

Forschungsprojekt UR:BAN-VV

Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme
und Netzmanagement – Vernetztes Verkehrssystem

Schlussbericht

**Beitrag des
Zwendungsempfängers:** **Universität Kassel
Fachgebiet Verkehrstechnik und
Transportlogistik
Mönchebergstr. 7
34125 Kassel**

zu dem Teilprojekt: **Urbane Straße**

Laufzeit: **01.01.2012 – 31.12.2015**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 19 P 11007 R gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch das



Kassel, 04.05.2016

Inhaltsverzeichnis

1	Teilprojekt “Urbane Straße“	1
1.1	Aufgabenstellung und allgemeine Ziele	1
1.2	Aufgaben der Universität Kassel	2
2	Schlussbericht zu US-1 / US-2	5
2.1	Kurzdarstellung	5
2.1.1	Aufgabenstellung der Universität Kassel	5
2.1.2	Voraussetzungen der Vorhabensdurchführung	6
2.1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
2.1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Vorhabenbeginn	7
2.1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
2.2	Eingehende Darstellung	7
2.2.1	Erzielte Ergebnisse	7
2.2.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	18
2.2.3	Nutzen des Systems	18
2.2.4	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	19
2.2.5	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	19
3	Schlussbericht zu US-3	21
3.1	Kurzdarstellung	21
3.1.1	Aufgabenstellung der Universität Kassel	21
3.1.2	Voraussetzungen der Vorhabensdurchführung	22
3.1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	22
3.1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Vorhabenbeginn	22
3.1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	22
3.2	Eingehende Darstellung	23
3.2.1	Erzielte Ergebnisse	23
3.2.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	44
3.2.3	Nutzen des Systems	44
3.2.4	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	45
3.2.5	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	45
4	Schlussbericht zu US-6	47
4.1	Kurzdarstellung	47
4.1.1	Aufgabenstellung der Universität Kassel	47
4.1.2	Voraussetzungen der Vorhabensdurchführung	48
4.1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	48
4.1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Vorhabenbeginn	48
4.1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	49
4.2	Eingehende Darstellung	49
4.2.1	Erzielte Ergebnisse	49
4.2.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	58

4.2.3	Nutzen des Systems.....	58
4.2.4	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	59
4.2.5	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Zeitplan mit Meilensteinen	6
Abbildung 2-2:	Komponenten und Schnittstellen des zentralenbasierten kooperativen Systems	8
Abbildung 2-3:	Sequenzdiagramm des zugrundeliegenden kooperativen Systems	9
Abbildung 2-4:	Fahrzeug- und Smartphoneapplikationen	10
Abbildung 2-5:	Integrierte Simulations- und Entwicklungsplattform	11
Abbildung 2-6:	Integrierte Simulations- und Entwicklungsplattform	13
Abbildung 2-7:	Darstellung von Unsicherheitsbereichen beim Grüne-Welle-Assistenten	15
Abbildung 2-8:	Restzeitinformationen auf dem Smartphone	16
Abbildung 3-1:	Komponente und Schnittstellen der Schaltzeitprognose	24
Abbildung 3-2:	Bildung von Klassengrenzen ohne (links) und mit SVM (rechts)	25
Abbildung 3-3:	Nicht lineare Verteilung von EingangsvARIABLEN (links) und durch SVM generierte Hyperebene	26
Abbildung 3-4:	Struktur eines Regressionsbaumes	27
Abbildung 3-5:	Datenmodell unter Verwendung von IV-Detektordaten mit einem Prognosehorizont von einem Umlauf	28
Abbildung 3-6:	Datenmodell unter Verwendung von ÖV-Daten für eine Prognose direkt bevorstehender Schaltzeiten	29
Abbildung 3-7:	Grünwahrscheinlichkeitsverteilung für eine Signalgruppe mittels SVM	31
Abbildung 3-8:	Signallageplan des KP Oberbilker Markt	32
Abbildung 3-9:	Signalbildverlauf der Signalgruppe A über einen Tag	33
Abbildung 3-10:	Grünwahrscheinlichkeiten mit und ohne Prognose für den KP Oberbilker Markt	34
Abbildung 3-11:	Signallageplan des KP Südring	35
Abbildung 3-12:	Signalbildverlauf der Signalgruppe DL über einen Tag	36
Abbildung 3-13:	Grünwahrscheinlichkeiten mit und ohne Prognose für den KP Südring	36
Abbildung 3-14:	Signallageplan des KP Auestadion	37
Abbildung 3-15:	Signalbildverlauf der Signalgruppe 9 über einen Tag	38
Abbildung 3-16:	Grünwahrscheinlichkeiten mit und ohne Prognose für den KP Auestadion	38
Abbildung 3-17:	Signallageplan des KP Dresdener Straße	39
Abbildung 3-18:	Signalbildverlauf der Signalgruppe 3 über einen Tag	40
Abbildung 3-19:	Grünwahrscheinlichkeiten mit und ohne Prognose für den KP Dresdener Straße	40
Abbildung 3-20:	Signallageplan des KP B83	41
Abbildung 3-21:	Signalbildverlauf der Signalgruppe 1 über einen Tag	42
Abbildung 3-22:	Grünwahrscheinlichkeiten mit und ohne Prognose für den KP B83	42
Abbildung 4-1:	Theorie der Grünbandverletzungsmethode	50
Abbildung 4-2:	Grünbandverletzungsmethode mit Parameterzuordnung	51
Abbildung 4-3:	Darstellung der FCD-Aufzeichnungspunkte und des Dateninhalts	53

Abbildung 4-4:	Teil I der Simulations- und Testumgebung für die Analyse von Koordinierungen	54
Abbildung 4-5:	Teil II der Simulations- und Testumgebung für die Analyse von Koordinierungen	55
Abbildung 4-6:	Visualisierung der Grünbänder inkl. Fahrzeugtrajektorien	56
Abbildung 4-7:	Gegenüberstellung der Ergebnisse unterschiedlicher Bewertungsmethoden	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Gegenüberstellung von prognostizierten und tatsächlich eingetretenen Schaltzeitpunkten innerhalb eines Testdatensatzes	30
Tabelle 4-1:	SI-Matrix und QSV-Einschätzung	52
Tabelle 4-2:	Qualitätsstufenschema (Default) für durchgehende Koordinierung	52

1 Teilprojekt “Urbane Straße“

1.1 Aufgabenstellung und allgemeine Ziele

Das Teilprojekt „Urbane Straßen“ zielte auf die Entwicklung von Fahrzeugfunktionen zur Emissionsreduzierung bei Fahrten im Lichtsignalgesteuerten innerstädtischen Straßennetz für den motorisierten Individualverkehr mit unterschiedlichen heutigen und zukünftigen Antriebstechnologien. Die enge Verzahnung von intelligenter Infrastruktur mit intelligenten Fahrzeugen ist Grundvoraussetzung zum Erreichen einer Emissionsreduzierung und Steigerung der Verkehrseffizienz.

Der Individualverkehr im städtischen Straßennetz, insbesondere auf dessen Hauptstraßennetz (urbane Straßen), ist heute gekennzeichnet durch vermeidbare Emissionen beim Annähern und Halten an Lichtsignalisierten Knotenpunkten. Einerseits werden mangels Vorausschau über Lichtsignalschaltzeitpunkte Kraftfahrzeuglenker nicht mit dem bestmöglichen „Horizont“ versorgt, um möglichst verbrauchs- und emissionsarm zu fahren. Andererseits werden Emissionsreduzierungen, die durch die Verringerung von Abbrems- und Beschleunigungsvorgängen des Gesamtverkehrsstroms bei nicht optimierten Signalisierungsabfolgen an aufeinanderfolgenden Knotenpunkten entstehen, heute nicht realisiert.

Ein Ausweg aus dieser Situation besteht im Daten- und Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur, hier speziell die Bereitstellung der Vorausschau für Lichtsignalschaltzeitpunkte, damit die Fahrer genau die Informationen erhalten, welche sie für ein energie- und emissionsoptimales Fahren und Halten durch das Lichtsignalgesteuerte Straßennetz benötigen. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

Für eine möglichst umfassende Wirkung aber ist die Bereitstellung nicht nur einzelner sogenannter kooperativer Lichtsignalanlagen erforderlich, sondern die möglichst flächendeckende Verfügbarkeit der Schaltzeitpunkte der im städtischen Straßennetz befindlichen Lichtsignalanlagen. So sollte in diesem Vorhaben eine zentralenbasierte Lösung entwickelt und erprobt werden, bei der die in den Verkehrszentralen in Düsseldorf und Kassel vorhandenen Lichtsignalinformationen über Mobilfunk den Verkehrsteilnehmern übermittelt und in Fahrzeugen direkt in die entsprechenden neuen Fahrzeugfunktionen umgesetzt werden. Im Gegenzug werden den städtischen Zentralen Fahrtverlaufsdaten für die Qualitätskontrolle der Signalisierung geliefert, aus denen sich sehr effizient Rückschlüsse auf die Signalisierungsqualität im Straßenverlauf ziehen lassen.

Ein besonderes Augenmerk galt zusätzlich dem Schwerlastverkehr im urbanen Raum, der auf Einzelfahrzeuge bezogen sehr viel höhere Schadstoffemissionen beim Halten und Wiederanfahren erzeugt als der einzelne Pkw. Sieht das städtische Verkehrsmanagement auf seinen Hauptverkehrsadern zur Vermeidung von Stopps heute schon oft dementsprechend koordinierte Lichtsignalschaltungen, sogenannte Grüne Wellen, vor, so sind diese in der Regel auf den Pkw-Verkehr zugeschnitten und führen dazu, dass wesentlich langsamer anführende Pulks mit LKW oft nicht durch die Grüne Welle fahren können, sondern zerrissen werden und dann einzeln vor den nachfolgenden Lichtsignalanlagen stehen bleiben und wieder anfahren müssen. Hier galt es ein Verfahren zu entwickeln, das Lichtsignalanlagen auf einer Arterie bei Bedarf und unter Bewertung der aktuellen Verkehrssituation so koordiniert, dass

ankommender Schwerverkehr durch Reduzierung bzw. Vermeidung von Pulk-Auflösungen durch die Grüne Welle mit dem geringstmöglichen Schadstoffausstoß hindurch fahren können. Hiermit verbunden war die Aufgabe, Pulks mit LKW in Zufahrten auf den nächsten Knoten frühzeitig zu erkennen, wofür sich u. a. auch das im TP „Regionale Netz“ entwickelte Verfahren zur Identifikation von mitgeführten mobilen oder fahrzeugintegrierten Endgeräten anbietet.

1.2 Aufgaben der Universität Kassel

US-1 Verzögerungsassistent / US-2 Grüne-Welle-Assistent

Im Fokus des Teilprojekts „Urbane Straße“ standen innovative Fahrzeugfunktionen, welche auch zukünftig in urbanen Straßennetzen zur Anwendung kommen sollen, um den motorisierten Individualverkehr in Städten verbrauchseffizienter zu gestalten. Dafür waren neue Fahrzeugfunktionen zu entwickeln, die auf Basis von prognostizierten LSA-Schaltzeiten entsprechende Fahrerinformationen generieren bzw. das Energiemanagement im Fahrzeug anpassen, um damit ein verbrauchsreduziertes Fahren durch das lichtsignalgesteuerte Stadtstraßenhauptnetz zu ermöglichen. Die im Fahrzeug zu realisierenden Funktionen waren:

- US-1: Verzögerungsassistent (Heransegeln, ggf. Einsatz der Bremskraftenergieerückgewinnung)
- US-2: Grüne-Welle Assistent (Hindurchsegeln)

Eine detaillierte Beschreibung der Assistentenfunktionen erfolgt in Kapitel 2. Die Universität Kassel hatte die Aufgabe, eine Smartphone-Applikation zu entwickeln, welche die genannten Fahrzeugfunktionen beinhaltet. Die Fahrerinformationen wurden so unabhängig von einem speziell ausgerüsteten Versuchsfahrzeug bereitgestellt. Im Gegenzug sendete das Smartphone Positionsdaten, welche für die Qualitätsanalyse von Grünen Wellen im Zulauf von LSA herangezogen wurden.

US-3 Schaltzeitprognose

Für eine möglichst umfassende Wirkung ist die Bereitstellung nicht nur einzelner sogenannter kooperativer Lichtsignalanlagen erforderlich, sondern die möglichst flächendeckende Verfügbarkeit der Lichtsignalschaltzeitpunkte der im städtischen Straßennetz befindlichen Lichtsignalanlagen. Dafür sollte eine zentralenbasierte Lösung entwickelt und erprobt werden, bei der die Städte Düsseldorf (Testfeld) und Kassel (Prüffeld) basierend auf den zentralenseitig vorhandenen Betriebsdaten der Lichtsignalanlagen, Lichtsignalzeitschaltpunkte und deren Prognose zur Generierung von Serviceinformationen zur Verfügung stellen. Da aber eine Vorausschau auf die Schaltzeitpunkte von Lichtsignalanlagen fehlte, die lokal verkehrsabhängig gesteuert werden, mussten dafür Verfahren und Algorithmen entwickelt und im zentralen Verkehrsmanagementsystem der Städte eingesetzt werden. Um die Übertragbarkeit der Verfahren zur Schaltzeitprognose zu gewährleisten, wurden mit Düsseldorf und Kassel zwei Testfelder ausgewählt, in denen sehr unterschiedliche Steuerungsstrategien zum Einsatz kommen. In Düsseldorf wird vorrangig mit Festzeitsteuerungen gearbeitet, wohingegen in Kassel vorwiegend verkehrsabhängige Steuerungen eingesetzt werden. Durch die Entwick-

lung der Verfahren in den beiden sehr unterschiedlichen Testfeldern sollte die Übertragbarkeit des Ansatzes sichergestellt werden. Für die Realisierung der Fahrzeugfunktionen ist die Prognose der jeweiligen LSA-Schaltzeitpunkte eine unumgängliche Voraussetzung. Aufgabe der Universität Kassel war die Entwicklung und Erprobung verschiedener Verfahren zur Prognose verkehrsabhängiger Schaltzeiten. Dabei bestand eine wesentliche Herausforderung in der Beherrschung einer großen Bandbreite diverser Verfahren zur verkehrsabhängigen Signalisierung durch die entwickelten Algorithmen.

US-4 Prognose von Haltepunkten und Haltedauern

Ergänzend zu den LSA-Schaltzeitpunktprognosen sollten die zu erwartenden Haltepunkte und Haltedauern der sich den Lichtsignalanlagen annähernden Fahrzeuge ermittelt werden. Dafür wurde ein modellbasiertes Online-Verfahren zur Schätzung der Haltedauern (Wartezeiten) und Haltepunkte (Rückstaulängen vor Lichtsignalanlagen) entwickelt und zentralseitig implementiert. Gerade die Kenntnis des individuellen Haltepunkts und der individuellen Wartezeit ist für das Fahrzeug und den Fahrer von großem Interesse und für fahrzeugseitige Anwendungen wie z. B. die adaptive Start-Stopp-Automatik essentiell. Die Verantwortung der Universität Kassel lag in diesem Arbeitskreis lediglich in der Abstimmung der erforderlichen Daten für die smartphonebasierten Applikationen.

