Problematik

Auch bei der Störungserkennung stellt sich wiederum die Herausforderung der fix gewählten Grenzwerte. Teilweise werden hierdurch Verkehrsstörungen in Viertelstunden-Segmenten in der Nacht beziehungsweise in den frühen Morgenstunden detektiert. Grund dafür war bei den durchgeführten Auswertungen meist das Fehlen von Personenkraftwägen in diesen Zeitabschnitten welche die Durchschnittsgeschwindigkeit durch ihr höheres Tempo anheben, kombiniert mit dem Auftauchen mehrerer unterdurchschnittlich langsam fahrender Lastwägen. Unter diesen Voraussetzungen werden zeitweise die Detektionskriterien erfüllt, nach denen die mittlere Geschwindigkeit in den betrachteten 15 Minuten nicht höher als 80 Kilometer pro Stunde sowie kein Fahrzeug schneller als 100 km/h sein darf. Eine weitere Kalibrierung der Grenzwerte scheint hier vorteilhaft um in Zukunft noch bessere Ergebnisse zu erzielen.

6 ABGLEICH MIT DATEN VON LOKALEN MESSSTELLEN

6.1 Datengrundlage

Auf Grund des prototypischen Charakters der Bluetooth-Messungen mittels der BLIDS-Empfängerstationen, entstand die Notwendigkeit einer Verifizierung und Validierung der ermittelten Daten durch Vergleich mit Messungen der bereits vor Ort installierten Induktionsschleifen. Es handelt sich hierbei um leitende Drahtschleifen, die unter der Fahrbahnoberfläche in den Belag eingelassen sind. Diese Schleifen wirken als Spule und bilden einen Schwingkreis, der zur Detektion von Straßenfahrzeugen verwendet werden kann [vgl. SCHNIEDER 2007, S. 101].

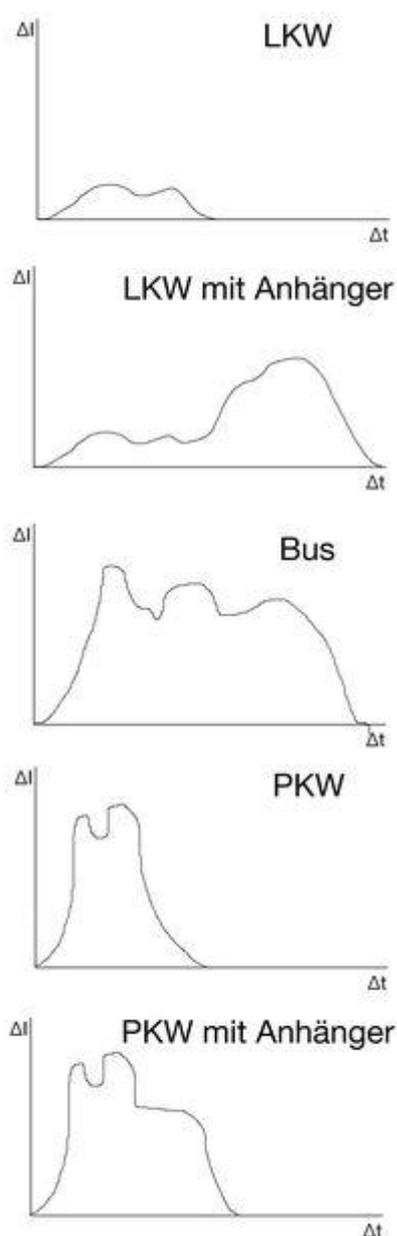


Abb. 6.1: Exemplarische Hüllkurven einer Induktionsschleife

Befindet sich ein metallisches Objekt, wie beispielsweise ein PKW oder LKW, im Wirkungsbereich dieses Schwingkreises ändert sich die Induktivität der Spule. Diese Verstimmung des Schwingkreises während dem Überfahren durch ein Fahrzeug kann über zusätzliche Elektronik erkannt und ausgewertet werden. Des Weiteren kann auf Grund der für jeden Fahrzeugtyp charakteristischen Kontur dieser Verstimmung bestimmt werden, ob es sich bei dem detektierten Verkehrsteilnehmer beispielsweise um einen PKW oder um einen Bus gehandelt hat [vgl. SCHNIEDER 2007, S. 102].

Werden auf einer Fahrspur zwei solche Induktionsschleifen unmittelbar hintereinander verlegt, besteht zusätzlich die Möglichkeit aus der zeitlichen Differenz der beiden Schwingkreis-Verstimmungen beim Überfahren momentane die Geschwindigkeit des passierenden Fahrzeugs zu ermitteln.

Relevante Daten für den Vergleich der Induktionsschleifen-Daten mit den durchgeführten Bluetooth-Messungen waren die Anzahl der Fahrzeuge die

in einer Fahrtrichtung innerhalb eines Zeitintervalls von 60 Sekunden detektiert wurden, sowie deren mittlere Geschwindigkeit in diesem Zeitsegment. Unterteilt waren beiderlei Datensätze nach den beiden Fahrzeugtypen LKW und PKW.

6.2 Resultate

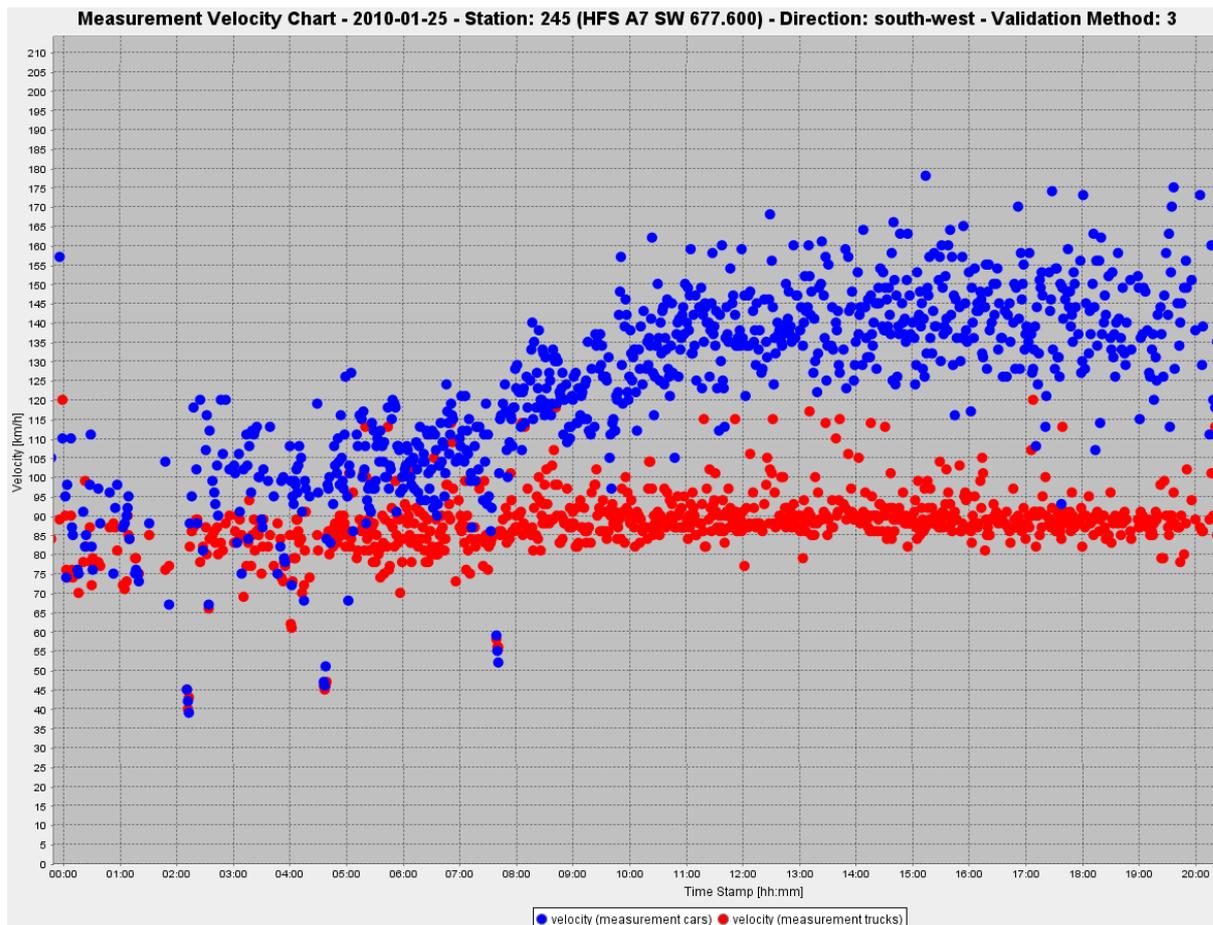


Abb. 6.2: Diagramm mit Geschwindigkeiten auf Basis von Daten der Induktionsschleife 245

Das hier abgebildete Diagramm zeigt Messdaten der Induktionsschleife mit der MQ_ID 245. Der Messquerschnitt befindet sich auf der A 7 auf dem Richtungsfahrtstreifen in Fahrtrichtung Süd-West nach Ulm bei Kilometer 677,600, auf der Höhe der Park- und WC-Anlage Wolfgraben. Die Auswertung ist vom 25. Januar 2010. Auf der Abszisse angetragen findet sich die Zeiteinteilung in Stunden-Segmenten, auf der Ordinate die erfassten mittleren Geschwindigkeiten innerhalb von 60 Sekunden in der Einheit Kilometer pro Stunde. Die rötliche farbliche Markierung der Diagrammwerte steht für einen Datensatz der für LKW erzeugt wurde. Demgegenüber symbolisieren die blauen Messwerte als Personenkraftwagen identifizierte Fahrzeuge. Für jedes 60-sekündige Zeitsegment wird von der betrachteten Induktionsschleife – falls vorhanden – jeweils ein Datensatz über die durchschnittliche Geschwindigkeit

der erfassten LKWs, sowie ein Datensatz über die mittlere Geschwindigkeit der erfassten PKWs in der Datenbank abgelegt. Dies ist auch der Grund wieso für die Daten der Induktionsschleifen keine, beziehungsweise fast keine Ausreißer bei den hohen sowie auch bei den niedrigen Geschwindigkeiten zu beobachten sind, da alle erfassten Geschwindigkeiten von Einzelfahrzeugen innerhalb dieser einen Minute gemittelt werden und erst so, als Durchschnittswert, in der Datenbank eingetragen werden. Als Vergleich hierzu folgt das Diagramm zum selben Auswerte-Zeitraum für Bluetooth-Sensoren auf dem gleichen Streckenabschnitt:

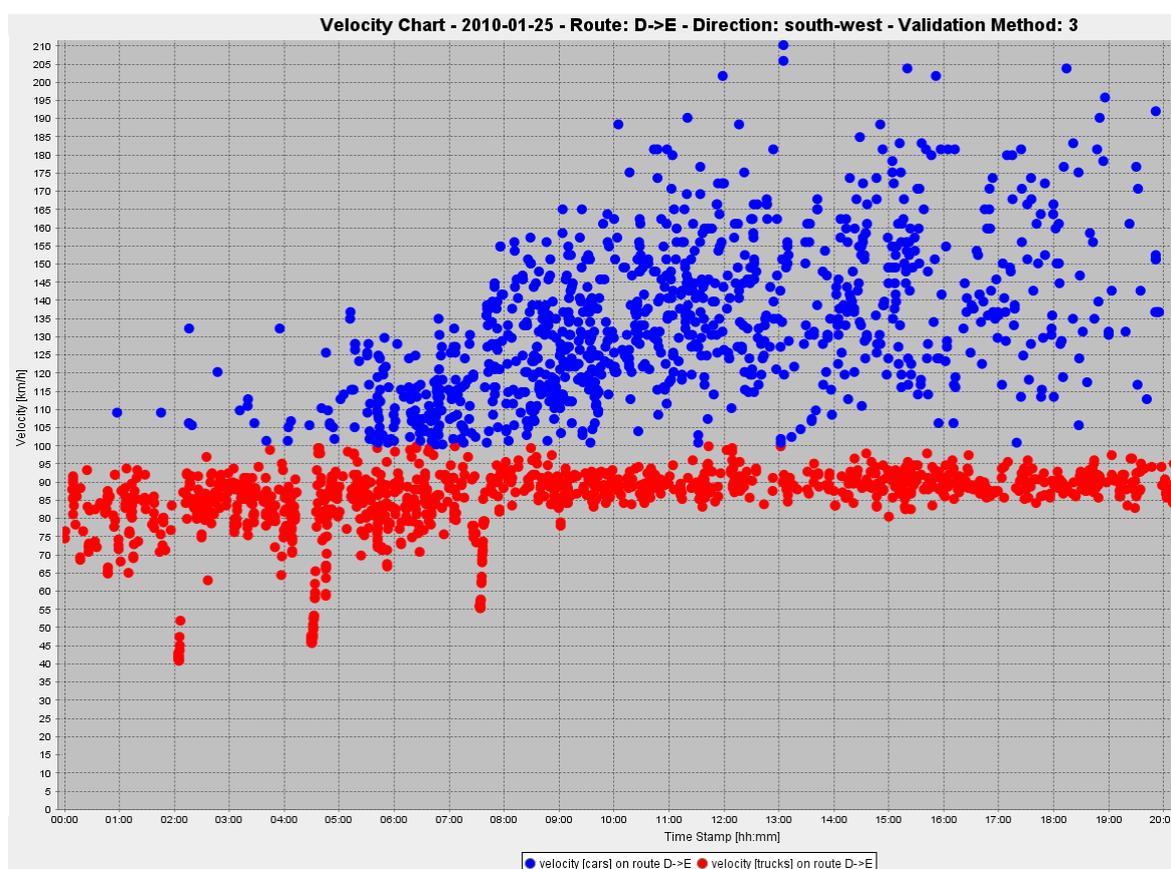


Abb. 6.3: Diagramm mit Geschwindigkeiten auf Basis von Daten der Bluetooth-Stationen D und E

Obiges Diagramm zeigt die nach der Auswertung der Reisezeiten ermittelten Geschwindigkeiten von Fahrzeugen auf einer Teststrecke für Bluetooth-Detektion. Es handelt sich hierbei um den identischen Autobahnabschnitt auf der A 7 in Richtung Ulm wie auch bei der vorab vorgestellten Auswertung der Induktionsschleife 245. Der Bluetooth-Empfänger E befindet sich exakt auf derselben Position wie die Induktionsschleife, nämlich bei Kilometer 677,600 auf Höhe der Park- und WC-Anlage Wolfsgraben. Der Detektor mit der Bezeichnung D steht 5.548 Meter stromaufwärts bei der Kilometrierung 672,051 in der Nähe der Anschlussstelle Kitzingen.

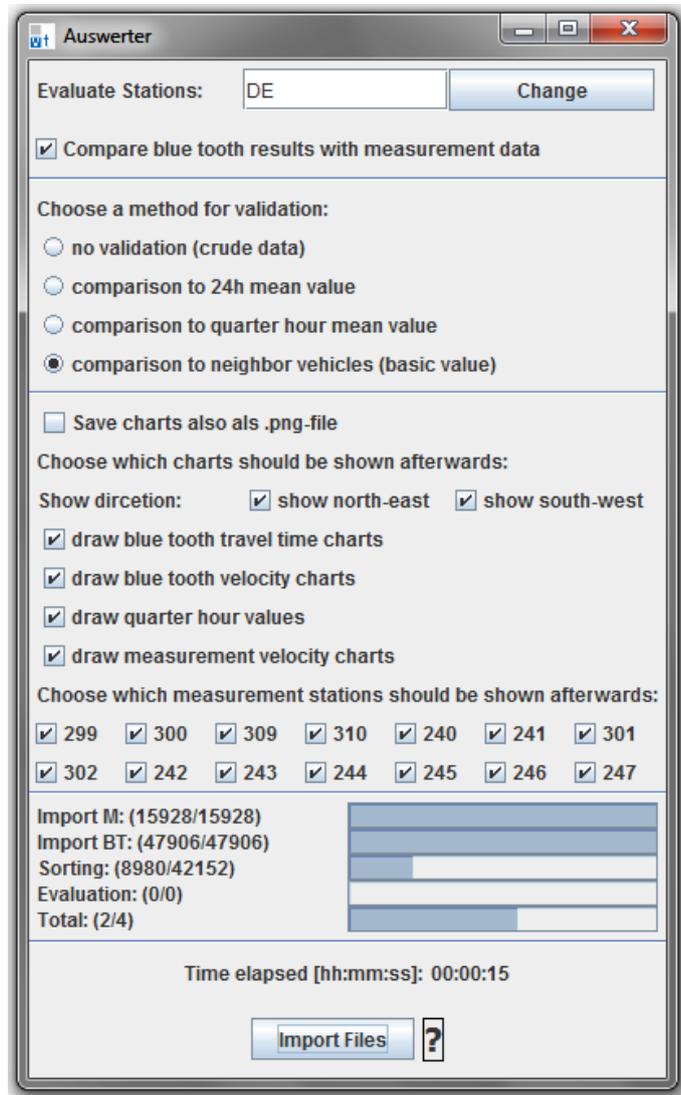
Trotz einiger augenscheinlicher Unterschiede im Erscheinungsbild des Bluetooth-Diagramms zur Darstellung der Daten der Induktionsschleife erkennt man doch deutlich die Gemeinsamkeiten, wie den allgemeinen Geschwindigkeitseinbruch in den frühen Morgenstunden, sowie der drei äußerst langsamen Ausreißer-Grüppchen um 02:00 Uhr, um 04:30 Uhr sowie um 07:40 Uhr.

Eine Abweichung im Erscheinungsbild stellt die farbliche Markierung der LKWs dar. Können LKWs bei Induktionsschleifen unabhängig von ihrer momentanen Geschwindigkeit anhand ihrer induktiven Hüllkurve weitestgehend eindeutig identifiziert werden, hat man bei der Erfassung von Bluetooth-Kennungen als derzeit einziges Unterscheidungsmerkmal die ermittelte Reisezeit – beziehungsweise aus deren Kehrwert resultierende Geschwindigkeit – zur Differenzierung. Durch die hierbei getroffene Auswahl eines fixen Schwellenwertes von 100 Kilometern pro Stunde zur Abgrenzung von Personenkraftwagen und Lastwägen, fallen im Zuge einer Verkehrsstörung, oder jeglicher anderer stark geschwindigkeitsreduzierender Vorkommnisse, alle Fahrzeuge – ebenfalls auch langsame PKWs – unter diesen Grenzwert und werden in roter Farbe als LKWs identifiziert. Ebenfalls erkennbar ist der Unterschied in den maximalen Geschwindigkeiten, der auf vorab bereits erwähnte Mittelwertbildung zurückzuführen ist. Durch die Bluetooth-Sensoren wurde um etwa 13:00 Uhr ein einzelnes Fahrzeug detektiert, welches die maximal ermittelte mittlere Geschwindigkeit von 210 km/h aufweist.

7 PROTOTYPISCHE UMSETZUNG MIT JAVA

Die als „Auswerter“ bezeichnete Java-Applikation, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, verfügt über eine Benutzer-Oberfläche mit der sich die zu verwendenden Verfahren sowie die auszuwertenden Elemente für jede verfügbare Teststrecke frei wählen lassen. Sie ist grob unterteilt in fünf Bereiche die jeweils unterschiedliche Bedien-Funktionalität bereit stellen:

- Rohdatenauswahl
- Auswahl der Validierungsmethode
- zur Verfügung stehende Diagramme die nach der Auswertung ausgegeben werden sollen
- Anzeige der Fortschrittsbalken der einzelnen Teilschritte der Programmausführung
- Start-Knopf zur Auswahl der zu verwendenden Datensätze



7.1: Benutzeroberfläche der Java-Applikation

Im ersten Bereich können die zu evaluierenden Empfänger-Stationen auf einer beliebigen Route angegeben werden. Die Angabe erfolgt über die alphabetische Bezeichnung der Bluetooth-Station nach dem Schema der Autobahndirektion Nordbayern. Desweiteren lässt sich hier einstellen, ob Daten von in der Nähe befindlichen Induktionsschleifen ebenso mit in die Auswertung einbezogen werden sollen. Nur durch Auswahl dieser Einstellung ist es möglich die Detektionsquoten der Bluetooth-Empfänger zu ermitteln, da sonst keine Vergleichsdaten zum realen Verkehrsaufkommen zur Verfügung stehen.

Das zu verwendende Validierungsverfahren für Reisezeiten lässt sich im zweiten Block des User-Interface einstellen. Neben der Auswahl „keine Validierung“ stehen

die drei im Rahmen dieser Arbeit bereits vorgestellten Methoden zur Verfügung, um un plausible Reisezeiten aus dem Datenpool heraus zu filtern.

Wichtig für die grafische Auswertung nach der Berechnung ist der darauf folgende Abschnitt. Hier können Einstellungen zu den anzuzeigenden Diagrammen gemacht werden. Ebenso lassen sich alle Diagramme im Anschluss direkt als PNG-Grafikdatei im Ordner der Bluetooth-Rohdaten speichern. Die weiteren wählbaren Einstellungen lauten wie folgt:

- Anzeige der Diagramme für einzelne Fahrtrichtungen an- beziehungsweise ausschalten
- Reisezeiten-Diagramme darstellen, die auf Grundlage der Bluetooth-Daten ermittelt wurden
- Geschwindigkeits-Diagramme darstellen, die auf Grundlage der Bluetooth-Daten erstellt wurden
- Viertelstunden-Auswertungs-Diagramm anzeigen, das ebenfalls auf Basis der Bluetooth-Datensätze folgende Kurven beinhaltet (mit jeweils gemittelten Werten im 15-Minuten-Takt):
 - Durchschnittsgeschwindigkeit PKW
 - Durchschnittsgeschwindigkeit LKW
 - Durchschnittsgeschwindigkeit Fahrzeuge allgemein
 - Anzahl PKW
 - Anzahl LKW
 - Anzahl Fahrzeuge allgemein
 - Anteil LKW am Gesamtverkehrsaufkommen
- Geschwindigkeits-Diagramme darstellen auf Grundlage der Daten nahe gelegener Induktionsschleifen, die weiter unten in der Liste der Messstationen ausgewählt werden können

Weiterhin können hier Diagramme für einzelne spezifische Induktionsschleifen deaktiviert werden, um die Flut an vielfältigen Informationen nach der erfolgreichen Programmausführung einzugrenzen. Die verfügbaren Induktions-Messstellen werden anhand ihrer von der Autobahndirektion Nordbayern zugewiesenen LOCATION_KONFIG_ID aufgelistet.

Der letzte Abschnitt der Benutzeroberfläche enthält den Start-Button, mit dem die Auswertung begonnen wird. Nach Auswahl dieses Knopfes öffnet sich ein Datei-Explorer, in welchem die gewünschten Datensätze markiert werden. Zu beachten ist hierbei, dass alle Rohdaten, egal ob von Bluetooth-Empfängern oder Indukti-

onsschleifen, im TXT-Format vorliegen müssen. Zur Unterscheidung dieser beiden Datenquellen wurde die Prämisse eingeführt, dass Bluetooth-Daten mit dem Präfix „BT_“ und Datensätze lokaler Messschleifen mit dem Präfix „M_“ versehen sein müssen. Nach erfolgreicher Bearbeitung der Daten durch das Programm lässt sich über denselben Button die Applikation beenden und anschließend die Auswertungsergebnis-Datei öffnen.