US-5 Lkw-Pulkmanagement

Ein besonderes Augenmerk galt zusätzlich dem Schwerlastverkehr im urbanen Raum. Bezogen auf Einzelfahrzeuge erzeugt dieser sehr viel höhere Schadstoffemissionen durch Halten und Wiederanfahren als der einzelne Pkw. Sieht das städtische Verkehrsmanagement auf seinen Hauptverkehrsadern zur Vermeidung von Stopps heute schon dementsprechend koordinierte Lichtsignalschaltungen (Grüne Welle) vor, so sind diese in der Regel auf den Pkw-Verkehr zugeschnitten und führen dazu, dass wesentlich langsamer anführende Lkw-Pulks oft nicht durch die Grüne Welle fahren können, sondern aufgelöst werden und dann einzeln vor den nachfolgenden Lichtsignalanlagen stehen bleiben und wieder anfahren müssen. Hier galt es ein Verfahren zu entwickeln, das Lichtsignalanlagen auf einer Arterie bei Bedarf und unter Bewertung der aktuellen Verkehrssituation so koordiniert, dass ankommender Schwerverkehr durch Reduzierung bzw. Vermeidung von Pulk-Auflösungen durch die Grüne Welle mit dem geringstmöglichen Schadstoffausstoß hindurch fahren kann.

Durch die Vermeidung bzw. Reduzierung von Pulkauflösungen auf koordinierten LSA-Streckenzügen und durch die Abstimmung der Koordinierung unter besonderer Berücksichtigung des Lkw-Anteils sollen positive Effekte auf den Verkehrsablauf und eine Reduktion der Emissionen erzielt werden. Die Beeinflussung des Verkehrsstroms kann zum einen durch die Anpassung der LSA-Steuerung erfolgen, z.B. durch die Verlängerung der Freigabezeit, oder aber dem Fahrer wird die ihm noch zur Verfügung stehende Restgrünzeit übermittelt. In beiden Fällen soll ein unnötiges Unterbrechen des Verkehrsflusses vermieden werden. Im Rahmen dieses Arbeitspakets bestanden die Aufgaben der Universität Kassel in der Abstimmung der erforderlichen Daten für die Smartphone-Applikationen sowie in der Berücksichtigung des Lkw-Pulkmanagements innerhalb der Schaltzeitprognose.

US-6 Grüne-Welle-Qualitätsmanagement

Die aus den stadtseitig bereitgestellten Daten generierten Serviceinformationen sollten über Mobilfunk den Verkehrsteilnehmern übermittelt werden und in Fahrzeugen direkt in die entsprechenden neuen Fahrzeugfunktionen umgesetzt werden. Im Gegenzug wurden den städtischen Zentralen Fahrtverlaufsdaten für die Qualitätskontrolle der Signalisierung geliefert, aus denen sich sehr effizient Rückschlüsse auf die Signalisierungsqualität im Straßenverlauf ziehen lassen. Hierfür sollten im Arbeitskreis "US-6 Grüne-Welle-Qualitätsmanagement" neue Verfahren zur Bewertung von LSA-Koordinierung getestet, entwickelt, implementiert und erprobt werden. Neben den Fahrtverlaufsdaten standen der Zentrale auch LSA-Prozess- und Versorgungsdaten zur Verfügung, welche gleichermaßen als Eingangsdaten zur Bewertung der Koordinierungsqualität verwendet werden sollten. Als Leiter des Arbeitspaketes bestanden die wesentlichsten Aufgaben der Universität Kassel in der Grundlagenanalyse für Methoden zur Qualitätsbeurteilungen von Grünen Wellen, in der Definition von Qualitätskenngrößen sowie in der Entwicklung und Erprobung von geeigneten Bewertungsverfahren. Für die betriebliche Implementierung der entsprechenden Algorithmen in die Verkehrsmanagementzentralen in Kassel und Düsseldorf war der Projektpartner GEVAS software zuständig. Darauf aufbauend wurden Tests und Bewertungen der betrieblichen Applikation von den Projektpartnern der beiden Städte durchgeführt. Die Universität Kassel hatte ferner die Aufgaben, die einzelnen Arbeitspakete zu koordinieren und den Wissensaustausch zwischen den einzelnen Projektpartnern sicherzustellen.

2 Schlussbericht zu US-1 / US-2

2.1 Kurzdarstellung

2.1.1 Aufgabenstellung der Universität Kassel

Im Fokus des Teilprojekts „Urbane Straße“ standen innovative Fahrzeugfunktionen, welche auch zukünftig in urbanen Straßennetzen zur Anwendung kommen sollen, um den motorisierten Individualverkehr in Städten verbrauchseffizienter zu gestalten. Dafür waren neue Fahrzeugfunktionen zu entwickeln, die auf Basis von prognostizierten LSA-Schaltzeiten entsprechende Fahrerinformationen generieren bzw. das Energiemanagement im Fahrzeug anpassen, um damit ein verbrauchsreduziertes Fahren durch das Lichtsignalgesteuerte Stadtstraßenhauptnetz zu ermöglichen. Die im Fahrzeug zu realisierenden Funktionen waren:

- US-1: Verzögerungsassistenz (Heransegeln, ggf. Einsatz der Bremskraftenergieerückgewinnung)
- US-2: Grüne-Welle Assistenz (Hindurchsegeln)

Der Verzögerungsassistent (US-1) soll dabei dem Fahrer beim Zufahren auf eine Lichtsignalanlage anzeigen, dass diese mit erlaubten Geschwindigkeiten nicht bei Grün erreicht werden kann. Der Fahrer soll die Empfehlung erhalten, seine Geschwindigkeit durch Heransegeln an Lichtsignalanlage zu reduzieren. Der Grüne-Welle-Assistent (US-2) soll dem Fahrer beim Zufahren auf eine Lichtsignalanlage anzeigen, bei welcher Geschwindigkeit (im erlaubten Bereich und > 30 km/h) sie bei „grün“ erreicht werden kann.

Die Universität Kassel hatte hierbei die Aufgabe, eine Smartphone-Applikation zu entwickeln, welche die genannten Fahrzeugfunktionen beinhaltet. Dem Fahrer sind über ein Smartphone die Fahrzeugfunktionen Verzögerungsassistenz und Grüne-Welle-Assistenz unabhängig von einem speziell ausgerüstetem Versuchsfahrzeug bereitzustellen. Im Gegenzug sammelt das Smartphone Fahrtverlaufsdaten, welche bspw. für die Qualitätsanalyse von Grünen Wellen und für die Prognose von Haltepunkten und Haltedauern im Zulauf von LSA herangezogen werden.

AP 2100 & AP 2200: Spezifikation

Aufgaben: Spezifikation der Fahrzeugfunktionen “Verzögerungsassistent“ und “Grüne-Welle-Assistent“ auf Basis detaillierter Beschreibung der Fahrzeugfunktionen sowie Spezifikation der einzelnen Elemente und Ihrer Teilfunktionalitäten, die auf dem Smartphone neu zu schaffen sind inkl. Abstimmung der Datenschnittstellen für die infrastrukturseitige Applikationsentwicklung

AP 3100 & AP 3200: Implementierung

Aufgaben: Implementierung des in AP 2100 & AP 2200 spezifizierten Verzögerungsassistenten und des Grüne-Welle-Assistenten auf dem Smartphone; Aufbau einer laborhaften Entwicklungsumgebung, die sich auf ein authentisches mikroskopisches Verkehrsmodell des Testfelds Kassel stützt; nach fehlerfreien Funktion der entwickelten Smartphone-Software in

Simulationsumgebung Erprobung im öffentlichen Straßenraum; Beseitigung von Fehlern, welche sich erst entlang der vollständigen Online-Prozesskette einstellen

AP 4100 & AP 4200: Test und Demonstration

Aufgabe: Inbetriebnahme und Funktionstests des smartphonebasierten Verzögerungsassistenten und des Grüne-Welle-Assistenten im öffentlichen Straßenraum des Testfelds Düsseldorf

AP 5100 & AP 5200: Bewertung

Aufgabe: Darstellung und funktionale Bewertung der Fahrzeugfunktionen Verzögerungsassistent und Grüne-Welle-Assistent auf dem Smartphone anhand von Testfahrten mit Datenaufzeichnungen

2.1.2 Voraussetzungen der Vorhabensdurchführung

Das Smartphone kommuniziert beim zugrundeliegenden kooperativen System über Mobilfunk direkt mit einem einzigen Dienstanbieter, welcher Geoinformationsdaten sowie LSA- und Rückstauprognosedaten sammelt, aufbereitet und an die Fahrzeuge sendet. Die Erstellung und die Erprobung der Fahrzeugfunktionen waren also im Wesentlichen vom fehlerfreien Datenaustausch innerhalb der gesamten Kommunikationskette des kooperativen Systems abhängig. Darüber hinaus war für die Realisierung der Fahrzeugfunktionen die Prognose der jeweiligen LSA-Schaltzeitpunkte (US-3) sowie der Haltepunkte und Haltedauern (US-4) eine wichtige Voraussetzung.

2.1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt verlief ohne Verzögerungen nach unten aufgeführtem Zeitplan.

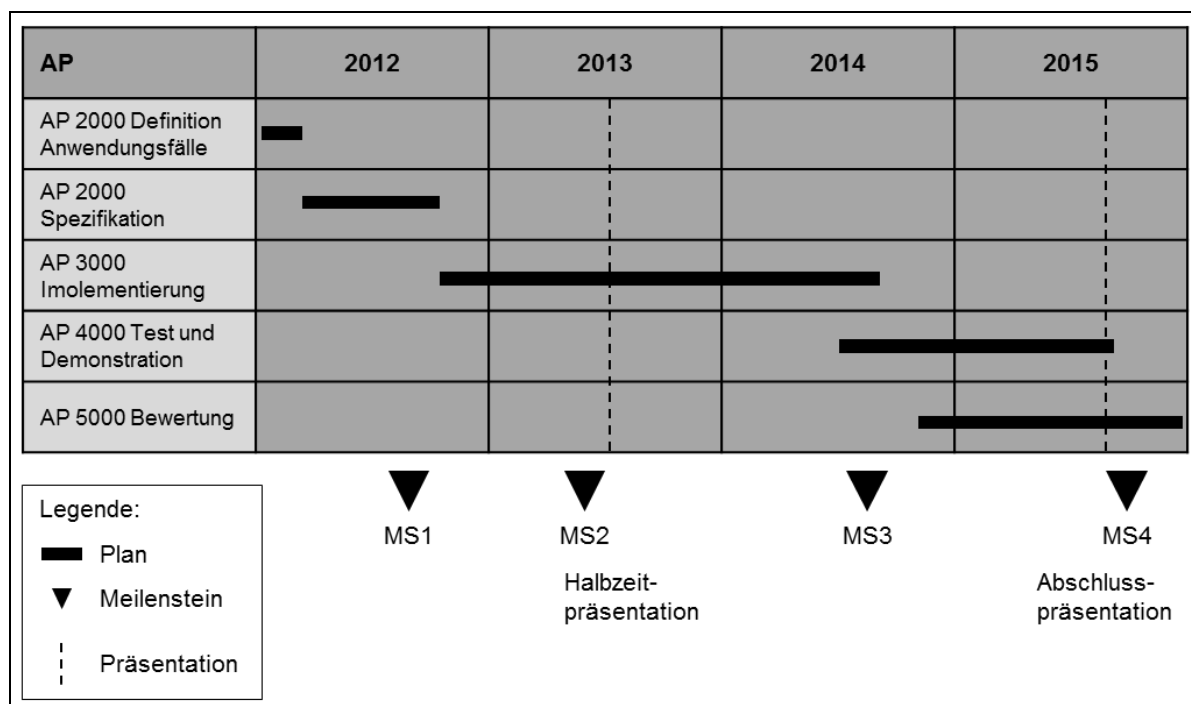


Abbildung 2-1: Zeitplan mit Meilensteinen

2.1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Vorhabenbeginn

Die Machbarkeit von Infrastruktur-Fahrzeug-Applikationen zur Bereitstellung von Signalisierungsinformationen wurde bereits im Rahmen vergangener Forschungsvorhaben wie TRAVOLUTION, AKTIV, sim^{TD} und KOLIBRI nachgewiesen. Im Gegensatz zu den bisherigen Projekten wurde im Teilprojekt UR:BAN-VV "Urbane Straße" die Machbarkeit und Praxistauglichkeit einer zentralenbasierten, flächendeckenden Informationsverteilung unter Berücksichtigung verkehrsabhängig gesteuerter LSA sowie prognostizierter Rückstaulängen untersucht. Eine besondere Herausforderung bestand also in der Datenübertragung von der LSA über die Verkehrszentrale, den Mobilitätsdaten-Marktplatz (MDM) und einen Dienstanbieter in das Fahrzeug. Das Endgerät kommunizierte über den Mobilfunk mit nur einer Komponente, dem Dienstanbieter. Aufgrund der erstmaligen Berücksichtigung von prognostizierten LSA-Schaltzeiten sowie Haltepunkten mussten neue Algorithmen und neue Anzeigeconzepte entwickelt werden.

Die Voraussetzungen für diesen zentralenbasierten Ansatz waren sowohl hinsichtlich der technischen Ausrüstung von LSA-Steuergeräten, von Verkehrsmanagementzentralen, von Dienstanbietern und von Fahrzeugen durch den aktuellen Stand der Technik nicht in der Art gegeben, als dass ein kooperatives System im Kontext des Gesamtvorhabens unmittelbar umsetzbar gewesen wäre.

2.1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In allen Arbeitspaketen war eine enge Vernetzung und Zusammenarbeit mit den Projektpartnern BMW, Continental, MAN, Stadt Düsseldorf und Kassel sowie GEVAS software gegeben. Diese Zusammenarbeit wurde zudem mit den relevanten Partnern aus UR:BAN-MIV zur Spezifikation geeigneter HMI-Konzepte erweitert. Ferner erfolgte eine intensive Zusammenarbeit mit dem Projektpartner TUM-VT, welche für die verkehrliche Bewertung der Applikationen Informationen bezüglich der Funktionsweise der Assistenzfunktionen benötigten.

2.2 Eingehende Darstellung

2.2.1 Erzielte Ergebnisse

AP 2100 & AP 2200: Spezifikation

Für die Spezifikation der Fahrerassistenzfunktionen Verzögerungsassistent und Grüne-Welle-Assistent wurden zunächst in enger Absprache mit den Projektpartnern von BMW, Conti und MAN die einzelnen Anwendungsfälle, die Zielstellungen und die grundlegenden Funktionsweisen definiert. Wie bereits beschrieben wurde im Forschungsvorhaben des vorliegenden Berichts ein zentralenbasierter kooperativer Ansatz mit V2I-Kommunikation aufgegriffen. Zentralenbasiert bedeutet in diesem Kontext, dass die Fahrzeuge nicht mit dezentral verteilten RSU kooperativer LSA, sondern über Mobilfunk direkt mit einem übergeordneten Dienstanbieter kommunizieren (Abbildung 2-2).

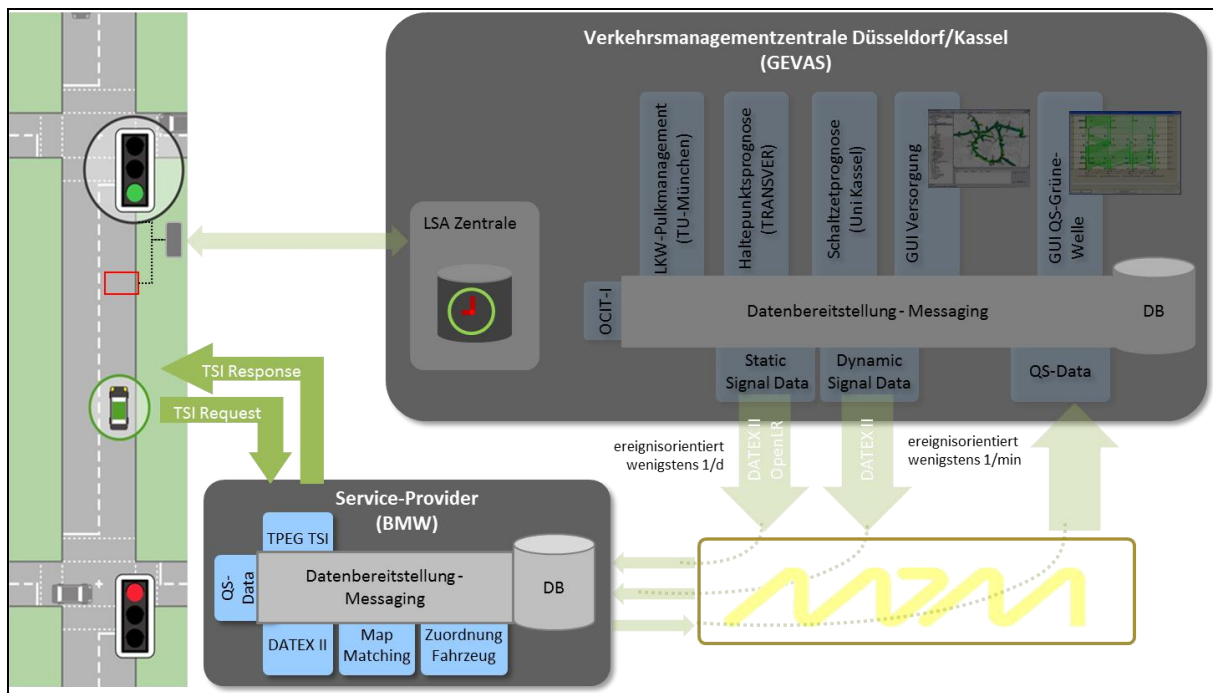


Abbildung 2-2: Komponenten und Schnittstellen des zentralen kooperativen Systems

Das zentralenbasierte kooperative System besteht im Wesentlichen aus fünf Hauptkomponenten: den im Fahrzeug befindlichen Endgeräten, der Signalsteuerung, dem Mobilitätsdaten-Marktplatz (MDM), der Verkehrszentrale und einem Serviceprovider (Dienstanbieter). Die Komponenten und die funktionalen Zusammenhänge sind in Abbildung 2-2 dargestellt. Die prinzipielle Funktionsweise lässt sich folgendermaßen beschreiben:

1. Das Fahrzeug respektive das kooperative Endgerät sendet über Mobilfunk die aktuellen Positions- und Fahrtrichtungsdaten an den Dienstanbieter.
2. Der Dienstanbieter führt mit den erhaltenen Positionsdaten ein Map-Matching durch. In Abhängigkeit der gemeldeten Fahrtrichtung werden durch den Abgleich der aktuellen Fahrzeugposition mit einer digitalen Karte die nächsten LSA bestimmt. Die Positions- und Fahrtrichtungsdaten werden über den MDM an die Verkehrsmanagementzentrale übermittelt.
3. Für die nächstgelegenen stromabwärtigen LSA werden Status- und Geoinformationen aus Datenbanken des Serviceproviders abgerufen. Hierzu ist es notwendig, dass die entsprechenden LSA kommunikationstechnisch an die Verkehrszentrale angebunden sowie georeferenziert sind. Der Dienstanbieter sammelt statische und prognostizierte Signalisierungsdaten sowie Daten über Haltepunktprognosen (Rückstau-längen), welche von der Verkehrsmanagementzentrale über den MDM bereitgestellt werden.
4. Der Dienstanbieter fasst die Daten aller Signalgruppen der entsprechenden Zufahrten zusammen und schickt sie mit einem digitalen Kartenauszug der Strecke vom aktuellen Standort bis zu den nächsten LSA an das Fahrzeug zurück.
5. Eine im Endgerät implementierte Fahrerassistenzapplikation verarbeitet die Daten

und georeferenziert fortwährend die Fahrzeugposition auf dem erhaltenen digitalen Kartenauszug. Je nach der aktuellen Lage in der Grünen Welle generieren und visualisieren entsprechende Fahrerassistenzfunktionen unterschiedliche Fahrerinformationen (US-1 oder US-2).

Neben der externen Kommunikation zwischen dem Smartphone und dem Dienstanbieter waren die internen Prozesse und Kommunikationspfade ein wesentlicher Bestandteil der Entwicklung des mobilen Endgeräts an der Universität Kassel. Sowohl die Entwicklung der Software der unterschiedlichen Applikationen und des Georeferenzierungsalgorithmus als auch das Ansteuern der internen Schnittstellen zum GPS-Modul, zu einer unabhängig laufenden Navigationssoftware und zum Human-Machine-Interface (HMI) waren bei Betrachtung der internen Kommunikationspfade zu berücksichtigen. Ein Sequenzdiagramm aller intern und extern ablaufenden Prozesse kann Abbildung 2-3 entnommen werden.

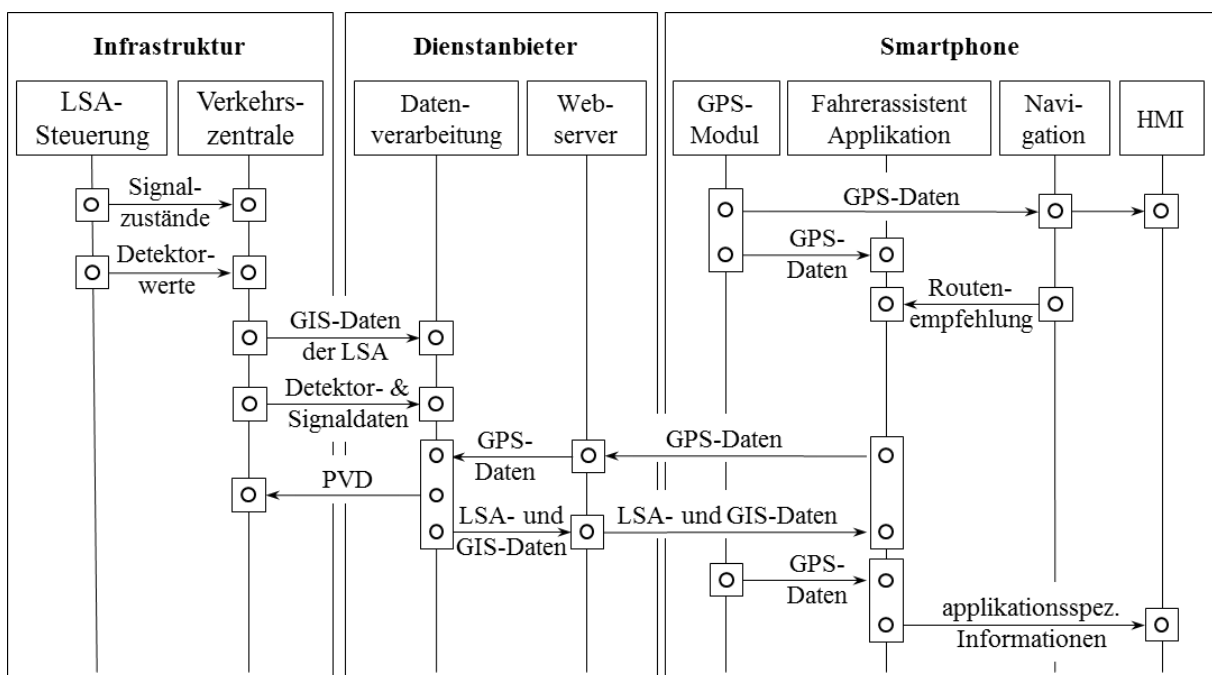


Abbildung 2-3: Sequenzdiagramm des zugrundeliegenden kooperativen Systems

Der Verzögerungsassistent ist zu aktivieren, wenn die Grünphase der vorausliegenden Lichtsignalanlagen nicht mehr erreicht werden kann (oberer Abschnitt auf Abbildung 2-4). Durch die Informationsbereitstellung kann der Fahrer verbrauchsoptimiert auf den nächsten signalisierten Knotenpunkt zufahren, indem er bspw. durch die Reduzierung der Geschwindigkeit an die rote bzw. rot werdende LSA "heransegelt".

Sobald die Grünphase unter Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und einer minimal akzeptierten Geschwindigkeit (60 % der zulässigen Höchstgeschwindigkeit) erreicht werden kann, soll der Grüne-Welle-Assistent entsprechende Geschwindigkeitsempfehlungen bereitstellen, bei deren Einhaltung die nächste LSA ohne Halt erreicht werden kann (unterer Abschnitt auf Abbildung 2-4). Durch die vorherige Geschwindigkeitsreduktion sollen Anfahr- sowie Bremsvorgänge minimiert und somit Emissionen vermieden werden.

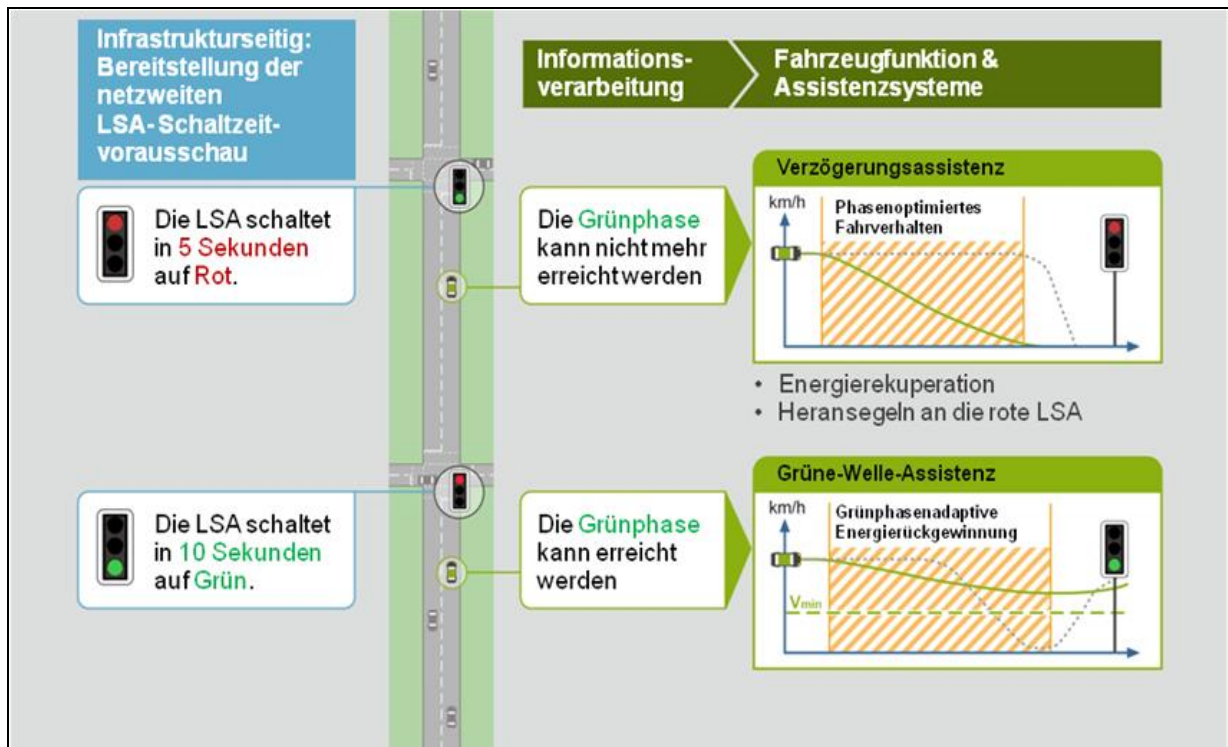


Abbildung 2-4: Fahrzeug- und Smartphoneapplikationen

AP 3100 & AP 3200: Implementierung

Die Entwicklung von Smartphoneapplikationen für den Einsatz im öffentlichen Straßenverkehr war eine vergleichsweise komplexe Aufgabe. Ohne den Verkehrsablauf während der Entwicklungsarbeiten maßgeblich zu beeinträchtigen, mussten alle Komponenten des kooperativen Systems unter Berücksichtigung der vielfältigen Abhängigkeiten aufeinander abgestimmt werden. Für die Erstellung und Erprobung der Fahrzeugfunktionen Verzögerungsassistenz und Grüne-Welle-Assistenz als Smartphoneapplikationen wurde aus diesem Grund eine Simulations- und Testumgebung entwickelt. In dieser Umgebung wurden die infrastruktur- und fahrzeugseitig benötigten Einzelkomponenten und -geräte auf die gleiche Weise wie im späteren Realsystem verknüpft. Unter Verwendung des sogenannten Extended-Devices-in-the-Loop-Ansatzes wurden alle Anwendungen und Funktionen der beteiligten Geräte sowie die Kommunikationspfade zwischen den einzelnen Komponenten in eine mikroskopische Verkehrssimulation integriert (Abbildung 2-5 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.).

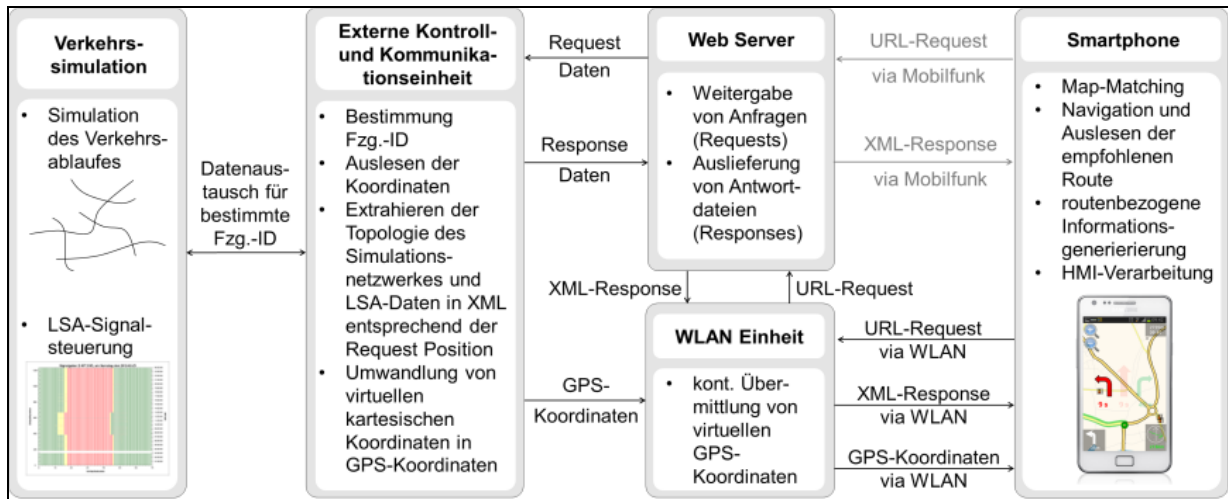


Abbildung 2-5: Integrierte Simulations- und Entwicklungsplattform

Verkehrssimulation

In einer mikroskopischen Verkehrssimulation wurde der Verkehrsablauf auf einem real existierenden Streckennetz mit mehreren lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten simuliert. Hierzu wurde ein Teil des Prüffeldes in Kassel mit sowohl festzeitgesteuerten als auch verkehrabhängigen LSA genutzt. Die Simulation erforderte die Eingabe verschiedener Parameter wie Verkehrsbelastungen, Fahrverhalten etc., so dass unterschiedliche Szenarien erstellt und analysiert werden konnten. Der Verkehrsablauf wurde in Echtzeit simuliert.