8 TESTS ANHAND VON REALDATEN

8.1 Testgebiet und Testzeitraum

Als Testgebiet wurde ein Teilabschnitt der Bundesautobahn A 7 gewählt. Die erste der beiden zu betrachtenden Empfängerstationen befindet sich bei der Anschlussstelle 103 – Kitzingen bei Kilometer 672,051. Die Bluetooth-Station an dieser Position trägt das Kürzel D. Exakt nach 5.548 Metern folgt Richtung Süden die Messstation E bei Kilometer 677,600. Station E befindet sich auf Höhe der Park- und WC-Anlage Wolfsgraben. Im Norden, in Richtung Würzburg, folgt das Autobahnkreuz Biebelried mit dem Anschluss der Autobahn A 3 von Frankfurt nach Nürnberg. Südlich führt der weitere Streckenverlauf über das Autobahnkreuz Feuchtwangen / Crailsheim mit der A 6 von Heilbronn nach Nürnberg in Richtung Ulm.

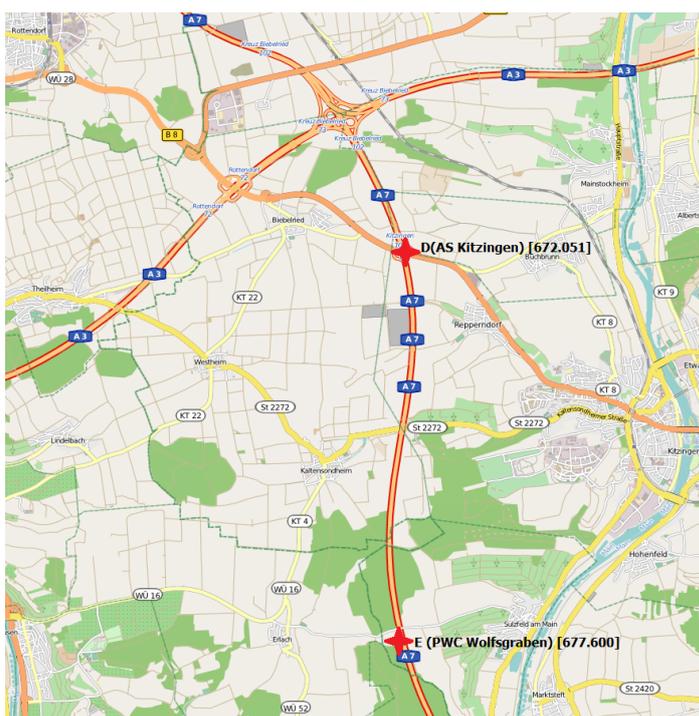


Abb. 8.1: Streckenausschnitt A7 - Messstationen D und E (Daten von OpenStreetMap - Veröffentlicht unter CC-BY-SA 2.0)

Die gewählte Strecke bietet zahlreiche Vorteile die ihre Auswahl begründen. Zu aller erst lässt sich auf Grund ihrer kurzen Länge ein annähernd gleichmäßiger Verkehrszustand an beiden Enden der Route annehmen. Ebenso aus der Kürze resultierend, befinden sich keinerlei Anschlussstellen oder sonstige Ausfahrten zwischen den beiden Endpunkten, wodurch gewährleistet ist, dass alle Fahrzeuge gezwungenermaßen beide Bluetooth-Empfängerstationen passieren müssen. Dies ermöglicht es, gezielte Aussagen über die Detektionsquoten der Geräte zu treffen, da keine zu- oder abfahrenden Fahrzeuge das Ergebnis verfälschen können.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass der gleiche Streckenabschnitt bereits in den Voruntersuchungen der österreichischen Firma c.c.com Andersen & Moser GmbH im Auftrag der Autobahndirektion Nordbayern untersucht wurde. Der Abschnitt wurde aus diesem Grunde in zwei verschiedenen Zeiträumen mit unterschiedlicher Emp-

fänger-Technologie ausgestattet, was die Möglichkeit bietet, die im Rahmen dieser Arbeit ausgeführten Auswertungen und Analysen an zwei nicht identischen Versionen von Bluetooth-Empfängern zu evaluieren. Auf der Teststrecke existiert zudem keine Geschwindigkeitsbegrenzung, wodurch unterschiedlichste Fahrzeuggeschwindigkeiten erfasst und untersucht werden können.

Der zeitliche Rahmen der Auswertungen orientiert sich an den Zeiträumen in denen die beiden Empfängerstationen E und D aktiv geschaltet waren. Laut Angaben der Autobahndirektion Nordbayern war dies zu folgenden Zeiten der Fall:

Messpunkt	Aufbau	Abbau
A	03.09.2009 15:04:53	24.03.2010 08:56:38
B	03.09.2009 15:04:48	25.04.2010 12:25:01
C	03.09.2009 15:05:03	25.04.2010 12:59:59
<u>D (altes BT-Modul)</u>	<u>03.09.2009 15:05:22</u>	<u>25.04.2010 12:23:37</u>
<u>D (neues BT-Modul)</u>	<u>09.06.2010 11:33:26</u>	<u>05.07.2010 15:14:59</u>
<u>E (altes BT-Modul)</u>	<u>21.01.2010 09:18:52</u>	<u>28.01.2010 09:18:59</u>
<u>E (neues BT-Modul)</u>	<u>09.06.2010 11:33:08</u>	<u>08.07.2010 11:31:00</u>
F	28.01.2010 12:33:39	26.02.2010 09:49:57
G	26.02.2010 09:50:45	23.03.2010 10:00:53
H	15.03.2010 11:13:06	14.04.2010 08:34:18
I	24.03.2010 12:07:06	25.04.2010 12:25:22
J	31.03.2010 09:34:20	06.04.2010 12:27:04

Tab. 8.1: Betriebszeiten der unterschiedlichen Bluetooth-Messstationen

Auf Grund der kurzen Betriebszeit des Empfängers E bleibt für die Strecke D-E im Januar nur ein kurzes Zeitfenster in dem beide Stationen der Route aktiv waren. Der Zeitraum erstreckt sich von Donnerstag, dem 21. Januar 2010 um 09:18 Uhr früh bis zum Donnerstag, den 28. Januar 2010 ebenfalls um 09:18 Uhr früh. Es ergeben sich damit insgesamt acht Tage, an denen Auswertungen vorgenommen werden konnten, wobei die sich die Evaluation am 28. Januar nur auf Daten der Morgenstunden stützen kann. Im Januar waren noch Bluetooth-Empfänger der Generation BLIDS V20 am Messquerschnitt montiert. Am 9. Juni 2010 wurden an beiden Querschnitten Geräte der neuen Generation BLIDS V30 installiert, die über einen längeren Zeitraum Daten lieferten. Da sich die Auswertungen der einzelnen Tage relativ ähnlich sind, wurden für die Betriebszeit im Juni nur die vier Tage vom Montag, den 21.06.2010 bis zum Donnerstag, den 24.06.2010 evaluiert, jeweils von 00:00 Uhr bis 23:59 Uhr. Zusammenfassend wurden demnach in folgenden Zeiträumen auf der Strecke D-E mit Realdaten gerechnet:

- 21.01.2010 09:18 Uhr - 28.01.2010 09:18 Uhr
- 21.06.2010 00:00 Uhr - 24.06.2010 23:59 Uhr

Da während beiden Auswertezwischenräume keinerlei Verkehrsstörungen oder gar Stauungen zu beobachten waren, wurde zusätzlich ein einzelner 24-stündiger Messzeitraum auf der Strecke B-C am 25.09.2009 gewählt, an dem sich eine Stauung zu verzeichnen war. Dieser 32 Kilometer lange Streckenabschnitt der Autobahn A 6 liegt zwischen der nordöstlichen Messstation B an der Anschlussstelle Nürnberg-Langwasser (Kilometer 791,678) sowie der südwestlichen Empfängerstation B in der Nähe der Anschlussstelle Neuendettelsau bei Kilometer 759,701. Auf dieser Strecke war zu gegebenem Tag zwischen etwa 11:00 Uhr und 20:00 Uhr in Fahrtrichtung Nürnberg eine größere Stauung zu identifizieren, mit der die in Rahmen dieser Arbeit entwickelte Störungserkennung kalibriert wurde.

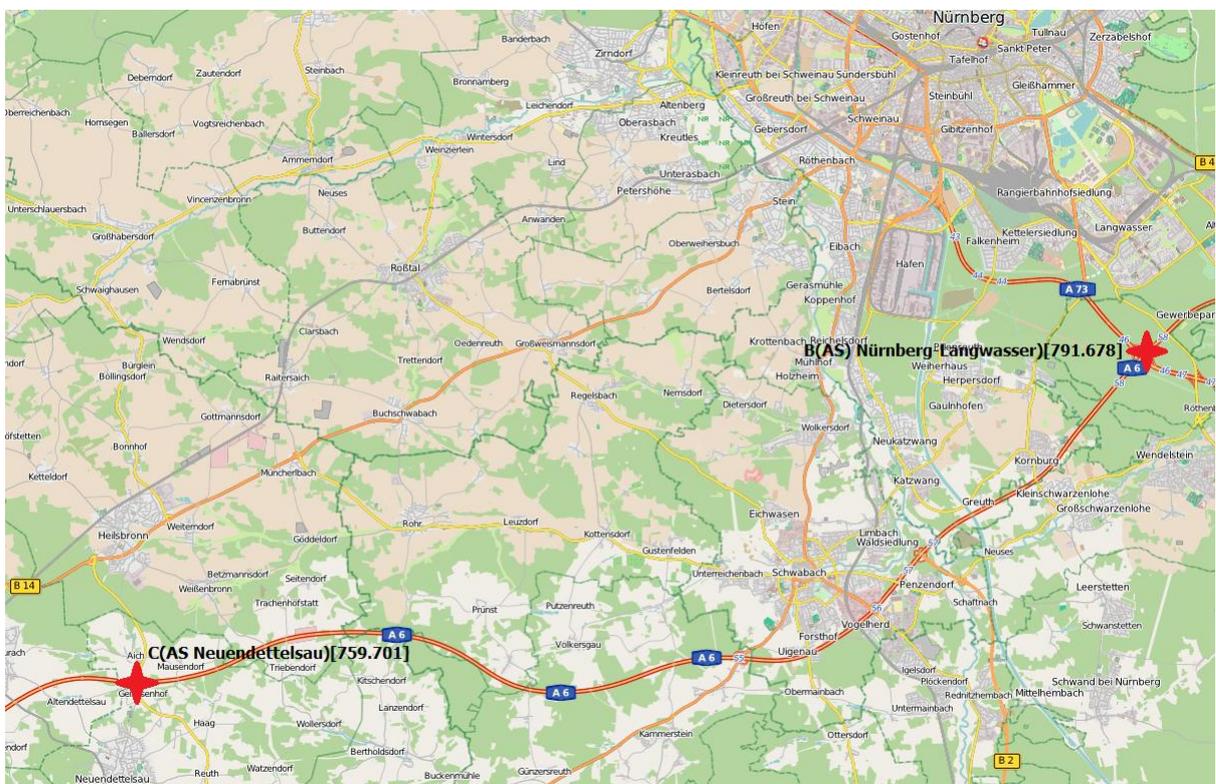


Abb. 8.2: Streckenausschnitt A 6 – Messstationen B und C
(Daten von OpenStreetMap - Veröffentlicht unter CC-BY-SA 2.0)

8.2 Datengrundlage

Zusätzlich zu den Daten der Bluetooth-Empfangsstationen in den betreffenden Auswertezwischenräumen wurden Daten der fest installierten Induktionsschleifen rund um die Messstellen D und E erhoben. Um einen konkreteren Überblick über die eigentlichen Verkehrsstärken zu erhalten sowie die ermittelten Daten der Bluetooth-Stationen zu verifizieren, flossen hierbei die Informationen mehrere Induktionsschleifen in die Berechnung mit ein. Im Detail wären dies:

LOCATION _KONFIG_ID	MQ _ID	BEZEICH- NUNG	RICHT- UNG_ID	POSITION _KM_PHYS	KOMMENTAR
1676	299	HFS A7 NO	1	668,018	AK Biebelried (N)
1701	300	HFS A7 SW	2	668,018	AK Biebelried (N)
1911	309	HFS A7 NO	1	669,150	710 / AK Biebelried
2031	310	HFS A7 SW	2	669,150	710 / AK Biebelried
1972	240	HFS A7 NO	1	669,960	711 / AK Biebelried
2027	241	HFS A7 SW	2	669,960	711 / AK Biebelried
1811	301	HFS A7 NO	1	670,695	AK Biebelried (S)
2051	302	HFS A7 SW	2	670,695	AK Biebelried (S)
1804	242	HFS A7 NO	1	672,050	712 / Kitzingen
1912	243	HFS A7 SW	2	672,050	712 / Kitzingen
2062	244	HFS A7 NO	1	677,600	713 / Kitzingen
2000	245	HFS A7 SW	2	677,600	713 / Kitzingen
2018	246	HFS A7 NO	1	684,950	714 / Marktbreit
1841	247	HFS A7 SW	2	684,950	714 / Marktbreit

Tab. 8.2: Liste aller ausgewerteten Induktionsschleifen

Die Daten aller Messschleifen an einem Messquerschnitt in einer Fahrtrichtung werden in der Verkehrsdatenbank der Autobahndirektion Nordbayern zusammengefasst und unter dem Akronym HFS gespeichert. Zu den einzelnen Messstellen existiert eine Fülle an erfassten Daten, von denen im Rahmen dieser Arbeit nur einige Informationen extrahiert wurden. Neben der Anzahl an Fahrzeugen, getrennt nach Personen- und Lastkraftwagen, fließen außerdem die durchschnittlichen gemessenen Geschwindigkeiten der beiden Fahrzeugklassen in den 60-sekündigen Auswertezwischenräumen mit in die Evaluation ein.

8.3 Ergebnisse

8.3.1 Auswertung für den 26.01.2010

Exemplarisch für die durchgeführten Auswertungen im Januar werden hier die Ergebnisse vom 26.01.2010 dargestellt. Es handelt sich hierbei um einen typischen Tagesverlauf im Verkehrsgeschehen auf der A 7 in Fahrtrichtung Süd-West ohne jegliche Verkehrsstörungen oder gar Stauungen. Zwischen der Bluetooth-Empfänger-Station D bei der Anschlussstelle Kitzingen und der Messstelle E auf Höhe der Park- und WC-Anlage Wolfsgraben wurden nach der Validierung der Daten folgende Reisezeiten ermittelt:

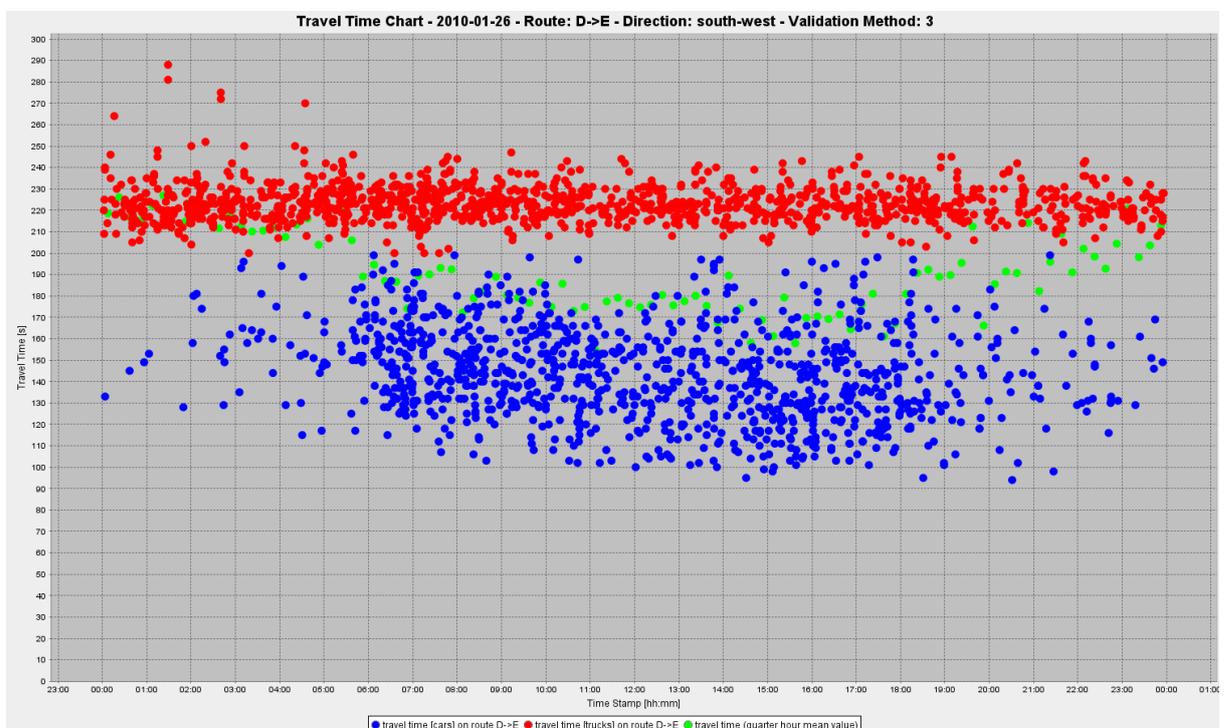


Abb. 8.3: Reisezeiten auf der Strecke D->E am 26.01.2010

Rot dargestellt werden die Reisezeiten der als LKW markierten Kfz mit Bluetooth-Modulen an Bord. Dem gegenüber symbolisieren die blauen Messwerte Reisezeiten von PKWs, also Fahrzeugen mit einer mittleren Geschwindigkeit über dem Schwellenwert von 100 Kilometern pro Stunde. Die viertelstündigen Mittelwerte der Reisezeiten aller Fahrzeuge im Testfeld werden grün dargestellt. Das Diagramm stellt, wie vorab bereits erwähnt, einen repräsentativen Verlauf auf der gewählten Autobahn dar, ohne besondere Vorkommnisse. Zu erkennen ist die deutliche Abgrenzung zwischen Lastwägen und PKWs, die sich durch ein durchgängiges Band an äußerst gering vertretenen Reisezeiten im Bereich um die 200 Sekunden darstellt. Schön zu sehen ist außerdem der relativ konstante LKW-Verkehr über den gesamten Tages-

verlauf, während bei den Personenkraftwagen eine deutliche Zunahme während den Hauptverkehrszeiten zu beobachten ist.

Aus der Betrachtung der Reisezeiten folgt direkt über die Bildung des Kehrwerts mit der Länge der Strecke die durchschnittliche Fortbewegungsgeschwindigkeit eines detektierten Bluetooth-Geräts zwischen den beiden Messstationen. Die Länge der Strecke beträgt hier etwa fünfeinhalb Kilometer, wodurch sich folgende Geschwindigkeitsverteilung ergibt:

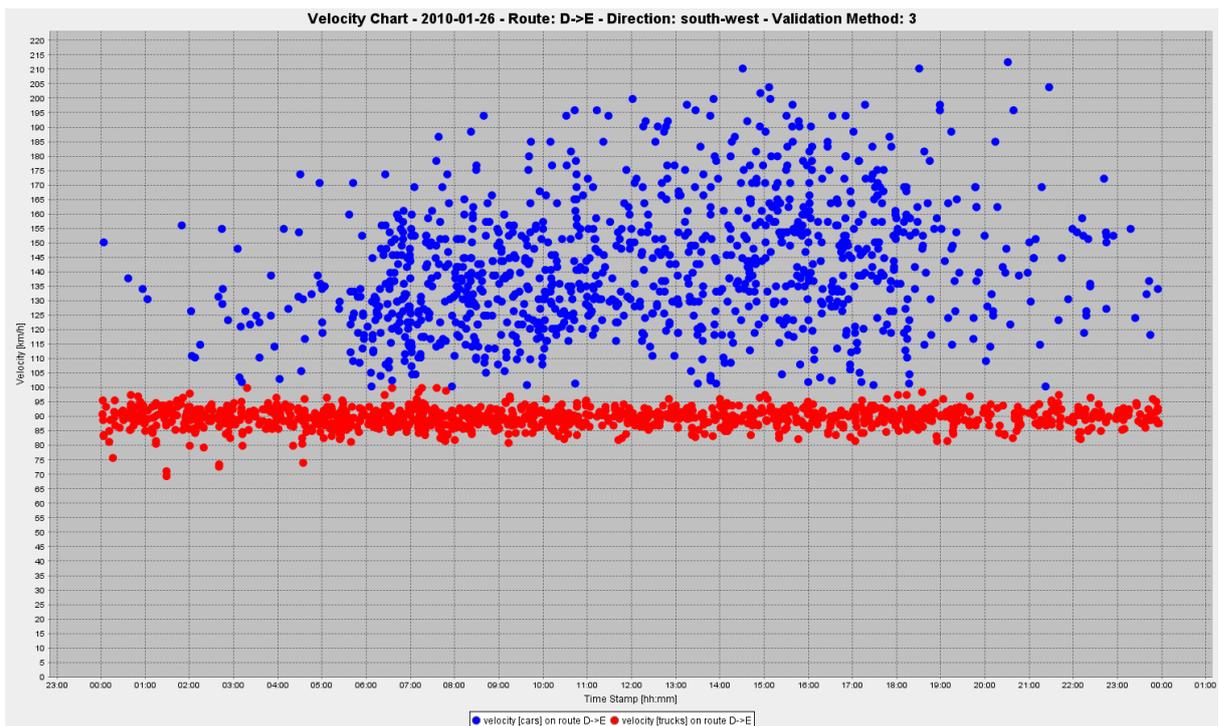


Abb. 8.4: Geschwindigkeiten auf der Strecke D->E am 26.01.2010

Auch hier zeigt sich wiederum die gut zu erkennende Trennlinie zwischen Last- und Personenkraftwagen. Zum Vergleich der ermittelten Reisezeiten aus den erfassten Bluetooth-Daten dienen nahe gelegene fest installierten Induktionsschleifen, die ebenfalls das Verkehrsaufkommen sowie gefahrene Geschwindigkeiten detektieren und an die Datenbank der Autobahndirektion übermitteln. Zur Gegenüberstellung wurde hierbei der Messquerschnitt 243 gewählt der bei Kilometer 672,05 in Fahrrichtung Süden installiert ist, exakt auf Höhe des ersten Bluetooth-Empfängers D:

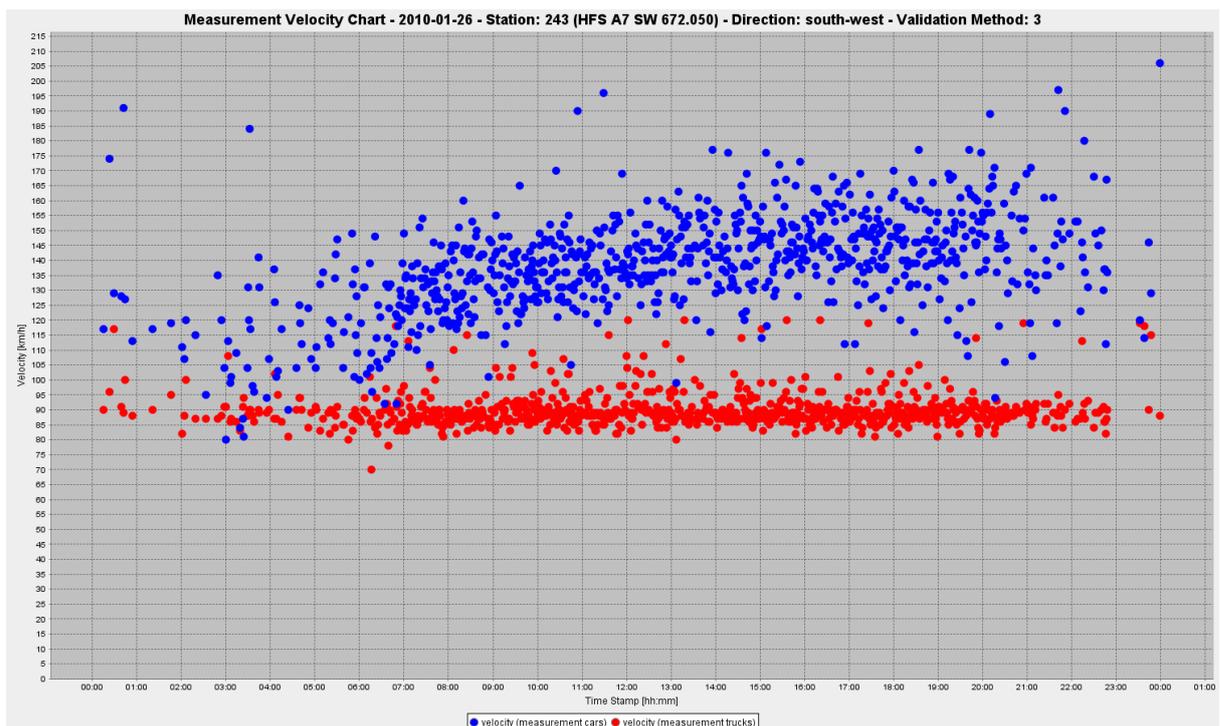


Abb. 8.5: Geschwindigkeiten bei Induktivschleife 243 am 26.01.2010

Trotz der zu erkennenden Ähnlichkeiten in der Verteilung fällt hierbei auf, dass für die Induktionsschleife weniger Messergebnisse für die frühen Morgenstunden vorliegen als bei den Bluetooth-Daten. Die Erklärung für diese Abweichung sind die niedrigen Fahrgeschwindigkeiten einiger PKWs zu diesem Zeitraum, die dadurch vom implementierten Fahrzeugtypen-Erkennungsalgorithmus als Lastwägen identifiziert werden. In vorliegendem Diagramm der Induktionsschleife würden hierbei bis circa 7:00 Uhr einige blau markierte PKWs in das relevante Raster der Fahrzeuge unter 100 km/h fallen.

Zusätzlich zu der Darstellung der einzeln gemessenen Reisezeiten und Geschwindigkeiten werden im Rahmen des erstellten Programms weitere Daten im 15-Minuten-Raster ausgewertet. Neben den durchschnittlich gefahrenen Geschwindigkeiten von LKWs, PKWs sowie detektierten Fahrzeugen im Allgemeinen, erfolgt auch eine Darstellung der in der jeweiligen Viertelstunde erfassten Anzahl an Detektionen die zu einer der drei Fahrzeugklassen ermittelt wurden. Die Farbgebung folgt hierbei dem bereits bekannten Muster: Blau für Personenkraftwägen, Rot für Lastwägen sowie Grün für den Mittelwert über alle Fahrzeuge. Geschwindigkeiten werden hierbei als durchgezogene Linie dargestellt, während die Quantitäten gestrichelt abgebildet sind. Zusätzlich beinhaltet das Diagramm den jeweiligen prozentualen Anteil an LKWs in jeder ausgewerteten Viertelstunde in Form einer gelben Linie. Eventuell vorhandene und erfolgreich detektierte Verkehrsstörungen werden durch eine schwarze Markierung für die betroffenen 15-Minuten-Takte symbolisiert.

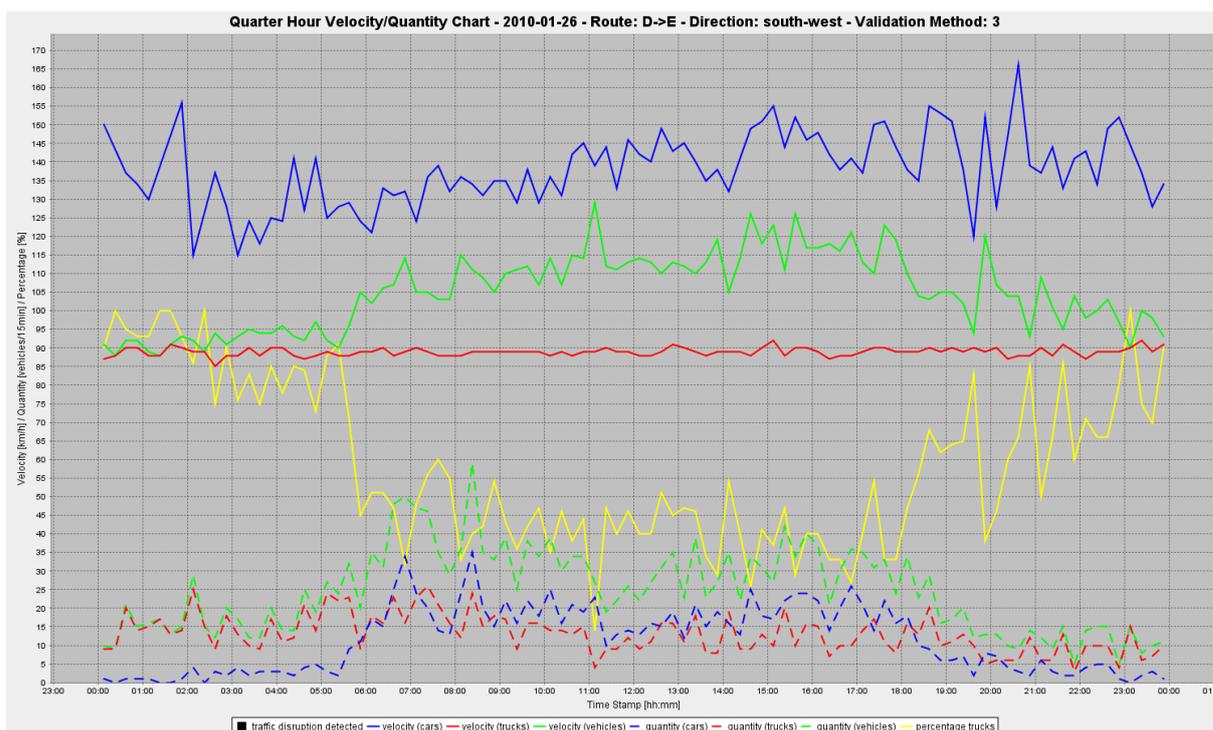


Abb. 8.6: Viertelstunden-Auswertung der Strecke D->E am 26.01.2010

Ab 6:00 Uhr erkennt man den Beginn der Hauptverkehrszeit durch eine rapide Zunahme der Personenkraftwagen. Der Anteil der LKWs sinkt von circa 90 Prozent in den frühen Morgenstunden auf etwa 40 Prozent ab. Daraus resultiert auch eine höhere mittlere Geschwindigkeit aller erfassten Fahrzeuge, die sich während der Tageszeit auf etwa 115 Kilometer pro Stunde einpendelt.

Zusätzlich zur Auswertung in Diagrammform werden alle als relevant einzustufenden Ergebnisse in Textform in einer Output-Datei zusammengefasst. Diese beinhaltet neben einer Zusammenfassung aller wichtigen Resultate zu Beginn mehrere komplette Datensätze in den verschiedenen Phasen der Evaluierung und Validierung der Daten. Diese Datensätze können zur weiteren Auswertung, falls erforderlich, zu einem späteren Zeitpunkt durch ihre CSV-Kompatibilität in Tabellenkalkulationsprogramme wie Microsoft Excel oder OpenOffice Calc importiert werden. Die zusammengefassten Resultate zu Beginn der Datei bestehen im Regelfall aus vier separaten Teilen. Im ersten Abschnitt finden sich die Daten zu den beiden Bluetooth-Stationen sowie der daraus resultierenden Route. Der zweite sowie der dritte Teil beinhalten Daten der beiden Induktionsschleifen, die den relativ kleinsten Abstand zu den beiden Bluetooth-Empfängern haben. Durch den Vergleich zwischen den Informationen dieser beiden Schleifen sowie den Bluetooth-Daten aus dem ersten Bereich, werden in Abschnitt vier die Detektionsraten der einzelnen Stationen sowie der Route als Ganzes ermittelt.

Die exemplarische Auswertung der Daten zum 26. Januar 2010 für die Fahrtrichtung Süd zwischen den Messstellen D und E stellt sich folgendermaßen dar:

evaluation for route D->E: [distance: 5548m] (direction: south-west)
 devices recognized on receiver D (km672.051): 5755 (with multiple: 6150)
 devices recognized on receiver E (km677.6): 6049 (with multiple: 6601)
 pairs on the route: after validation: 2362 (before validation: 2424)
 travel time mean value: 186s
 peak quarter hour: 08:15:00-08:30:00 (59 vehicles)
 2362 vehicles (53% trucks): 107km/h
 1100 cars: 138km/h
 1262 trucks : 89km/h

nearest measurement station to bluetooth station D: 243 - 712 / Kitzingen (km672.05)
 (direction: south-west)
 number of usable measurements: 5456 (total: 6488)
 peak quarter hour: 01:00:00-01:15:00 (280 vehicles)
 5456 vehicles (36% trucks): 120km/h
 3472 cars: 138km/h
 1984 trucks : 89km/h

nearest measurement station to bluetooth station E: 245 - 713 / Kitzingen (km677.6)
 (direction: south-west)
 peak quarter hour: 01:00:00-01:15:00 (280 vehicles)
 number of usable measurements: 6192 (total: 7582)
 6192 vehicles (38% trucks): 118km/h
 3784 cars: 137km/h
 2408 trucks : 89km/h

station detection rate:
 D: 44% $((5755/6488)*0.5)$
 E: 39% $((6049/7582)*0.5)$
 total route: 33% $(2362/((6488+7582)*0.5))$

Abb. 8.7: Beispielauswertung für die Strecke D->E am 26.01.2010

In Zeile eins des ersten Abschnitts finden sich allgemeine Daten zu der untersuchten Strecke. Die folgenden beiden Zeilen enthalten die Anzahl der erfassten Bluetooth-Module innerhalb des 24-stündigen Testzeitraums ohne sowie mit Einbezug der Mehrfachdetektionen. In Zeile vier wird die Anzahl der wiedererkannten Bluetooth-Pärchen auf der Route angezeigt, also Detektionen von ein und derselben Geräte-Kennung an Start- und Endstation der Teststrecke. Die ermittelte Anzahl wird hierbei unterschieden nach Pärchen vor und nach der Validierung, in der unplausibel hohe sowie wie unrealistisch niedrige Reisezeiten gefiltert werden. Im Anschluss folgt die durchschnittliche Reisezeit des ganzen Tages sowie die Spitzenviertelstunde, in der die meisten Fahrzeuge detektiert wurden. In den letzten drei Zeilen des ersten Abschnitts finden sich die jeweiligen Quantitäten sowie mittleren Geschwindigkeiten der Fahrzeugkategorien.

Der zweite Abschnitt fasst die Daten der Induktionsschleife zusammen die sich in der Nähe der ersten Bluetooth-Station der untersuchten Route befindet. In vorliegendem

Beispiel ist dies die Messschleife 243, die ebenfalls bei Kilometer 672,05 liegt. Unter dem Begriff brauchbare Messungen sind alle Datensätze zusammengefasst, die zu jeder Detektion von Fahrzeugen auch eine mittlere Geschwindigkeit dazu liefern. Detektionen, die beispielsweise zwar einen LKW erkannt haben, aber keine dazugehörige Geschwindigkeit, werden hier aussortiert und als nicht brauchbar abgelegt. Ebenso wie für die Bluetooth-Daten wird auch für die fest installierten Messstationen die Spitzenviertelstunde dargestellt sowie die Anzahl und die durchschnittliche Geschwindigkeit der einzelnen Fahrzeugtypen.