Externe Kontroll- und Kommunikationseinheit (EKKE)

Die Eingangsdaten für die Smartphoneapplikation wurden von einer externen Kontroll- und Kommunikationseinheit (EKKE) geliefert, welche für ein ausgewähltes Fahrzeug entsprechende Daten aus der Simulation ausliest. Diese Einheit verbindet die Verkehrssimulation und den Webserver bzw. die WLAN-Einheit. Die EKKE übernimmt Aufgaben und Funktionen der Verkehrsmanagementzentrale und des Backend Service Providers des realen Systems. Für ein ausgewähltes Fahrzeug werden die virtuellen Positionsdaten des hinterlegten kartesischen Systems kontinuierlich in pseudoreale WGS84-Koordinaten umgewandelt und an die WLAN-Einheit weitergegeben. Sobald eine Anfrage (Request) eingeht, werden relevante topologische Informationen (Linkkoordinaten, Haltlinienpositionen, etc.) sowie LSA-Informationen (Schaltzeitpunkte) aus der Simulation ausgelesen. Hierzu wurden Datenbanken mit Geo-Informationen für jede Strecke und Fahrtbeziehung erstellt sowie Abfrage- und Ausleseprozesse realisiert. In einem weiteren Schritt müssen LSA-Informationen ausgelesen und alle relevanten Daten gemäß TPEG-TSI-Draft im XML-Format gespeichert werden.

Webserver und WLAN-Einheit

Die Hauptfunktion des Webserver beinhaltet die Bereitstellung von Geo- und LSA-Informationen über das Internet. Der Server antwortet mit einer XML-Datei mit dynamischem Inhalt, sobald ein Smartphone eine Anfrage gestellt hat. Der Datenaustausch basiert auf dem Transmission Control Protocol (TCP). Unabhängig vom Übertragungsmedium werden die Daten formatiert, adressiert, übermittelt, gelenkt und am Ziel entgegengenommen. Durch die Nutzung unterschiedlicher Ports können parallel GPS-Koordinaten via User Datagram Proto-

col (UDP)-Broadcast gesendet werden. Bislang konnten alle genannten Schnittstellen realisiert werden. Somit ist bislang die Übertragung von Dummy-Daten sowohl über WLAN als auch über Mobilfunk möglich.

Smartphone

Bei der Entwicklung der Smartphoneapplikation musste eine Vielzahl von unterschiedlichen Prozessen realisiert werden. Dabei dürfen parallel laufende Applikationen nicht gestört werden. Gegenwärtig können GPS-Koordinaten via UDP-Broadcast empfangen und verarbeitet werden. Dabei kann das Smartphone aufgrund des authentischen Testfeldes nicht unterscheiden, ob es sich um reale oder simulierte Koordinaten handelt. Aus diesem Grund reagieren auch unabhängig laufende Applikationen auf die "virtuellen" Koordinaten. So kann beispielsweise eine parallel laufende Navi-Software zu einem Ziel navigieren. Vor diesem Hintergrund wurde ein Log-Monitor erstellt, welcher die Routenempfehlungen in Form von Sprachausgaben filtert und weiterverarbeitet. Dadurch wird ermöglicht, dass dem Fahrer nur für seine Fahrt relevante (routenbezogene) Informationen ausgegeben werden.

Die Smartphone-Applikation muss weiterhin entsprechende Anfragen stellen und Antworten vom Webserver entgegennehmen. Mit den parallel erhaltenen pseudorealen GPS-Koordinaten erhält das Smartphone wie im Realsystem alle notwendigen Informationen, so dass die Grundlage für die Entwicklung der Fahrerassistenzfunktionen im labortechnischen Umfeld geschaffen waren. Auf dem Smartphone wurden zunächst die generellen Basisfunktionen, wie

- der Empfang der pseudorealen Koordinaten über UDP-Broadcast (WLAN),
- die Erstellung und der Versand der URL-Anfrage in Abhängigkeit der aktuellen Position des ausgestatteten Fahrzeuges in der Simulation über TCP (WLAN),
- der Empfang und die Dekodierung der TSI-Nachricht,
- das Map-Matching anhand des überführten digitalen Kartenauszugs sowie
- das Auslesen der empfohlenen Route anhand der Sprachmeldungen aus einer unabhängig laufenden Navigations-Software

implementiert. Aufbauend auf den Basisfunktionen und auf dem erfolgreichen Datenaustausch konnten auf dem Smartphone die Algorithmen der Fahrerassistenzfunktionen entwickelt und implementiert werden. Hierzu wird zunächst die Situation bestimmt. Je nach Lage des Fahrzeuges in der Grünen Welle, der aktuellen Geschwindigkeit und des Abstandes zur nächsten Haltlinie wird der

- Grüne-Welle-Assistent (oben in Abbildung 2-6 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) oder der
- Verzögerungsassistent (unten in Abbildung 2-6)

aktiviert.

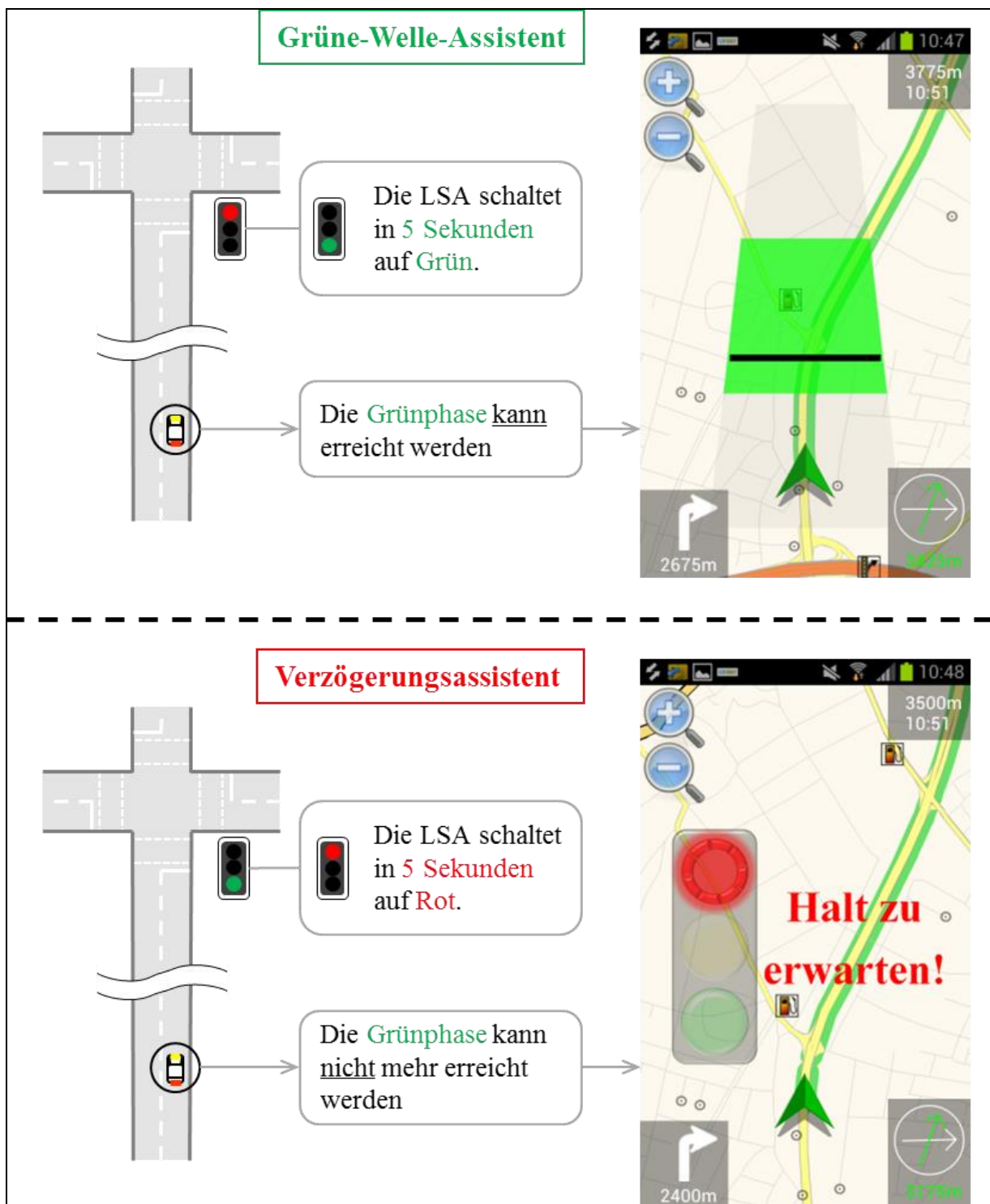


Abbildung 2-6: Integrierte Simulations- und Entwicklungsplattform

Im oberen Teil der Abbildung 2-6 ist der sogenannte Grüne-Welle-Assistent dargestellt. Das HMI zeigt u. a. einen Grünbandteppich, dessen Höhe sich aus der Grünzeit der stromabwärtigen LSA ergibt. Die Höhe bzw. Form des Teppichs verändert sich während der Zufahrt auf eine LSA nicht. Des Weiteren ist ein schwarzer Balken zu sehen, mit dem die aktuelle Lage des Fahrzeuges in der Grünen Welle verdeutlicht wird. Im Gegensatz zum Teppich behält der Balken seine Position nicht bei, sondern bewegt sich je nach aktueller Geschwindigkeit

auf und ab. Die fortlaufende Berechnung der Position des Balkens erfolgt unter Berücksichtigung des Abstandes zur nächsten Haltlinie, der gefahrenen Geschwindigkeit und des Grünzeitbeginns sowie des Grünzeitendes der stromabwärtigen LSA. Befindet sich der Positionsbalken außerhalb des grünen Bereichs, würde der Fahrer unter Beibehaltung seiner Geschwindigkeit während der Sperrzeit an der nächsten LSA ankommen. Der Fahrer müsste entweder beschleunigen (Balken steigt nach oben) oder abbremsen (Positionsbalken sinkt nach unten), um in den grünen Bereich zu gleiten. Dies verdeutlicht, dass mit dem Grüne-Welle-Assistenten indirekt ein Geschwindigkeitsbereich empfohlen wird, bei dessen Einhaltung die nächste LSA ohne Halt überquert werden kann. Der Assistent wird sofort deaktiviert, wenn der Fahrer die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschreitet. Zudem wird die Grüne-Welle-Information nur angezeigt, wenn der berechnete Geschwindigkeitskorridor zwischen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und einer vorab festgelegten minimal akzeptierten Geschwindigkeitsgrenze liegt. Die Akzeptanzgrenze der Geschwindigkeitsempfehlung hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab. Die minimale Akzeptanzgrenze wurde zu 60 % der zulässigen Höchstgeschwindigkeit festgesetzt. Befindet sich der zu empfehlende Geschwindigkeitskorridor unterhalb der minimal akzeptierten Geschwindigkeit, wird dem Fahrzeuglenker angedeutet, dass ein "Halt zu erwarten" ist. Der Grüne-Welle-Assistent wird hierbei vom sogenannten Verzögerungsassistent abgelöst. Der Verzögerungsassistent wird auch aktiviert, wenn wie im unteren Teil der Abbildung 2-6 dargestellt, die Grünphase nicht mehr erreicht werden kann.

Bei dem hier vorgestellten Konzept können auch unsichere Grünzeitbereiche dargestellt werden. Diese unsicheren Bereiche resultieren dabei aus einer Schaltzeitprognose von verkehrsabhängigen LSA (siehe Kapitel 3). Sie beziehen sich dabei auf diskrete Werte der Grünwahrscheinlichkeitsverteilung und werden wie in Abbildung 2-7 dargestellt mit helleren Grüntönen bzw. durch höhere Transparenzgrade im Grünbandteppich repräsentiert (hier: zwei Stufen mit einer Grünwahrscheinlichkeit von 80 % und 95 %).

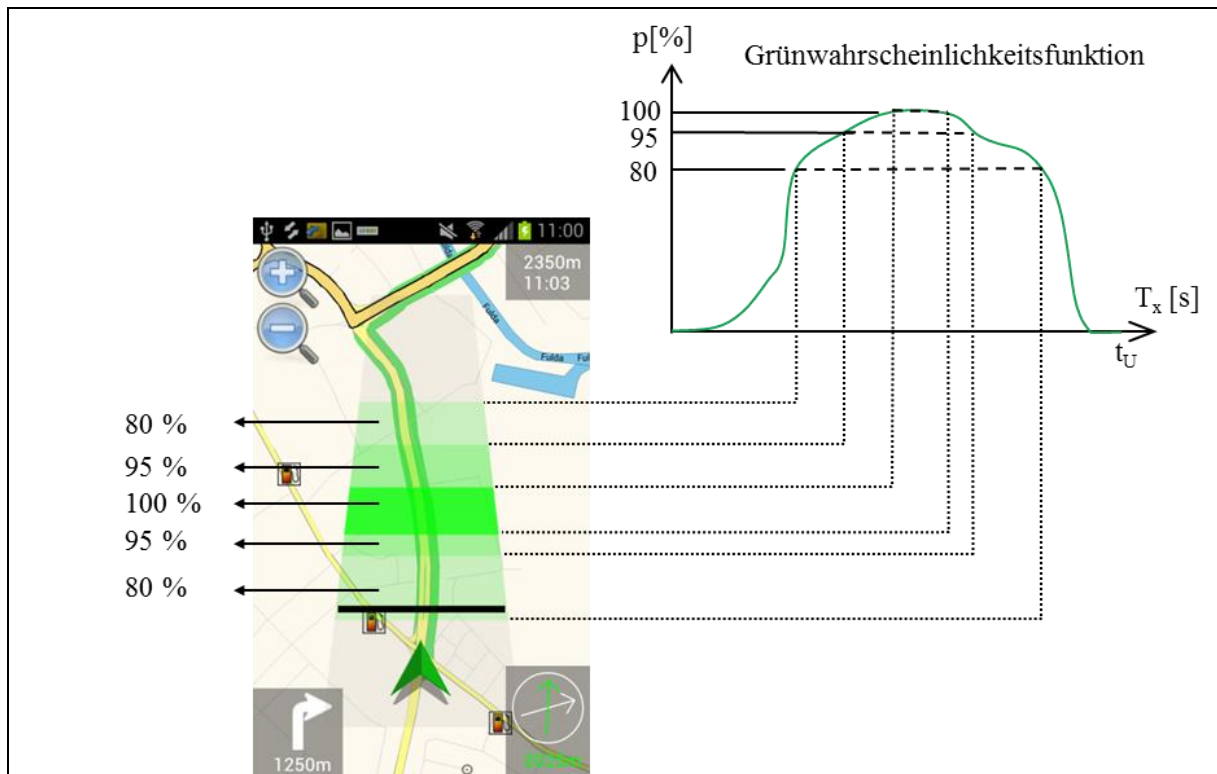


Abbildung 2-7: Darstellung von Unsicherheitsbereichen beim Grüne-Welle-Assistenten

Sobald das Fahrzeug vor der LSA zum Stillstand gekommen ist, werden Informationen zur verbleibenden Restrotzeit ausgegeben. Die Restzeitinformationen können, wie auf der linken Seite in Abbildung 2-8 dargestellt, mit einem Signalgeber visualisiert werden. Der rote Bereich des Signalgebers beinhaltet einen abgesetzten Kreisring bestehend aus acht Segmenten. Beträgt die Restrotzeit über acht Sekunden, rotiert dieser Ring. Das mittlere HMI in Abbildung 2-8 zeigt den Countdown, der ab einer Restrotzeit von acht Sekunden aktiviert wird. Während des Countdowns nehmen die Segmente im Kreisring sekundlich ab und die Restzeit wird in Sekunden durch eine Ziffer dargestellt. Ab einer verbleibenden Restzeit von zwei Sekunden wird der Hinweis "Ampel beachten" gegeben (rechts in Abbildung 2-8). Die Restrotzeitinformation gibt dem motorisierten Verkehr die Möglichkeit einer manuellen Motorabschaltung. Die beispielhaften HMI geben einen ersten Eindruck über das Potenzial der Fahrerbeeinflussung im Hinblick auf die Umweltwirkungen. So kann auch ohne einen direkten Eingriff in die Fahrzeugsteuerung durch die individuelle Anpassung der Geschwindigkeit und durch das Ausschalten des Motors der Kraftstoffverbrauch sowie die Emissionen reduziert werden.

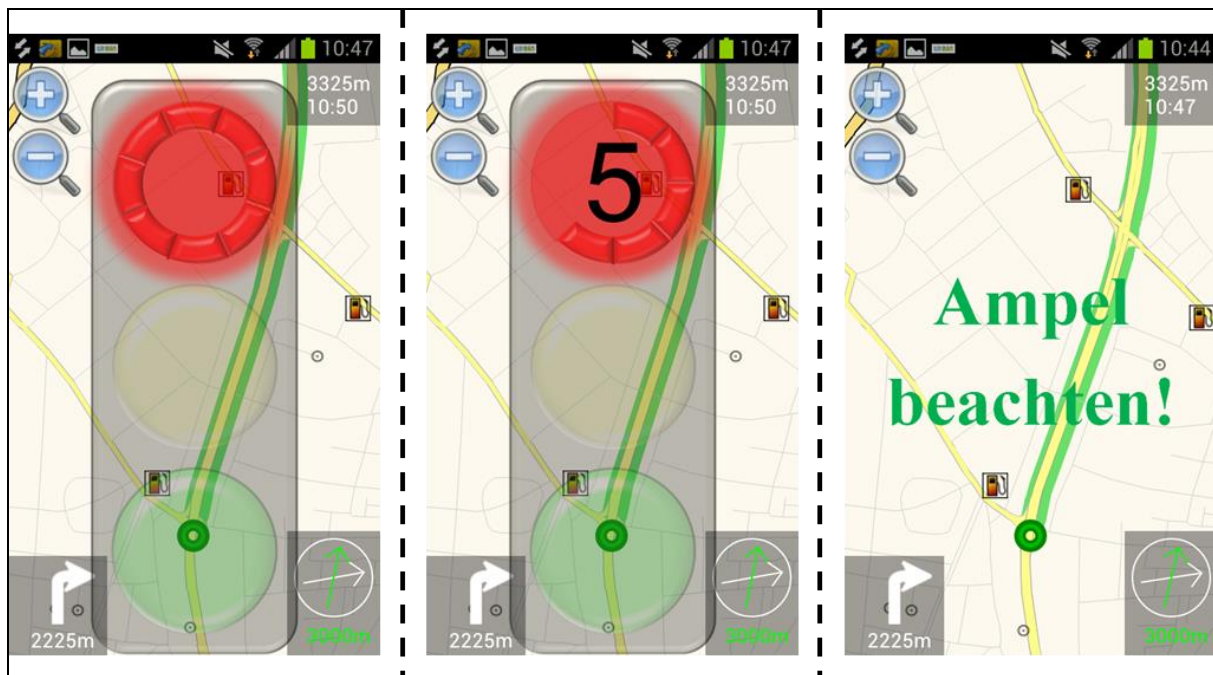


Abbildung 2-8: Restzeitinformationen auf dem Smartphone

AP 4100 & AP 4200: Test und Demonstration

Die Fahrerassistenzfunktionen Verzögerungsassistent und Grüne-Welle-Assistent wurden unter realen Bedingungen im Prüffeld Kassel und Testfeld Düsseldorf erprobt und im Labor weiterentwickelt. Auf Grundlage zahlreicher Kommunikationstests konnte die drahtlose Verbindung sowie die allgemeine Funktionsweise des Datenaustauschs sichergestellt werden. In enger Absprache mit dem Datenanbieter wurden hierzu Authentifizierungs- sowie Autorisierungsfragen gelöst. Nach erfolgreicher Einstellung von Zugriffs- bzw. Zugangsrechten wurde der wechselseitige Datenaustausch erprobt. Hierzu muss der Dienstanbieter die vom Smartphone gestellten URL-Requests entgegennehmen und verarbeiten. Die Anfrage erfolgt nach der HTTP-GET-Methode. In Abhängigkeit der übermittelten Positions- und Richtungsdaten wurden TPEG-TSI-Nachrichten mit Informationen wie prognostizierten Schaltzeiten, geschätzten Rückstaulängen, Haltlinieninformationen und ein Auszug einer digitalen Karte an das Smartphone (bzw. andere Clients) zurückgesendet. Im Rahmen der Kommunikationstests konnte auch der in der Simulationsumgebung entwickelte und erprobte XML-Parser angewandt und getestet werden. Hierzu wurden die vom Dienstanbieter übertragenen TPEG-TSI-Nachrichten im XML-Format vom Smartphone entgegengenommen und ausgewertet. Ziel war es, alle für die Fahrt relevanten Informationen aus der Antwort zu extrahieren. In Erweiterung zur Simulationsumgebung musste hier auch die Interpretation zusätzlicher Informationen wie die Schaltzeiten mit Prognosewahrscheinlichkeiten unter 100 % überprüft werden.

Nach Sicherstellung des erfolgreichen Datenaustauschs wurde die im Labor entwickelte Smartphoneapplikation adaptiert und unter Realbedingungen getestet. Hierzu erfolgten über einen Zeitraum von sechs Monaten 88 Entwicklungsfahrten im Prüffeld Kassel. Für jede Entwicklungsfahrt wurden allgemeine App-Einstellungen, verkehrliche Situationen und funktionale Sachverhalte vom Fahrer oder vom Beifahrer protokolliert. Die Smartphone-

Applikation beinhaltet darüber hinaus eine Option zum automatischen Mitschreiben von Protokolldateien. Neben den URL-Anfragen konnten somit auch die TSI-Requests sowie ein sogenanntes "Track-Logfile" im Speicher hinterlegt werden. Das Track-Logfile protokolliert alle applikationstechnischen Informationen wie

- App-Version
- Systemzeit
- GPS-Daten (Zeit, Breiten- und Längengrad, Richtung, Geschwindigkeit)
- Request-Informationen (Status: aktiv oder ruhend, Anfrageparameter etc.)
- Response-Informationen
 - allg. Status: Error, LSA-Daten enthalten etc.
 - allg. Karteninformationen: Richtung, Radius, Linkkoordinaten, Geschwindigkeitsbeschränkungen etc.
 - allg. Signalinformationen: Referenzzeit, Umlaufzeit T_U , Umlaufsekunde T_x , T_x für 80, 95 und 100 % Grünwahrscheinlichkeiten etc.
 - fahrtrichtungsspezifische Karteninformationen: Geschwindigkeitsbeschränkung an der aktuellen Position, Haltliniendistanz etc.
 - fahrtrichtungsspezifische Signalinformationen: aktueller Signalstatus, kalkulierte Restzeiten etc.
- fahrerassistenzrelevante Informationen
 - Signalstatus bei Ankunft an der Haltlinie, errechneter Geschwindigkeitskorridor für Grüne Welle
 - ausgegebene Informationen, aktuelle Restzeitinformationen aktivierter Assistent

AP 5100 & AP 5200: Bewertung

Im Anschluss an jede Entwicklungsfahrt konnte anhand der mitgeschriebenen Logdateien eine manuelle Prüfung und Auswertung der ausgegebenen Fahrerinformationen erfolgen. Mit der Auswertung ließen sich Optimierungspotentiale sowie fehlerhaft ausgegebene Fahrerinformationen relativ schnell lokalisieren. Sofern die Ursache einer fehlerhaften Anzeige auf die Smartphone-Applikation zurückzuführen war, konnten entsprechende Programmteile der App unter Anwendung der hybriden Simulations- und Testumgebung untersucht und angepasst werden. In einigen Fällen lag die Ursache jedoch an der Qualität bzw. an der Güte der übermittelten Daten. Während der Integrationstests konnten so Fehler und Ungenauigkeiten wie bspw. falsch zugeordnete Signalgruppen, fehlerhaft georeferenzierte Haltlinien und fehlerbehaftete LSA-Prognosedaten identifiziert und in enger Zusammenarbeit mit den verantwortlichen Projektpartnern beseitigt werden.

Da der Fokus der Universität Kassel in UR:BAN-VV US-1 und US-2 auf der Entwicklung der Fahrerassistenzfunktionen auf dem Smartphone lag, zielten die Tests vorrangig auf den Nachweis der generellen Anwendbarkeit des Smartphones für die Nutzung dieser Applikationen ab. Die Anwendbarkeit konnte im Rahmen weiterer Testfahrten nachgewiesen werden.

Im Anschluss an die Integrationstests wurden insgesamt 38 Fahrten in Kassel und weitere 73 in Düsseldorf durchgeführt. Infolge der abschließenden Testfahrten erfolgten kleinere Programmanpassungen, so dass eine fehlerfreie Funktionsweise der Applikation unter realen Bedingungen gewährleistet wurde. Dies konnte unter anderem während der Abschlusspräsentation erfolgreich demonstriert werden.

Die verkehrliche Bewertung lag in der Verantwortung von Transver und TUM-VT. Die Uni Kassel hat in mehreren Projekttreffen und Telefonkonferenzen den entsprechenden Projektpartnern die gewünschten Informationen über die Funktionsweise der Assistenzfunktionen zur Verfügung gestellt. Weiterhin wurde angeboten, Fahrtverlaufsdaten der abschließenden Testfahrten bereitzustellen.

2.2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der Individualverkehr im städtischen Straßennetz, insbesondere auf dessen Hauptstraßennetz (urbane Straßen), ist heute gekennzeichnet durch vermeidbare Emissionen beim Annähern und Halten an lichtsignalisierten Knotenpunkten. Einerseits werden mangels Vorausschau über Lichtsignalschaltzeitpunkte, Kraftfahrzeuglenker nicht mit dem bestmöglichen „Horizont“ versorgt, um möglichst verbrauchs- und emissionsarm zu fahren. Andererseits werden Emissionsreduzierungen, die durch die Minimierung von Abbrems- und Beschleunigungsvorgängen des Gesamtverkehrsstroms bei nicht optimierten Signalisierungsabfolgen an aufeinander folgenden Knotenpunkten entstehen, heute nicht realisiert. Dies erklärt die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten in Hinblick auf die Entwicklung und Erprobung geeigneter Fahrerassistenzsysteme. Für eine möglichst umfassende Wirkung ist die Bereitstellung nicht nur einzelner sogenannter kooperativer Lichtsignalanlagen erforderlich, sondern die möglichst flächendeckende Verfügbarkeit der Lichtsignalschaltzeitpunkte der im städtischen Straßennetz befindlichen Lichtsignalanlagen. Aus diesem Grund wurde in diesem Vorhaben eine zentralenbasierte Lösung entwickelt und erprobt, bei der die zentralseitig in Düsseldorf und Kassel prognostizierten Lichtsignalphaseninformationen über Mobilfunk an die Assistenzsysteme in Fahrzeugen übermittelt und daraus Fahrerinformationen generiert werden.

2.2.3 Nutzen des Systems

Die ausgegebenen Hinweise der LSA-bezogenen Fahrerassistenzfunktionen haben eine Beeinflussung des Verkehrsablaufes zur Folge, welche im Rahmen einer an der Uni Kassel entstandene Dissertation untersucht worden ist. Die Arbeit untersuchte, in welchem Maße sich das geänderte Fahrverhalten auf den Verkehrsablauf der gesamten Strecke auswirkt. Es stellte sich heraus, dass die Fahrerbeeinflussung durchaus einen erhebliche Wirkung auf den Gesamtverkehr hat. Dies trifft auch auf geringe Ausstattungsraten zu. So kann bereits eine kleine Menge an informierten Fahrern dazu beitragen, die Gesamtzahl der Halte zu verringern. Dieser positive Effekt tritt vorrangig bei ungünstigen Koordinierungen auf, wobei die Wirkung mit steigenden Haltlinienabständen weiter zunimmt. Auf die mittlere Reisegeschwindigkeit hatte die Fahrerbeeinflussung hingegen nahezu keinen Effekt. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei den untersuchten koordinierten Festzeitsteuerungen unabhängig von

etwaigen Geschwindigkeitsanpassungen aufgrund der Fahrerassistenz im Mittel annähernd die gleiche Zeit für das Passieren des gesamten Streckenabschnitts benötigt wurde. Der zentralenbasierte Aufbau des Systems der kooperativen Lichtsignalanlage hat sich darüber hinaus als technisch machbar erwiesen. Insbesondere die technische Umsetzbarkeit der Fahrerassistenzsysteme auf dem Smartphone konnte durch umfassende Simulationsuntersuchungen und reale Messfahrten nachgewiesen werden.

2.2.4 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es wurden anderweitige Forschungstätigkeiten auf dem Gebiet der Kommunikation zwischen Lichtsignalanlage und Fahrzeug sowie zur Anzeige von individuellen Fahrerinformationen bekannt. In folgenden Projekten wurde u. a. solche Ansätze erforscht und erprobt:

- SHARE (gefördert vom österreichischem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie und der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG)
- KOLIBRI (unterstützt von der bayrischen Forschungstiftung)

In den aufgezählten Forschungsprojekten wird zwar im Ansatz die Kommunikation zwischen Lichtsignalanlagen und Fahrzeugen sowie Fahrerassistenzfunktionen bzw. die Anzeige von Signalisierungsinformationen untersucht, die Projektziele sowie deren Umsetzung variieren jedoch je nach Zielstellung des Gesamtprojekts stark. Durch die Komplexität der Systeme stehen oder standen bei der Untersuchung verschiedene Aspekte der Forschung und Entwicklung im Vordergrund. Die Projektergebnisse unterscheiden sich somit stark voneinander.

2.2.5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Erfolgte Veröffentlichungen :

RUDOLPH, F., LEITZKE, C., HOYER, R.: *On-board Real Time Driver Information using bidirectional Data Exchange between Smartphones and Traffic Data Provider*. 20th World Congress on Intelligent Transport Systems – Tokyo, October 14-18, 2013, Proceedings.

RUDOLPH, F., HOYER, R.: *Smartphone-based Real Time Driver Information at signalized Intersections under Consideration of Route Recommendations*. mobil.TUM 2013– International Scientific Conference on Mobility and Transport. Proceedings. Munich, June 18-19, 2013.

RUDOLPH, F., HOYER, R.: *Route-related Traffic Signal Information on Smartphones using I2V-Communication*. 5th International Symposium on Wireless Vehicular Communications (WIVEC2013), Dresden, June 2-3, 2013.

RUDOLPH, F., HOYER, R.: *Smartphone-App-Entwicklung für kooperative Lichtsignalanlagen*. In: VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.): 6. Fachtagung USEWARE 2012: Mensch-Maschine-Interaktion, VDI-Berichte 2179, S.87-98, VDI-Verlag Düsseldorf, ISBN 978-3-18-092179-2, Kaiserslautern, 2012.

Geplante Veröffentlichungen:

Die Universität Kassel plant einen Journal-Beitrag zum Thema „Smartphone-basierte Fahrerinformation unter Verwendung von Echtzeitdaten verkehrsabhängig gesteuerter LSA über Mobilfunk“.

Zudem ist die Veröffentlichung der Dissertationsschrift von Herrn Felix Rudolph zum Thema „Qualitätsanalyse koordinierter Lichtsignalsteuerungen unter Verwendung kooperativ gewonnener Messgrößen“ in der Schriftenreihe Verkehr der Universität Kassel vorgesehen.