Dazu analog befasst sich der dritte Teil der Auswertung mit den Daten der Messschleife die in kürzester Entfernung zum Ende der Messstrecke fest installiert ist.

Der letzte Abschnitt stellt die ermittelten Detektionsquoten dar, die sich aus den Bluetooth-Detektionen der beiden Station sowie den erfassten Fahrzeugen der beiden Induktionsschleifen berechnen. Die Detektionsquote für eine einzelne Station resultiert aus dem Verhältnis zwischen der – richtungsbezogen korrigierten – halbierten Anzahl an detektierten Fahrzeugen des Bluetooth-Geräts und der total detektierten Fahrzeuge der nächstgelegenen Induktionsschleife. Für die Routen-Detektionsquote wird die Anzahl an Bluetooth-Pärchen nach der Validierung durch die mittlere Anzahl an Fahrzeugen geteilt, die an den beiden Induktionsschleifen gemessen wurden.

8.3.2 Auswertung für den 23.06.2010

Im Juni erfolgte auf der bereits bekannten Teststrecke auf der A 7 zwischen Ulm und Würzburg eine weitere Messung mit Bluetooth-Geräten der neuern Generation BLIDS V30. Beispielhaft ist für diesen Zeitraum die 24-stündige Messung vom 23.06.2010 herausgegriffen um die Resultate darzustellen. Betrachtet wird die Richtungsfahrbahn nach Norden. also von der Messstation E (PWC Wolfsgraben) nach D (AS Kitzingen). Als Vergleichswerte dienen die Messdaten der Induktionsschleifen am Messquerschnitt 242 bei Kilometer 672,050, exakt auf Höhe der Anschlussstelle.

Interessant ist hierbei der kurzzeitige Einbruch in der Anzahl der Fahrzeuge etwa zwischen 4:15 Uhr und 4:45 Uhr früh. Die Ursache für diesen Einbruch ist unbekannt, er tritt jedoch sowohl bei den Daten der Bluetooth-Stationen sowie auch bei denen der Induktionsschleifen auf, was auf eine kurzzeitige Sperrung der Autobahn oder ähnliches hindeuten könnte:

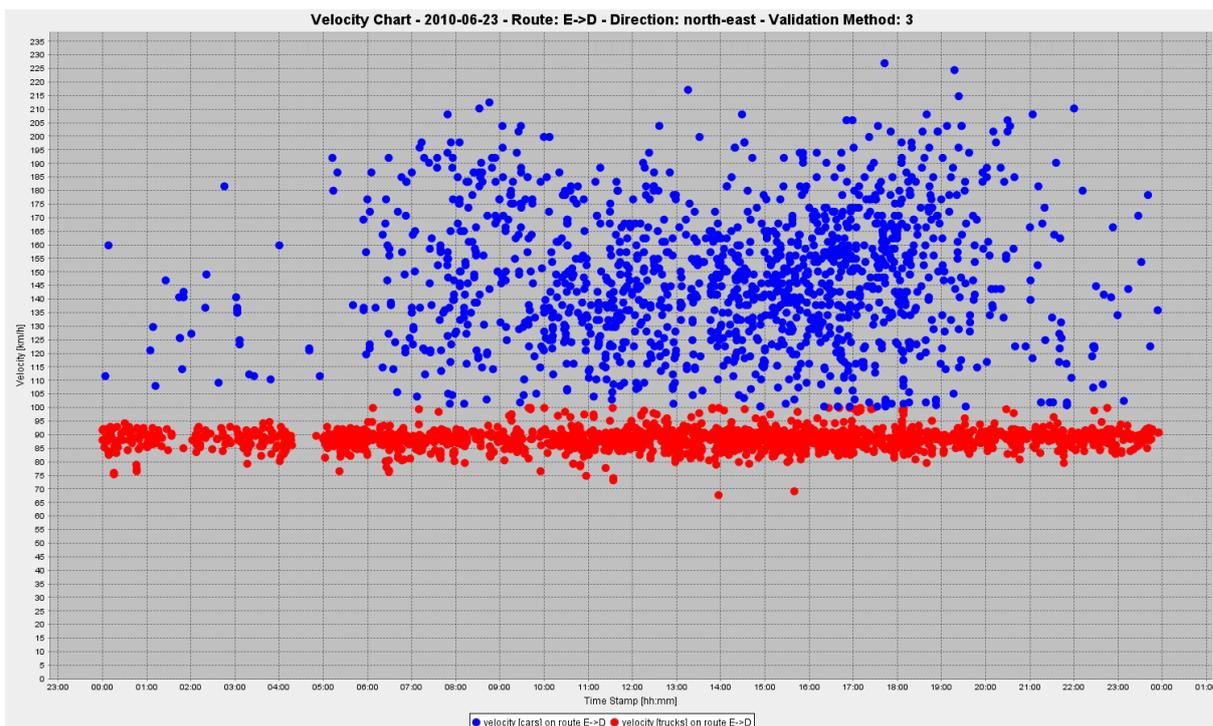


Abb. 8.8: Geschwindigkeiten auf der Strecke E->D am 23.06.2010

Ebenso ist das Fehlen von Messdaten in diesem Zeitraum bei den Daten der Messschleifen zu erkennen:

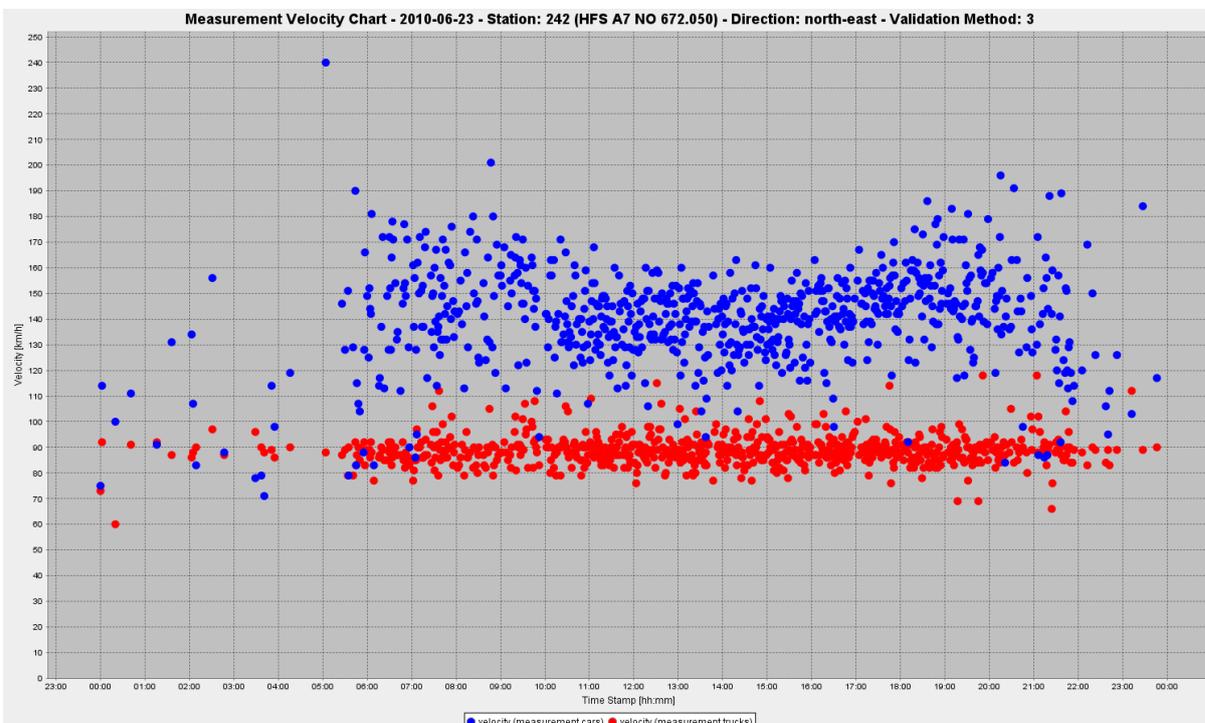


Abb. 8.9: Geschwindigkeiten bei Induktivschleife 242 am 23.06.2010

In der Auswertung der viertelstündigen Mittelwerte stellt sich das Ergebnis wie folgt dar:

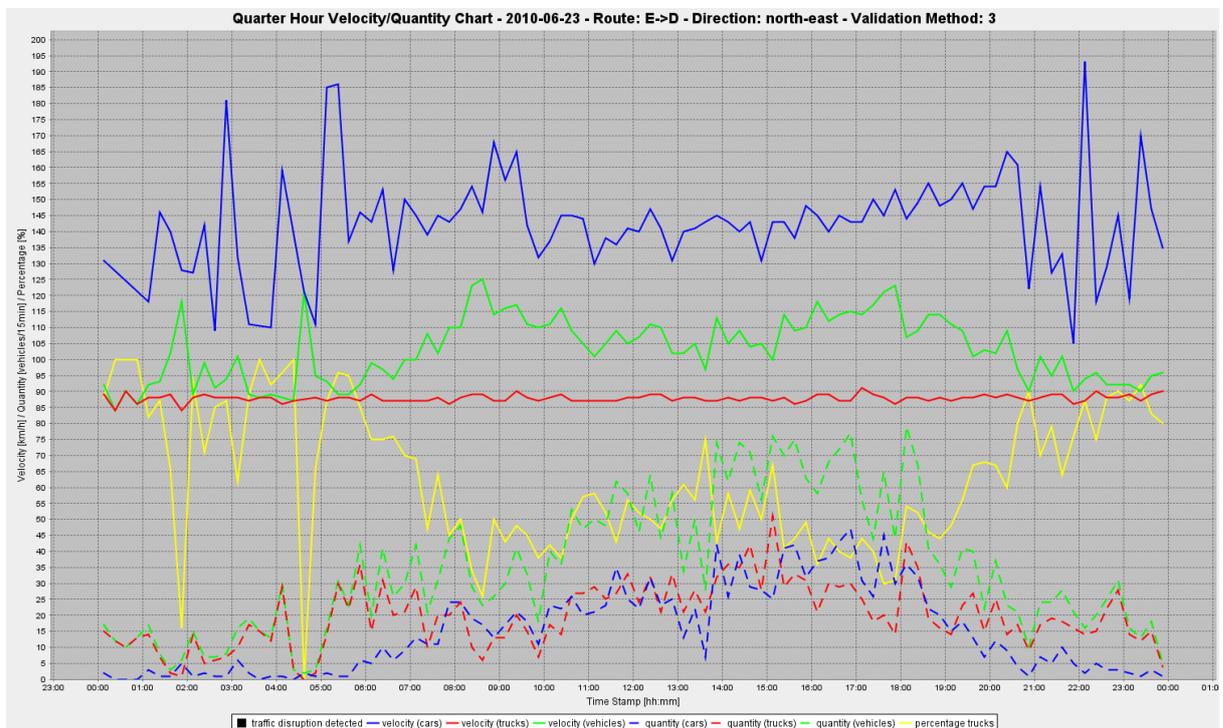


Abb. 8.10: Viertelstunden-Auswertung der Strecke E->D am 23.06.2010

Auch hier ist der Einschnitt in den Fahrzeug-Quantitäten zwischen vier und fünf Uhr morgens erkennbar. Weder LKWs noch PKWs werden in diesem Zeitraum erfasst. Alle weiteren Resultate der Auswertung ähneln den Datensätzen die bereits im Rahmen dieser Arbeit für die Testauswertung im Januar auf der Gegenfahrbahn erstellt wurden. Schön zu erkennen sind die relativ konstanten Durchschnittsgeschwindigkeiten während den Hauptverkehrszeiten tagsüber, sowie die teils stark schwankenden Geschwindigkeiten in der Nacht beziehungsweise in den frühen Morgenstunden.