3 Schlussbericht zu US-3

3.1 Kurzdarstellung

3.1.1 Aufgabenstellung der Universität Kassel

Die im Teilprojekt „Urbane Straße“ zu entwickelnden smartphonebasierten Fahrerassistenzsysteme sollen Handlungsempfehlungen für ein energie- und verkehrseffizientes Fahren in der Stadt bereitstellen. Für die Umsetzung dieser Funktionen ist eine enge Kooperation von Infrastruktur und Fahrzeugen eine Grundvoraussetzung. Durch die Information über bevorstehende Schaltzeitpunkte kann der Fahrer bspw. seine Geschwindigkeit im Zuge seiner Annäherung an eine Lichtsignalanlage (LSA) derart anpassen, dass er den Knotenpunkt während der Grünphase erreicht und somit ohne Halt überqueren kann. Die Bereitstellung zukünftiger Schaltzeitpunkte an festzeitgesteuerten LSA ist methodisch trivial. Moderne Anlagen passen hingegen ihre Phasen und Phasenübergänge an den aktuellen Verkehrsablauf an, wodurch deren Schaltzeitpunkte mit jedem Umlauf variieren können. Folglich ist eine Prognose der Schaltzeitpunkte erforderlich. Diese ist eine Grundvoraussetzung für die Realisierung von Fahrzeugfunktionen für ein energieeffizientes und schadstoffminimales Fahren in der Stadt. Weiterhin ist zu beachten, dass für derartige Fahrerassistenzsysteme die Bereitstellung der Schaltzeiten nicht nur einzelner LSA, sondern deren flächendeckende Verfügbarkeit im Straßennetz erforderlich ist. Bei der Entwicklung von Prognosealgorithmen spielt daher deren einfache Übertragbarkeit auf andere Anlagen eine zentrale Rolle. Die wesentlichen Aufgaben der Universität Kassel sind nachfolgend aufgeführt.

AP 2300: Spezifikation

Spezifikation der Schaltzeitprognose und der Verfahrensentwicklung in den Test- und Prüffeldern Düsseldorf und Kassel inkl. Abstimmung der Datenschnittstellen für die infrastrukturseitige Applikationsentwicklung.

AP 3300: Implementierung

Implementierung der in AP 2300 spezifizierten Verfahren innerhalb einer Entwicklungs- und Testumgebung. Dieses AP beinhaltet zudem den Aufbau eines Testdatenservers zum Zwecke einer methodischen Erprobung der implementierten Prognoseverfahren auf Grundlage vergleichbarer historischer Datensätze.

AP 4300: Test und Demonstration

Inbetriebnahme der Online-Prognose der Schaltzeitpunkte und Online-Übertragung an das BMW-Backend auf Grundlage der spezifizierten Schnittstellen und Protokolle.

AP 5300: Bewertung

Bewertung der Zuverlässigkeit der Funktionsweise der Prognoseverfahren.

3.1.2 Voraussetzungen der Vorhabensdurchführung

Das Projekt „UR:BAN-VV“ stellte den Anspruch ein praxisnahes Forschungsprojekt zu sein. Daher wurden mit den Städten Düsseldorf und Kassel zwei Praxispartner eingebunden, deren Aufgabe darin bestand, betriebliche Anforderungen an die Schaltzeitprognose in das Projekt einzubringen und den Zugang zu Daten aus dem täglichen Betrieb zu ermöglichen. Die Einbeziehung verschiedener Test- und Prüffelder gewährleistete zudem die Übertragbarkeit der Prognoseverfahren auf andere Städte und Kommunen. Speziell die Landeshauptstadt Düsseldorf als Praxispartner verfügte bereits zu Projektbeginn über ein modernes Verkehrsmanagementsystem und erzeugte eine Vielzahl von Verkehrsdaten, wodurch sehr gute Voraussetzungen für die Entwicklung und Validierung der Prognoseverfahren gegeben waren. Weiterhin wurde mit Gevas-Software ein Projektpartner mit langjähriger Erfahrung auf dem Gebiet der Entwicklung verkehrstechnischer Softwarelösungen in die Schaltzeitprognose einbezogen, wodurch auch für die betriebliche Umsetzung der Online-Prognose eine gute Basis gegeben war.

3.1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt verlief ohne Verzögerungen nach dem in Abbildung 2-1 aufgeführtem Zeitplan.

3.1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Vorhabenbeginn

Die Schaltzeitprognose als Voraussetzung für die Generierung von Fahrerinformationen, welche auf einer Infrastruktur-Fahrzeug-Kommunikation basieren, wurde bereits im Forschungsprojekt TRAVOLUTION untersucht. Dabei wurde der mathematische Ansatz der Markow-Ketten verwendet, um die bevorstehenden Schaltzeiten an den Test-LSA zu prognostizieren. Die entsprechenden Phasen und Phasenübergänge wurden als Zustände in einem Gesamtsystem betrachtet. Die Markow-Eigenschaft besagt, dass die Wahrscheinlichkeit für den Wechsel in den nächsten Systemzustand ausschließlich vom vorherigen Systemzustand abhängt. Dadurch lässt sich mit Kenntnis der aktuellen Phase bzw. des aktuellen Phasenübergangs der Beginn der nachfolgenden Phase prognostizieren. Allerdings setzt dieser Ansatz aufgrund der erforderlichen Kenntnis des aktuellen Systemzustands sehr geringe Latenzzeiten im unteren einstelligen Sekundenbereich voraus. Diese können nicht immer sichergestellt werden. Weitere Prognoseansätze, welche nicht ausschließlich historische Schaltzeiten verwenden, um eine entsprechende Prognose lediglich über die Häufigkeitsverteilung dieser Schaltzeiten umzusetzen, waren bei Vorhabenbeginn nicht bekannt.

3.1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In allen Arbeitspaketen der Schaltzeitprognose war eine enge Vernetzung und Zusammenarbeit mit den Projektpartnern der Städte Düsseldorf und Kassel sowie Gevas-Software gegeben. Diese Zusammenarbeit wurde zudem zu den erforderlichen Zeitpunkten innerhalb des Projekts um den Projektpartner TUM-VT erweitert, um den Einfluss und den Umgang des Lkw-Pulkmanagements bzgl. der Schaltzeitprognose abzustimmen.

3.2 *Eingehende Darstellung*

3.2.1 *Erzielte Ergebnisse*

AP 2300: Spezifikation

Die Schaltzeitprognose wird über Algorithmen realisiert, welche sowohl mit historischen als auch mit Online-Daten arbeiten. Dabei wird ein prognostizierter Phasenübergang, je nach Grad der Verkehrsabhängigkeit der entsprechenden Lichtsignalanlage, mit einer gewissen Unsicherheit eintreten. Die zu entwickelnden Algorithmen werden in eine zentralenseitige Basiskomponente integriert, die neben den verkehrsabhängigen Schaltzeitpunkten auch die der Festzeitanlagen generiert. Durch den zentralenseitigen Ansatz wird keine Erweiterung der bestehenden Lichtsignalanlagen-Infrastruktur in Form weiterer Kommunikationseinheiten wie etwa einer RSU benötigt. Die Versorgung der Algorithmen erfolgt direkt aus der Online-Datenbank der Verkehrsmanagementzentrale. Auf diese Weise können diese direkt mit den für die Prognose notwendigen Eingangsdaten versorgt werden. Dabei werden neben den Signalisierungszuständen der einzelnen Signalgeber auch Detektorrohdaten, aggregierte Detektorwerte sowie An- und Abmeldungen des ÖV übertragen. Die prognostizierten Schaltzeitpunkte sämtlicher Lichtsignalanlagen in den Test- und Prüffeldern werden mit der zugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeit gekoppelt und anschließend an einen Service Provider (BMW-Backend) übermittelt. Als Austauschmedium sollen der MDM oder zumindest MDM-konforme Schnittstellen und Protokolle zum Einsatz kommen. Zusätzlich wird dem Service Provider die Zuordnung von Haltlinien und Signalgruppen zu Fahrwegen übermittelt, so dass er die für eine Route relevanten Signalgruppen ermitteln kann. Die Prognose der Schaltzeitpunkte ist Grundvoraussetzung für weitere Applikationen im Projekt (US-1 Verzögerungsassistent, US-2 Grüne-Welle Assistent). Für einen möglichst effizienten Nutzen dieser Applikationen für den Fahrer erfolgt die Bereitstellung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Schaltzeitpunkte für einen Prognosehorizont von mindestens 180 Sekunden. Nachfolgend sind die Komponenten und Kommunikationskette der Schaltzeitprognose vereinfacht dargestellt (Abbildung 3-1).

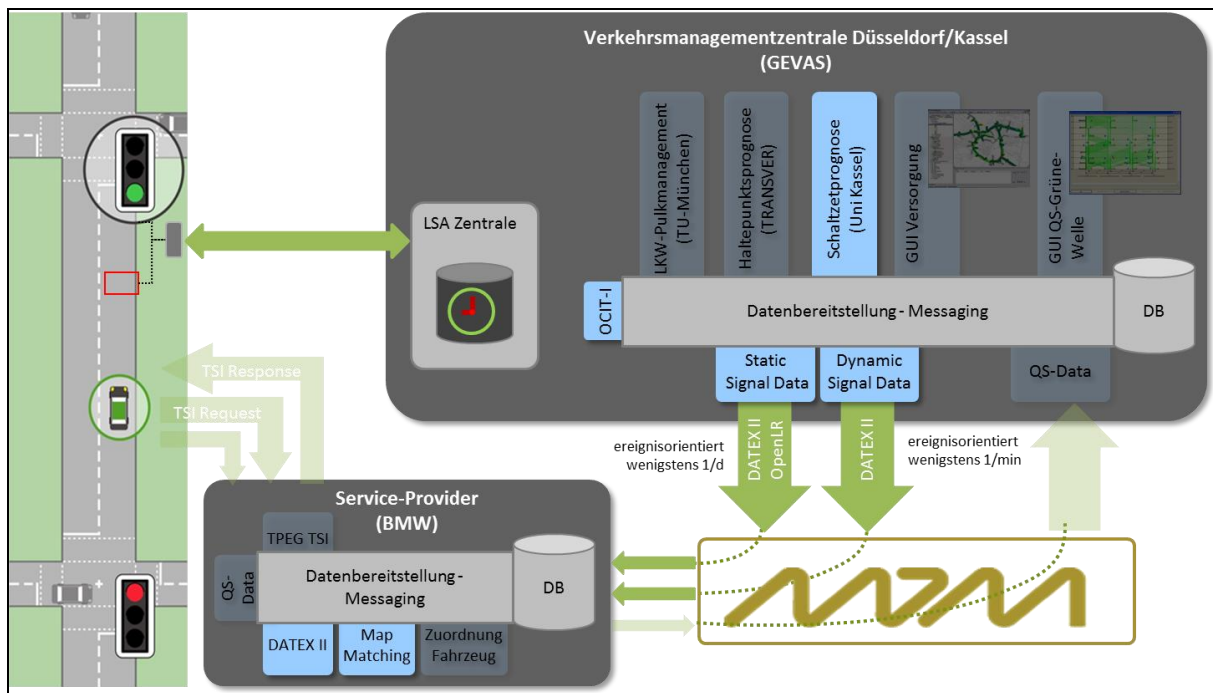


Abbildung 3-1: Komponente und Schnittstellen der Schaltzeitprognose

AP 3300: Implementierung

Eine Prognose der bevorstehenden Schaltzeitpunkte kann auf einfache Art und Weise über einen historischen Datenvergleich in Form von relativen Häufigkeitsverteilungen der Signalbilder umgesetzt werden. Allerdings sind bei diesem Verfahren keine statistisch verwertbaren Werte bei Anlagen mit stark variierenden Schaltzeiten zu erwarten.

Zur Verbesserung der Schaltzeitprognose wurden verschiedene mathematische Verfahren untersucht, die zusätzlich zu den historischen Signalbildern die zur Verfügung stehenden verkehrlichen Daten (Detektorwerte, ÖV-Meldepunkte, etc.) berücksichtigen. Dabei haben sich die Nutzung von sogenannten Support Vector Machines (SVM) und Regressionsbäumen als vielversprechende Ansätze erwiesen. Nachfolgend sollen diese beiden Verfahren näher erläutert und deren Prognosegüte mittels unterschiedlichen Datenmodellen dargestellt werden.

Support Vector Machines

Bei Support Vector Machines (SVM) handelt es sich um einen maschinellen Lernalgorithmus, der eine Menge von Objekten in zwei Klassen teilt. Ein Objekt kann dabei mehrere Attribute bzw. Merkmale besitzen, die wiederum über die für die Prognose verwendeten verkehrlichen Daten beschrieben werden. Somit sind bspw. der Zeitpunkt einer Detektorüberfahrt oder der Zeitpunkt einer ÖV-Anmeldung Merkmale der zu klassifizierenden Objekte. Die Trennung der Objekte erfolgt so, dass um die gebildete Klassengrenze herum ein möglichst großer Bereich frei von Objekten bleibt. In Abbildung 3-2 wird die Bildung unterschiedlicher Klassengrenzen und eine durch die SVM gebildete optimale Klassengrenze, welche auch als Hyperebene bezeichnet wird, veranschaulicht. Die Klassifizierung neuer Objekte, welche in Abbildung 3-2 als graue Punkte dargestellt sind, kann dabei je nach Lage und der Wahl der maßgeblichen Klassengrenze unterschiedlich ausfallen. Durch die Bildung einer Hyperebene

mittels SVM ist hingegen aufgrund des freibleibenden Rands um die Klassengrenze herum eine eindeutige Klassifizierung des neuen Objekts möglich.

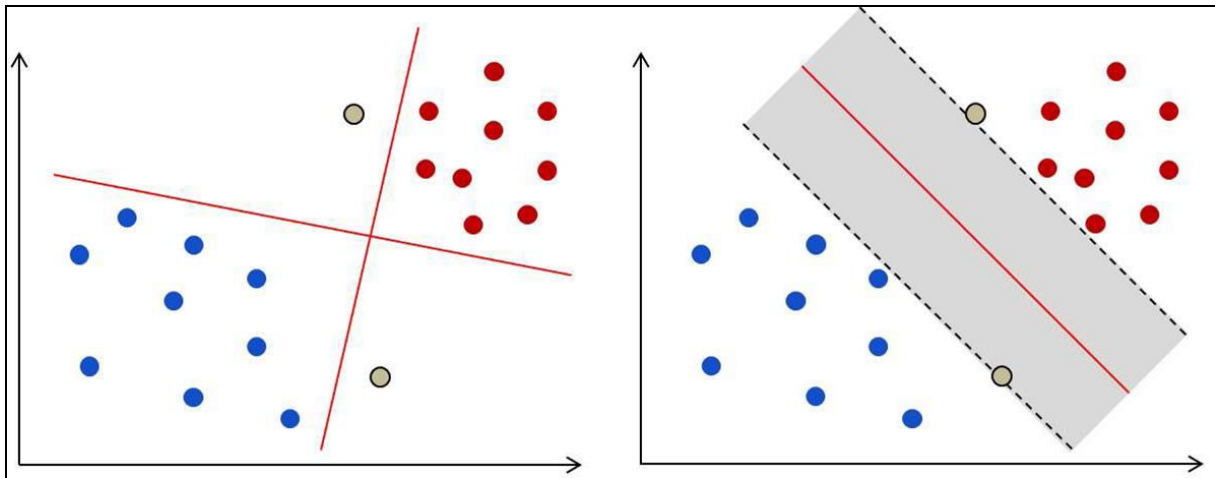


Abbildung 3-2: Bildung von Klassengrenzen ohne (links) und mit SVM (rechts)

Die in Abbildung 3-2 dargestellten Objekte werden über Merkmalsvektoren beschrieben. Die Merkmalsvektoren, welche den Rand der Hyperebene auf beiden Seiten berühren, werden in diesem Zusammenhang als Stützvektoren (engl. support vectors) bezeichnet, woraus sich die Bezeichnung des vorgestellten Verfahrens ergibt. Die unterschiedlich farbigen Klassen sind in diesem Kontext als die zu prognostizierenden Schaltzeiten anzusehen, wobei diese jedoch lediglich verschiedene Umlaufsekunden für einen betrachteten Grünanfang oder ein betrachtetes Grünende einer Signalgruppe repräsentieren. Die für eine Schaltzeitprognose verwendeten verkehrlichen Daten werden als unabhängige Eingangsvariablen bezeichnet, die resultierenden Schaltzeiten als Zielvariablen.