In der Auswertungsdatei für diese Strecke im Juni 2010 erkennt man die stark erhöhten Stations-Detektionsquoten der neuen Bluetooth-Module im Vergleich zu den Geräten der alten Baureihe BLIDS V20. Quoten von bis zu 70 Prozent wurden hierbei ermittelt. Zu berücksichtigen ist hier aber wiederum die bereits vorab in dieser Ausarbeitung erwähnte Detektion von mehreren Bluetooth-Geräten pro Fahrzeug, wodurch der reale Erfassungsgrad von Fahrzeugen wohl niedriger liegt:

evaluation for route E->D: [distance: 5548m] (direction: north-east)
 devices recognized on receiver E (km677.6): 8658 (with multiple: 10227)
 devices recognized on receiver D (km672.051): 9265 (with multiple: 11191)
 pairs on the route: after validation: 3349 (before validation: 3427)
 travel time mean value: 188s
 peak quarter hour: 18:00:00-18:15:00 (79 vehicles)
 3349 vehicles (56% trucks): 105km/h
 1445 cars: 143km/h
 1904 trucks : 88km/h

nearest measurement station to bluetooth station E: 244 - 713 / Kitzingen (km677.6)
 (direction: north-east)
 number of usable measurements: 6578 (total: 7267)
 peak quarter hour: 01:00:00-01:15:00 (214 vehicles)
 6578 vehicles (39% trucks): 125km/h
 4011 cars: 147km/h
 2567 trucks : 90km/h

nearest measurement station to bluetooth station D: 242 - 712 / Kitzingen (km672.05)
 (direction: north-east)
 peak quarter hour: 01:00:00-01:15:00 (214 vehicles)
 number of usable measurements: 5706 (total: 6559)
 5706 vehicles (38% trucks): 119km/h
 3484 cars: 139km/h
 2222 trucks : 88km/h

station detection rate:
 E: 59% $((8658/7267)*0.5)$
 D: 70% $((9265/6559)*0.5)$
 total route: 48% $(3349/((7267+6559)*0.5))$

Abb. 8.11: Beispielauswertung für die Strecke E->D am 23.06.2010

8.3.3 Auswertung für den 25.09.2009

Um den Störungserkennungs-Algorithmus zu testen wurde zusätzlich eine Auswertung am 25. September 2009 vorgenommen. Die zugehörige Teststrecke befindet sich auf der Bundesautobahn A 6 zwischen den Bluetooth-Stationen C bei der Anschlussstelle Neuendettelsau bei Kilometer 759,701 und B an der Anschlussstelle Nürnberg-Langwasser (Kilometer: 791,678). An genanntem Datum war über einen Zeitraum von etwa zehn Stunden eine größere Verkehrsstörung in Fahrtrichtung Nürnberg zu beobachten, die sich anschaulich in der vorgenommenen Auswertung darstellt und dazu eignet den implementierten Algorithmus näher zu erläutern.

Bei der Betrachtung der Reisezeiten auf der insgesamt fast 32 Kilometer messenden Teststrecke ist ab circa 10:45 Uhr ein stetiges Ansteigen zu beobachten. Erst ab etwa 15:30 Uhr, also fast fünf Stunden später, scheint die Ursache der Verkehrsstörung behoben zu sein, da ab diesem Zeitpunkt die Reisezeiten auf der Strecke langsam abnehmen. Gegen 20:30 Uhr haben sich die benötigten Fahrzeiten zwischen

den beiden Bluetooth-Empfängern wieder auf der Höhe des Vormittags-Wertes stabilisiert, womit die Verkehrsstörung in ihren Auswirkungen als beendet gelten darf:

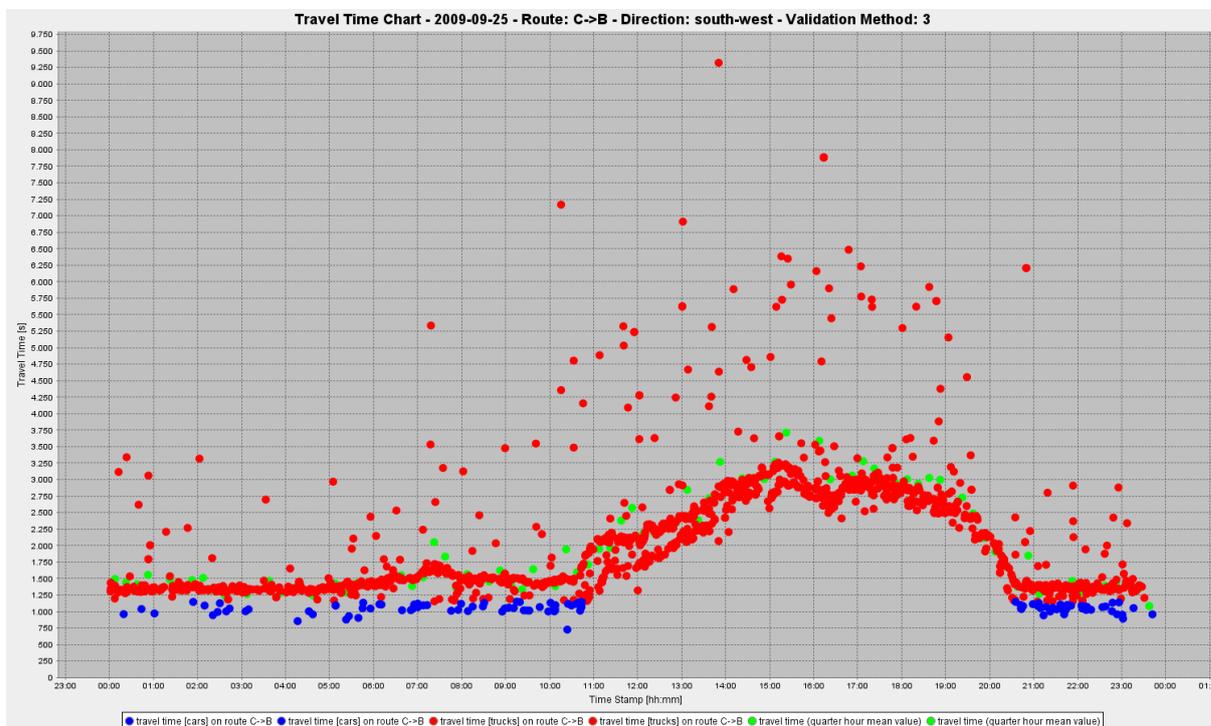


Abb. 8.12: Reisezeiten auf der Strecke C->B am 25.09.2009

Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten sinken im Vergleichszeitraum von durchschnittlich etwa 80 Kilometern pro Stunde am Vormittag auf teilweise knapp 30 km/h während der Verkehrsstörung:

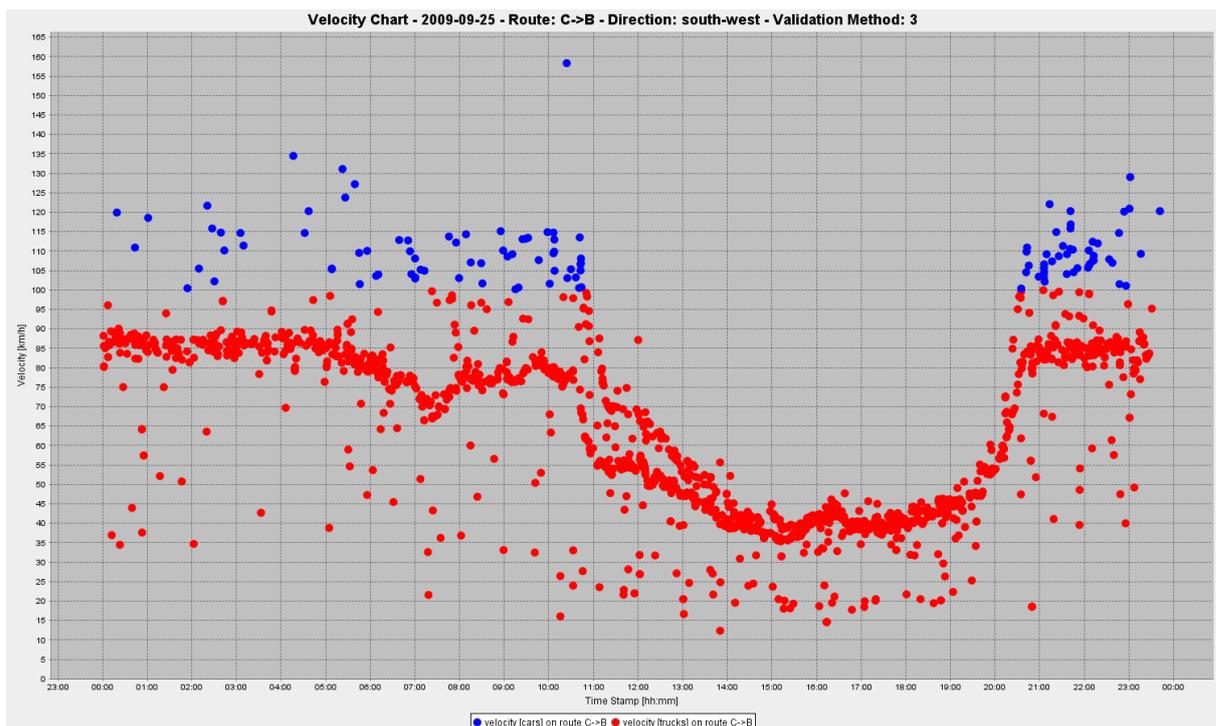


Abb. 8.13: Geschwindigkeiten auf der Strecke C->B am 25.09.2009

An nachfolgendem Diagramm, welches die 15-Minuten-Auswertung des Programms zeigt, erkennt man – schwarz markiert – die Viertelstunden-Bereiche in denen der Algorithmus eine mögliche Verkehrsstörung erkannt hat. Maßgebende Kriterien hierfür sind nach den derzeitigen Vorgaben eine Durchschnittsgeschwindigkeit von unter 80 km/h sowie keine Überschreitung der Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h. Diese Kennzeichen treten auf der Teststrecke bereits in den Morgenstunden vereinzelt auf. Ab 10:45 Uhr jedoch erkennt der Algorithmus eine massive Beeinträchtigung der Geschwindigkeiten über einen Zeitraum von etwa zehn Stunden des untersuchten Tages.