Bei der in Abbildung 3-2 dargestellten Verteilung der Objekte bzw. Eingangsvariablen handelt es sich um eine idealisierte Darstellung um die Bildung einer Hyperebene veranschaulichen zu können. Unter Verwendung realer verkehrlicher Daten verteilen sich die Eingangsvariablen wesentlich komplizierter, so dass keine lineare Trennung mehr möglich ist. Diesbezüglich zeigt Abbildung 3-3 auf der linken Seite ein zu Veranschaulichungszwecken vereinfachtes Beispiel einer möglichen Verteilung von Eingangsvariablen. Auf der rechten Seite ist die entsprechende Generierung der Hyperebene für diesen Fall dargestellt.

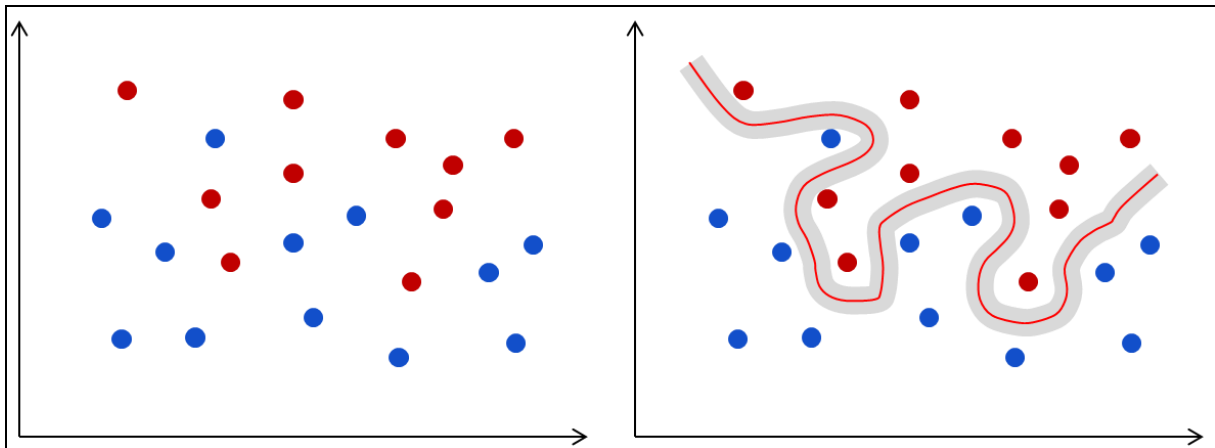


Abbildung 3-3: Nicht lineare Verteilung von Eingangsvariablen (links) und durch SVM generierte Hyperebene

Um eine geeignete nichtlineare Hyperebene zu generieren, verwenden SVM den sogenannten Kernel-Trick. Die Daten werden in einen Raum höherer Dimension transformiert, in welchem sie dann linear trennbar werden. Der höherdimensionale Raum wird in diesem Zusammenhang als „Feature Space“ bezeichnet. Durch die Rücktransformation der Daten in den niedriger dimensionalen Raum wird die berechnete Hyperebene schließlich komplex und kann die Daten eindeutig klassifizieren.

Da die Verteilung der Eingangsvariablen hierbei entscheidend für den Prognoseerfolg ist, müssen die verkehrlichen Daten zunächst in einem geeigneten Datenmodell aufbereitet werden. Dieser Schritt wird in diesem Bericht an entsprechender Stelle näher erläutert.

Regressionsbäume

Regressionsbäume, oder auch Entscheidungsbäume genannt, sind geordnete und gerichtete Bäume, die der Darstellung von Entscheidungsregeln dienen. Wie auch die SVM stellen diese eine Methode zur automatischen Klassifikation von Datenobjekten dar. Ein Regressionsbaum besteht dabei immer aus einer Wurzel, einem oder mehreren Knoten und aus (mindestens zwei) Blättern. Ein Blatt ist dabei ein Knoten, der nicht weiter verzweigt wird. Abbildung 3-4 stellt die Struktur eines Regressionsbaumes anschaulich dar.

Um eine Klassifikation eines einzelnen Datenobjekts abzulesen, geht man vom Wurzelknoten entlang des Baumes abwärts. Bei jedem Knoten wird dann ein Attribut bzw. ein Merkmal abgefragt und eine Entscheidung über die Auswahl des folgenden Knoten getroffen. Diese Prozedur wird solange fortgesetzt, bis man ein Blatt erreicht. Dieses Blatt entspricht dann der Klassifikation bzw. dem zu prognostizierenden Schaltzeitpunkt. Auch hier hängt die Entscheidungsfindung wieder von den zugrunde liegenden Datenmodellen ab.

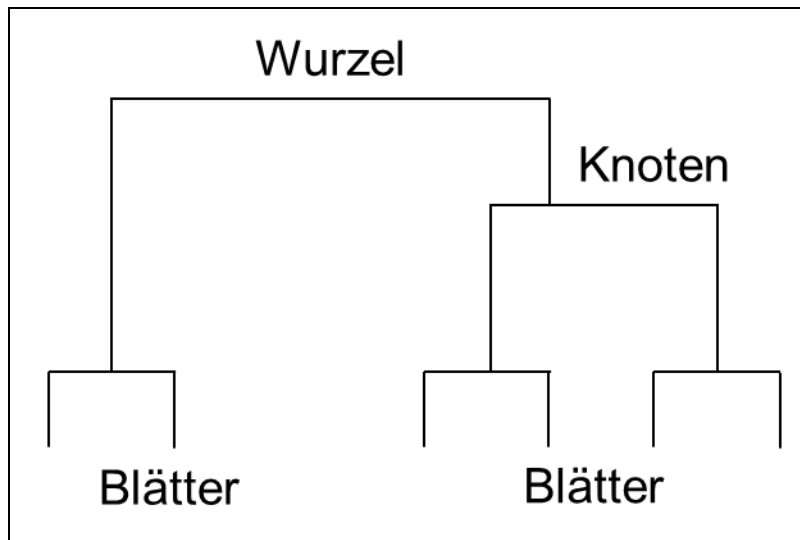


Abbildung 3-4: Struktur eines Regressionsbaumes

Generierung von Datenmodellen

Auf Grundlage des Datenmodells erlernen die Algorithmen mögliche Zusammenhänge der verschiedenen verkehrlichen Daten. Diese Daten umfassen insbesondere:

- die Zeitlücke
- die Verkehrsstärke,
- die Belegungszeit,
- die An- und Abmeldungen von ÖV-Fahrzeugen,
- die Zeitpunkte von Detektorüberfahrten durch den IV,
- die Anmeldung von Fußgängern und
- die Signalzustände bzw. Schaltzeitpunkte der Signalgeber

Das Datenmodell hat im Falle einer Verwendung von SVM maßgeblichen Einfluss auf die Lage der Objekte bzw. Merkmalsvektoren im mehrdimensionalen Raum. Je eindeutiger sich die Objekte trennen lassen, umso weniger Fehler wird das Prognoseverfahren generieren und umso besser wird die resultierende Prognosegüte sein. Im Falle einer Verwendung von Regressionsbäumen beeinflusst das Datenmodell die Art des Entscheidungskriteriums an einem Knoten sowie dessen zugehörigen Grenzwert.

Für die Generierung eines geeigneten Datenmodells mussten zunächst verschiedene Randbedingungen in den Test- und Prüffeldern berücksichtigt werden. Eine wichtige Rolle spielen hierbei die Latenzzeiten. Ist die Latenz zu groß, werden bei einer Online-Prognose entscheidende Systemzusammenhänge durch die Algorithmen mitunter nicht rechtzeitig erkannt. Im Testfeld Düsseldorf war im Mittel mit einer Latenz von 15-20 Sekunden zu rechnen, im Prüffeld Kassel mit einer Latenz von etwa 5 Sekunden. Dadurch war die Nutzung von Detektorrohdaten für eine Prognose unmöglich. Folglich wurden für die Modelle aggregierte Detektordaten verwendet. Weiterhin war der applikationsspezifische Prognosehorizont zu beachten. Für ein Routing über möglichst viele LSA bei Grün ist bspw. die Prognose der Schaltzeiten sämtlicher LSA auf den möglichen Streckenzügen mit einer Vorausschau von mehreren Umläufen erforderlich. Für die Emissionsreduzierung durch das Abschalten des Motors während des Haltens vor einer roten LSA genügt hingegen ein Prognosehorizont, der zeitlich im Größenbereich der Phasenlänge liegt.

Aufgrund der genannten Randbedingungen wurden die verkehrlichen Daten getrennt nach den einzelnen Umläufen aufbereitet.

Eine besondere Stärke des Prognoseverfahrens mittels SVM ist die Tatsache, dass die Daten sämtlicher am Knotenpunkt befindlicher Detektoren nach den Datenmodellen aufbereitet werden. Im Vorfeld einer Prognose muss somit keine Vorauswahl bestimmter Detektoren getroffen werden, die womöglich einen Einfluss auf die resultierenden Schaltzeiten haben könnten und somit in das Datenmodell aufgenommen werden müssten. Durch die Bildung der Hyperebenen im mehrdimensionalen Raum haben diejenigen verkehrlichen Daten, welche keinen Einfluss auf die Schaltzeiten haben, auch keinen negativen Einfluss auf die resultierende Prognosegüte.

Einen ähnlichen Vorteil bieten die Regressionsbäume. Auch unter Verwendung dieses Klassifikationsverfahrens werden die Daten sämtlicher Detektoren nach den Datenmodellen in eine Prognose einbezogen. Die verkehrlichen Daten ohne Einfluss auf die Schaltzeiten erzeugen folglich kein Entscheidungskriterium an einem Regressionsknoten, so dass lediglich tatsächlich relevante Detektordaten Einfluss auf die resultierende Prognosegüte haben.

Da für verschiedene Signalprogramme auch unterschiedliche zeitliche Freigabebereiche für die einzelnen Signalgruppen eines Knotenpunktes versorgt sein können, wurden die historischen Daten (Signaldaten, Detektordaten, etc.) nach Signalprogrammnummern aufgeteilt. Aufgrund der Latenzzeiten in Düsseldorf und Kassel wurden die Daten der IV-Detektoren zu einer Verkehrsstärke bezogen auf einen LSA-Umlauf aggregiert. Ziel dieses Datenmodells war die Berücksichtigung des tageszeitlich bedingt schwankenden Verkehrsaufkommens innerhalb einer Prognose. Grund für die Wahl der Verkehrsstärke war die Annahme, dass ein verkehrsabhängiges Freigabefenster während der Spitzenzeiten fast immer sein Maximum erreicht, während der Schwachlastzeiten jedoch fast immer zum frühestmöglichen Zeitpunkt innerhalb eines Umlaufs abgebrochen wird. Das Datenmodell unter Verwendung von IV-Detektordaten ist in Abbildung 3-5 am Beispiel eines Knotenpunkts mit 5 Signalgruppen und 4 IV-Detektoren dargestellt.

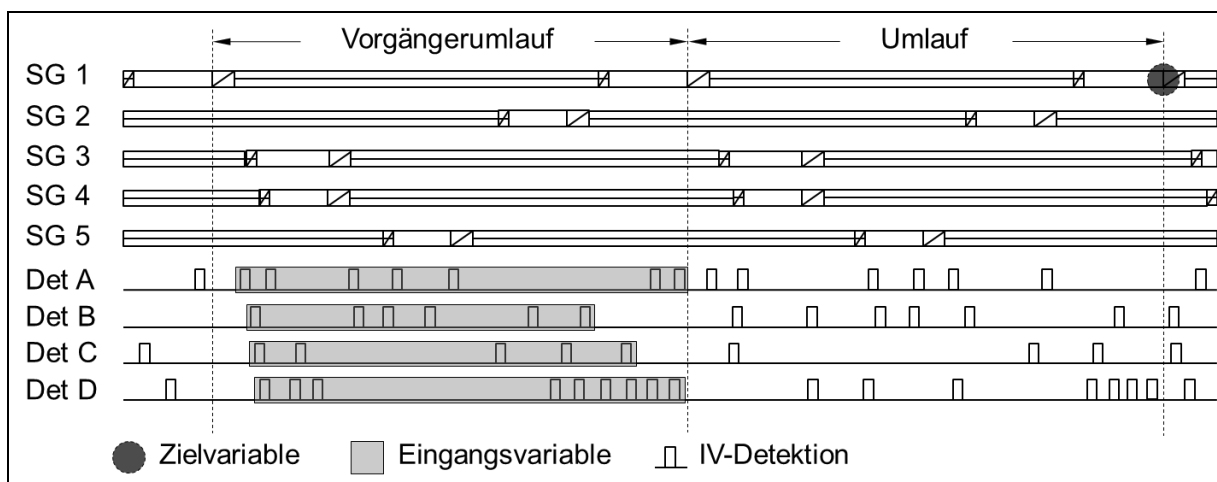


Abbildung 3-5: Datenmodell unter Verwendung von IV-Detektordaten mit einem Prognosehorizont von einem Umlauf

Die Verkehrsstärke eines jeden Detektors geht dabei als Eingangsvariable in die Prognose ein, die resultierenden Schaltzeiten werden als Zielvariablen behandelt. Je nach gewünschtem Prognosehorizont werden innerhalb der Datenmodelle die Eingangsvariablen eines Umlaufs mit den Zielvariablen der darauffolgenden Umläufe kombiniert. Für das Beispiel in Abbildung 3-5 gilt ein Prognosehorizont von einem Umlauf. Für eine Prognose der Schaltzeiten des übernächsten Umlaufs müssten die Eingangsvariablen in einem weiteren Datenmodell entsprechend mit diesen Schaltzeiten kombiniert werden. Die Prognoseergebnisse unter Verwendung von IV-Detektordaten wird für verschiedene Prognosehorizonte anhand ausgewählter Testsignalgruppen im Abschnitt *Test und Demonstration* erläutert.

Im Falle einer Verwendung von ÖV-Daten für eine Prognose wurde für jeden ÖV-Meldepunkt (MP) der Zeitpunkt bzw. die Umlaufsekunde T_x in das Datenmodell aufgenommen (Eingangsvariablen), zu dem eine An- bzw. Abmeldung eines ÖV-Fahrzeugs an diesem MP erfolgte. Liegt für einen MP innerhalb des betrachteten Umlaufs keine Meldung vor, wird ein $T_x=0$ im Datenmodell verwendet. Da eine ÖV-Meldung i.d.R. lediglich einen Einfluss auf die direkt bevorstehenden Schaltzeiten der verschiedenen Signalgruppen haben kann, nicht jedoch auf die darauffolgenden Schaltzeiten, wurde dieses Datenmodell lediglich für eine Prognose direkt bevorstehender Schaltzeiten angewendet. Abbildung 3-6 veranschaulicht das ÖV-Datenmodell für ein Beispiel mit 5 Signalgruppen und 4 ÖV-Meldepunkten.