Die Geschwindigkeit die hierbei für Personenkraftwagen angegeben ist, ist bei der Betrachtung des Diagramms zu vernachlässigen, da automatisch alle Fahrzeuge unter dem derzeit gewählten Schwellenwert von 100 Kilometern pro Stunde als Lastwagen erkannt werden, wodurch in einer Störung automatisch alle detektierten Bluetooth-Module als LKWs markiert werden. Erkennbar ist dies daran, dass sowohl die pro Viertelstunde ausgegebene Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzeuge allgemein sowie der Lastkraftwagen im spezifischen identisch ist, wie auch die Anzahl dieser beiden Fahrzeugkategorien:

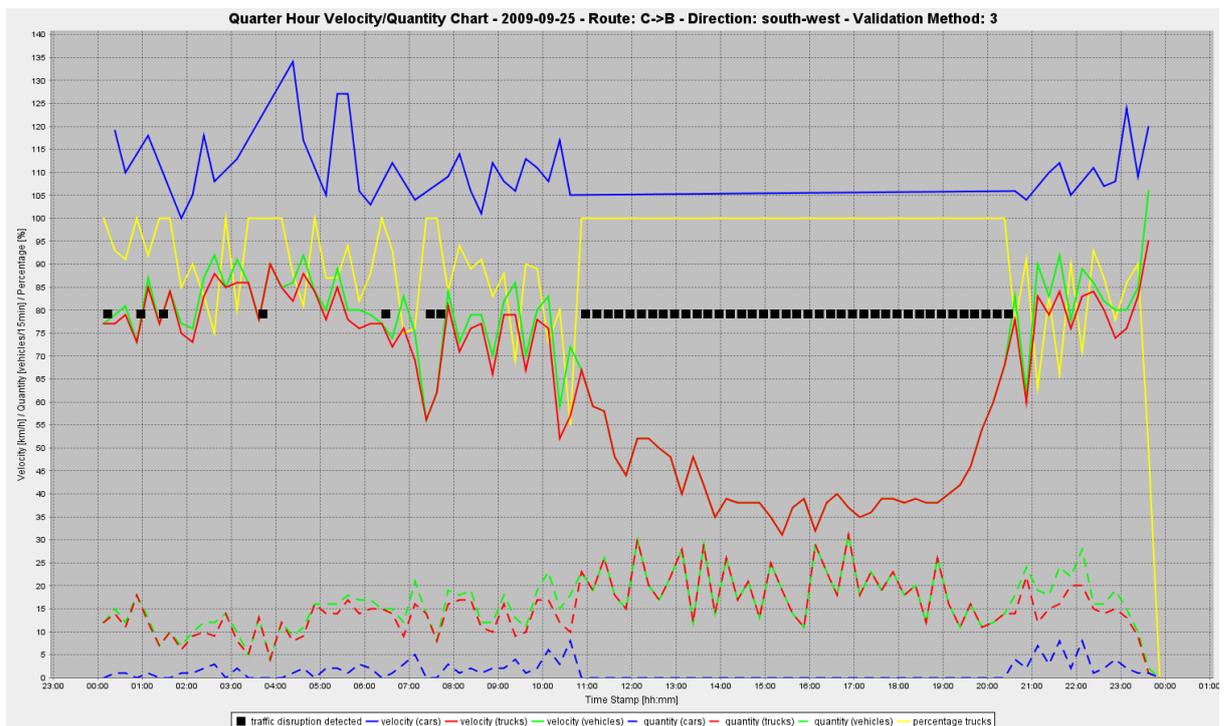


Abb. 8.14: Viertelstunden-Auswertung der Strecke C->B am 25.09.2009

Der Vollständigkeit halber wird auch für das hier untersuchte Beispiel der relevante Inhalt der Output-Datei angefügt, auch wenn der Vergleich mit lokalen Messschleifen bei der Störungserkennung nicht im Vordergrund steht und deshalb hierbei vernachlässigt wurde.

```

evaluation for route C->B: [distance: 31976m] (direction: south-west)
devices recognized on receiver C (km759.701): 7106 (with multiple: 7370)
devices recognized on receiver B (km791.678): 15682 (with multiple: 16344)
pairs on the route: after validation: 1578 (before validation: 1718)
travel time mean value: 2071s
peak quarter hour: 16:45:00-17:00:00 (31 vehicles)
1578 vehicles (92% trucks): 55km/h
114 cars: 109km/h
1464 trucks : 53km/h

```

Abb. 8.15: Beispielauswertung für die Strecke C->B am 25.09.2009

GLOSSAR

Bluetooth-Kennung / Bluetooth-Stationsadresse

weltweit eindeutige und zweifelsfreie Identifikationsnummer eines jeden Bluetooth-Geräts

Bluetooth-Pärchen

zweifach erfasste Bluetooth-Kennung, die sowohl am Beginn der betrachteten Route, wie auch an deren Ende durch die installierten Empfänger erfolgreich detektiert wurde

Mehrfachdetektion

mehrmalige Detektion ein und desselben passierenden Bluetooth-Geräts an einer Empfängerstation während einem einmaligen Vorbeifahren an dem betrachteten Messquerschnitt

Stations-Detektionsquote

Verhältnis von brauchbaren Detektionen durch die Bluetooth-Empfängerstationen zur Gesamtanzahl an erfassten Fahrzeugen durch die Induktionsschleifen

Routen-Detektionsquote

gibt an, wie viele Bluetooth-Pärchen zwischen zwei Bluetooth-Empfängerstation erfasst wurden im Verhältnis zum durchschnittlich gemessenen Verkehrsaufkommen auf der Strecke durch die Induktionsschleifen

QUELLENVERZEICHNIS

Literaturverzeichnis

LÜDERS, CHRISTIAN 2007

Lokale Funknetze. Vogel Verlag Würzburg, 2007

MAZDA MOTORS DEUTSCHLAND GMBH, KUNDENINFORMATIONSZENTRUM 2010

aus E-Mail-Verkehr vom 14.09.2010. Leverkusen, 2010

MERKLE, ANDREAS / TERZIS, ANESIS 2002

Digitale Funkkommunikation mit Bluetooth. Franzis Verlag Poing, 2002

MULLER, NATHAN J. 2001

Bluetooth. mitp Verlag Bonn, 2001

RECKER, CHRISTINA 2008

Bachelorarbeit: Qualitätsanalyse eines automatischen
Kennzeichenerfassungssystems. München, 2008

SCHNIEDER, ECKEHARD 2007

Verkehrsleittechnik - Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs.
Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2007

SPANGLER, MATTHIAS 2010

Deriving travel times in road networks using Bluetooth-based vehicle re-
identification: Experiences from Northern Bavaria. München, 2010

SPANGLER, MATTHIAS 2009

Reisezeitbasierte Verfahren für die Verkehrszustandsanalyse von städtischen
Hauptverkehrsstraßen. Technische Universität München Lehrstuhl für
Verkehrstechnik Verlag München, 2009

TOYOTA DEUTSCHLAND GMBH, KUNDENBETREUUNG 2010

aus E-Mail-Verkehr vom 02.09.2010. Köln, 2010

WEINZERL, JOHANNES / TRSEK, MARTIN / GRINSCHGL, ANDREAS / KROTTMAIER, GERHARD
2010

Endbericht BLIDS-Network im Auftrag der Autobahndirektion Nordbayern
14.07.2010. Grambach, 2010

WOLLERT, JÖRG F. 2002

Das Bluetooth Handbuch. Franzis Verlag Poing, 2002

Verzeichnis der Internetquellen

BLUETOOTH SIG, SPECIAL INTEREST GROUP 2006

Press Release: Bluetooth Wireless Technology surpasses one billion devices, in:
<http://www.bluetooth.com/English/Press/Pages/PressReleasesDetail.aspx?ID=57>
(Zugriff am: 07.09.2010)

BUNDESVERFASSUNGSGERICHT, ERSTER SENAT 2008

Urteil des Ersten Senats vom 11. März 2008 - 1 BvR 2074/05, in:
http://www.bundesverfassungsgericht.de/entscheidungen/rs20080311_1bvr207405.html (Zugriff am: 11.09.2010)

HOLMES, PETER 2008

Class of Device constants, in:
http://www.handheld-basic.com/documentation/text/page_1763.html (Zugriff am:
09.09.2010)

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 3.1: Beispiel für ein einzelnes Bluetooth-Pärchen.....	23
Abb. 3.2: Beispiel für zwei Bluetooth-Pärchen mit derselben Kennung.....	24
Abb. 3.3: Beispiel für Bluetooth-Rohdaten	26
Abb. 3.4: Beispiel für Daten nach der Sortierung nach Bluetooth-Kennungen	26
Abb. 3.5: Beispiel für Daten nach der Filterung der Mehrfachdetektionen	27
Abb. 3.6: Beispiel für Daten vor der Identifikation von Bluetooth-Pärchen	27
Abb. 3.7: Beispiel für Daten nach der Identifikation von Bluetooth-Pärchen	29
Abb. 3.8: Exemplarische Mehrfachdetektion einer Bluetooth-Kennung am 24.06.2010	30
Abb. 3.9: Exemplarische Detektionen eines Fahrzeugs zu verschiedenen Zeitstempeln.....	32
Abb. 3.10: Exemplarische Detektionen eines Fahrzeugs zu verschiedenen Zeitstempeln mit Fehler.....	32
Abb. 4.1: Reisezeit-Rohdaten ohne jegliche Filterung.....	36
Abb. 4.2: Vergleich: ohne und mit Filterung von niedrigen Geschwindigkeiten	37
Abb. 4.3: Schwellenwert-Bereiche der Filterung anhand 24-Stunden-Mittelwert.....	40
Abb. 4.4: Schwellenwert-Bereiche der Filterung anhand Viertelstunden-Mittelwert ..	43
Abb. 5.1: Beispiel einer erkannten Störung auf einer Autobahn.....	53
Abb. 6.1: Exemplarische Hüllkurven einer Induktionsschleife	55
Abb. 6.2: Diagramm mit Geschwindigkeiten auf Basis von Daten der Induktionsschleife 245.....	56
Abb. 6.3: Diagramm mit Geschwindigkeiten auf Basis von Daten der Bluetooth-Stationen D und E	57
Abb. 8.1: Streckenausschnitt A7 - Messstationen D und E (Daten von OpenStreetMap - Veröffentlicht unter CC-BY-SA 2.0).....	62
Abb. 8.2: Streckenausschnitt A 6 – Messstationen B und C (Daten von OpenStreetMap - Veröffentlicht unter CC-BY-SA 2.0)	64
Abb. 8.3: Reisezeiten auf der Strecke D->E am 26.01.2010	66
Abb. 8.4: Geschwindigkeiten auf der Strecke D->E am 26.01.2010.....	67

Abb. 8.5: Geschwindigkeiten bei Induktivschleife 243 am 26.01.2010	68
Abb. 8.6: Viertelstunden-Auswertung der Strecke D->E am 26.01.2010.....	69
Abb. 8.7: Beispielauswertung für die Strecke D->E am 26.01.2010	70
Abb. 8.8: Geschwindigkeiten auf der Strecke E->D am 23.06.2010.....	72
Abb. 8.9: Geschwindigkeiten bei Induktivschleife 242 am 23.06.2010	72
Abb. 8.10: Viertelstunden-Auswertung der Strecke E->D am 23.06.2010.....	73
Abb. 8.11: Beispielauswertung für die Strecke E->D am 23.06.2010	74
Abb. 8.12: Reisezeiten auf der Strecke C->B am 25.09.2009	75
Abb. 8.13: Geschwindigkeiten auf der Strecke C->B am 25.09.2009.....	76
Abb. 8.14: Viertelstunden-Auswertung der Strecke C->B am 25.09.2009.....	77
Abb. 8.15: Beispielauswertung für die Strecke C->B am 25.09.2009	77

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 2.1: Leistungsklassen [vgl. WOLLERT 2002, S. 52] , [vgl. MERKLE 2002, S. 89] ...	4
Tab. 2.2: Vergleich der Detektionsquoten auf den beiden Richtungsfahrbahnen.....	10
Tab. 3.1: Datentabelle STAGE_BT_DATEN / STAGE_BT_DATEN_HIST	15
Tab. 3.2: Liste der Bluetooth-Messstationen und deren Bezeichnung	16
Tab. 3.3: Datentabelle MQ_WERT	17
Tab. 3.4: Datentabelle MQ_LOCATION_CONFIG	19
Tab. 3.5: Datentabelle LOCATION_KONFIG	20
Tab. 3.6: Vergleichswerte Stations-Detektionsquote Juni 2010	24
Tab. 3.7: Vergleichswerte Routen-Detektionsquote Juni 2010.....	25
Tab. 3.8: Vergleichswerte Stations-Detektionsquote Januar 2010.....	25
Tab. 3.9: Vergleichswerte Routen-Detektionsquote Januar 2010	25
Tab. 7.1: Betriebszeiten der unterschiedlichen Bluetooth-Messstationen	63
Tab. 7.2: Liste aller ausgewerteten Induktionsschleifen	65