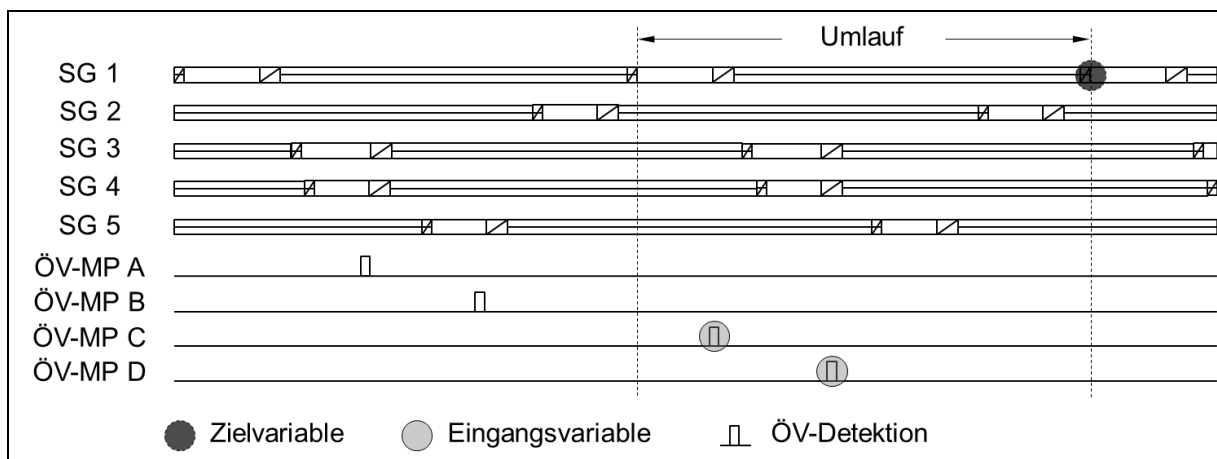


Abbildung 3-6: Datenmodell unter Verwendung von ÖV-Daten für eine Prognose direkt bevorstehender Schaltzeiten

Im Abschnitt *Test und Demonstration* werden ebenfalls Prognoseergebnisse ausgewählter Testsignalgruppen unter Verwendung von ÖV-Daten vorgestellt.

Nach der Aufbereitung der historischen Daten nach den vorgestellten Datenmodellen erlernen die SVM die Hyperebenen für verschiedene Prognosehorizonte aufgrund sogenannter Trainingsdaten. Hierbei ist zu beachten, dass das Verfahren lediglich eine Zielvariable, also entweder den Grünanfang oder das Grünende einer Signalgruppe prognostiziert. Es müssen folglich für jede Signalgruppe eines Knotenpunkts zwei Prognosen durchgeführt werden. In einem weiteren Schritt wurden die erlernten Hyperebenen auf einen Testdatensatz angewendet. Innerhalb der Testdaten wurden die verkehrlichen Daten nach denselben Modellen wie die Trainingsdaten aufbereitet. Aufgrund der durch die Trainingsdaten erlernten Hyper-

ebenen ergaben sich innerhalb der Testdaten verschiedene Prognosen der Schaltzeitpunkte, die den tatsächlich eingetretenen Schaltzeiten gegenübergestellt wurden. Tabelle 3-1 zeigt eine solche Gegenüberstellung beispielhaft für das Grünende einer Signalgruppe, welche hier vereinfacht mit X bezeichnet wird.

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung von prognostizierten und tatsächlich eingetretenen Schaltzeitpunkten innerhalb eines Testdatensatzes

Grünende SG X [Uml.-Sek.]		prognostiziert				
		32	34	35	37	38
eingetreten	32	798	0	8	0	0
	34	51	0	9	6	2
	35	0	0	16	7	6
	37	0	0	0	21	11
	38	2	0	0	0	294

Wie in Tabelle 3-1 deutlich zu erkennen ist, trifft eine Prognose nicht in jedem Fall den tatsächlich eintretenden Schaltzeitpunkt. Folglich ist eine direkte Weitergabe der prognostizierten Schaltzeiten an ein Fahrerassistenzsystem nach US-1 und US-2 kritisch, da diese im Falle einer fehlerhaften Prognose entsprechend falsche Informationen für den Fahrer generieren würden. Vielmehr benötigen diese Systeme Schaltzeiten mit einer bestimmten Mindestwahrscheinlichkeit, um vertretbare Handlungsempfehlungen an den Fahrer übergeben zu können. Daher müssen bei der Weitergabe der Schaltzeitprognosen sowohl die Prognosestreffer als auch –fehler Berücksichtigung finden. Dazu wird für jede Signalgruppe für den gewählten Prognosehorizont in Abhängigkeit der prognostizierten Schaltzeitpunkte eine Grünwahrscheinlichkeitsverteilung generiert. Zur Demonstration der Vorgehensweise soll hierbei das Beispiel aus Tabelle 3-1 dienen. Dabei soll ein Szenario mit einem festen Grünanfang zur Umlaufsekunde $T_x=12$ und einer Prognose des nächsten Grünendes zur Sekunde $T_x=32$ angenommen werden. Aufgrund des festen Grünanfangs ergibt sich ein Sprung der Grünwahrscheinlichkeit von Sekunde $T_x=11$ auf Sekunde $T_x=12$ von 0 auf 100%. Die Grünwahrscheinlichkeiten für das zugehörige Grünende ergeben sich aus den insgesamt 851 Prognosestreffern und –fehlern für diesen Prognosewert (= Spaltensumme nach Tabelle 3-1) wie folgt:

- $T_x=32$: $100\% - 798/851 = 100\% - 93,8\% = 6,2\%$
- $T_x=33$: entspricht $T_x=32$
- $T_x=34$: $100\% - (798+51)/851 = 100\% - 99,8\% = 0,2\%$
- $T_x=35$: $100\% - (798+51+0)/851 = 100\% - 99,8\% = 0,2\%$
- $T_x=36$: entspricht $T_x=35$
- $T_x=37$: $100\% - (798+51+0+0)/851 = 100\% - 99,8\% = 0,2\%$
- $T_x=38$: $100\% - (798+51+0+0+2)/851 = 100\% - 100\% = 0\%$

Für jede Signalgruppe eines Knotenpunkts ergibt sich somit je nach den entsprechenden Prognosewerten für Grünanfang und –ende eine Grünwahrscheinlichkeitsverteilung für den

gewählten Prognosehorizont. Für das hier berechnete Szenario zeigt Abbildung 3-7 den entsprechenden Verlauf. Je nach aktuellem Verkehrsablauf und entsprechender Prognose können sich für eine Signalgruppe unterschiedliche Verläufe ergeben. Diese werden an die Fahrerassistenzsysteme (US-1, US-2) übergeben und bilden die Grundlage für deren Informationsgenerierung. Dabei ist es sinnvoll, applikationsspezifische Grenzwerte für die Grünwahrscheinlichkeit zu definieren aus denen sich direkt die für eine Handlungsempfehlung maßgeblichen Schaltzeitpunkte für Grünanfang bzw. -ende ableiten. Für eine tiefere Erläuterung der Generierung von Fahrerinformationen sei jedoch an dieser Stelle auf den Abschnitt *US-1, US-2* verwiesen. Der zeitliche Bereich in Abbildung 3-7, in dem die Grünwahrscheinlichkeit zwischen 0% und 100% liegt, wird auch als Unsicherheitsbereich bezeichnet, da für diesen kein sicheres Grün bzw. Rot prognostiziert werden kann.

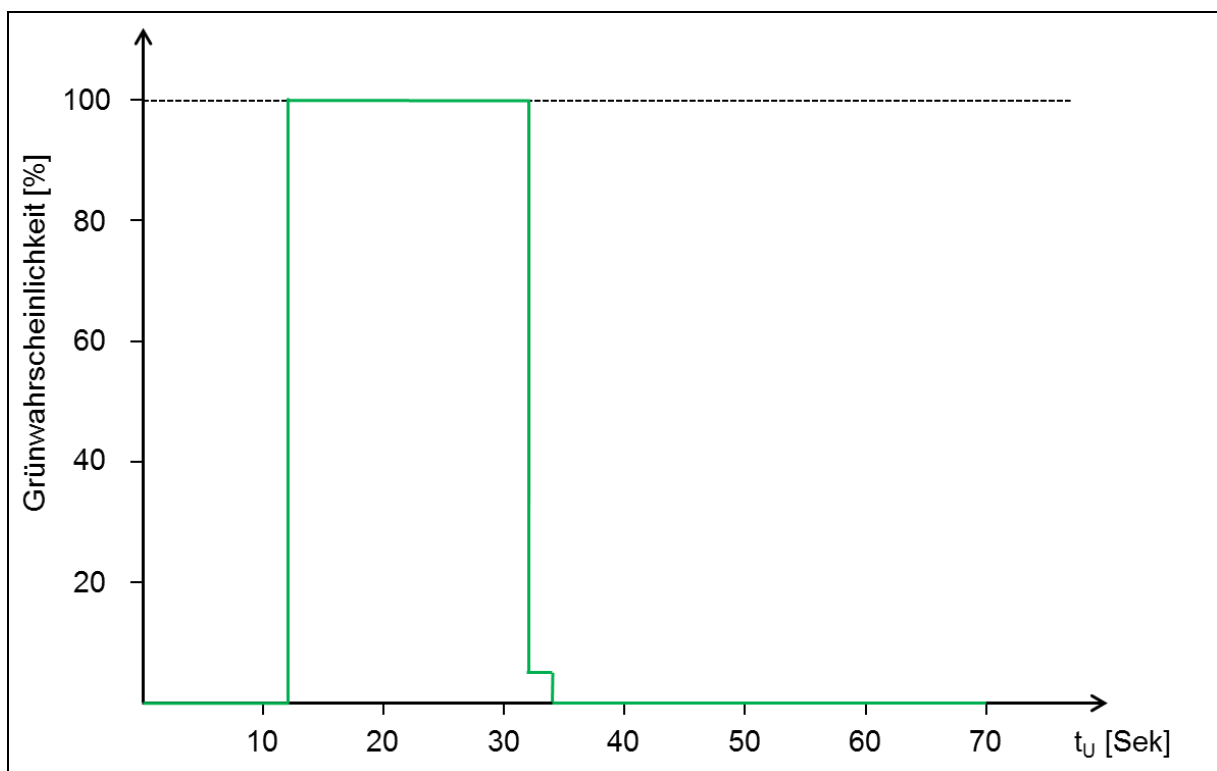


Abbildung 3-7: Grünwahrscheinlichkeitsverteilung für eine Signalgruppe mittels SVM

AP 4300: Test und Demonstration

Die hier vorgestellten Prognoseverfahren wurden an ausgewählten Signalgruppen verschiedener Knotenpunkte aus den Test- und Prüffeldern Düsseldorf und Kassel getestet. Nachfolgend sollen diese Knotenpunkte und deren zugrunde liegende Signalsteuerung kurz erläutert sowie die Prognoseergebnisse in Form von Grünwahrscheinlichkeitsverläufen dargestellt werden.

KP Oberbilker Markt (Düsseldorf)

Der Signallageplan des KP Oberbilker Markt ist in Abbildung 3-8 dargestellt. Dabei ist ebenfalls die für eine Prognose verwendete Test-Signalgruppe gekennzeichnet.

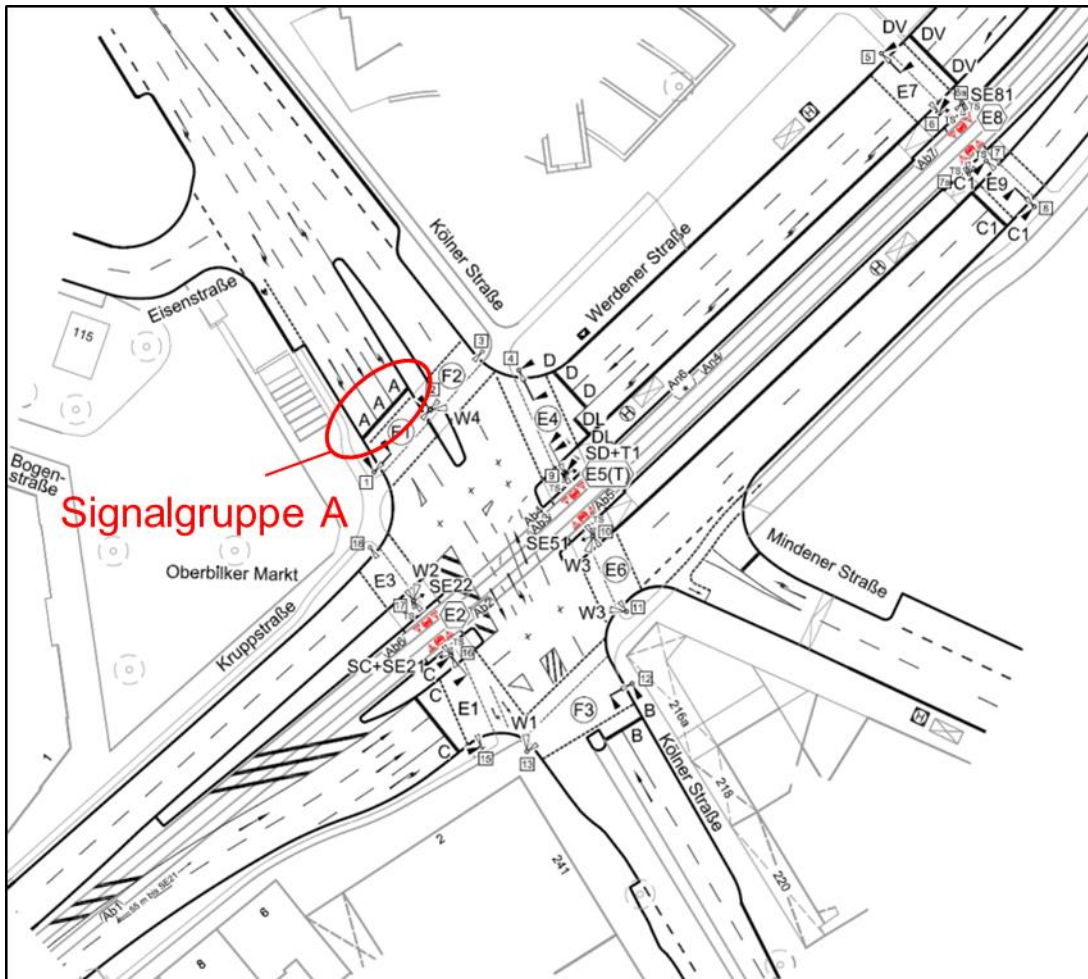


Abbildung 3-8: Signallageplan des KP Oberbilker Markt

Die Signalsteuerung ist ausschließlich ÖV-abhängig. Die Steuerungslogik wird von 7 verschiedenen ÖV-Meldepunkten beeinflusst und enthält zusätzlich verschiedene Anforderungsausschlüsse. Die IV-Signalgruppen werden je nach Zeitpunkt einer ÖV-Anmeldung zu verschiedenen Zeiten innerhalb eines Umlaufs freigegeben. Um die Komplexität der zugrunde liegenden Signalsteuerung zu verdeutlichen, stellt Abbildung 3-9 den Signalbildverlauf der Signalgruppe A (vgl. Abbildung 3-8) über einen Tag dar.

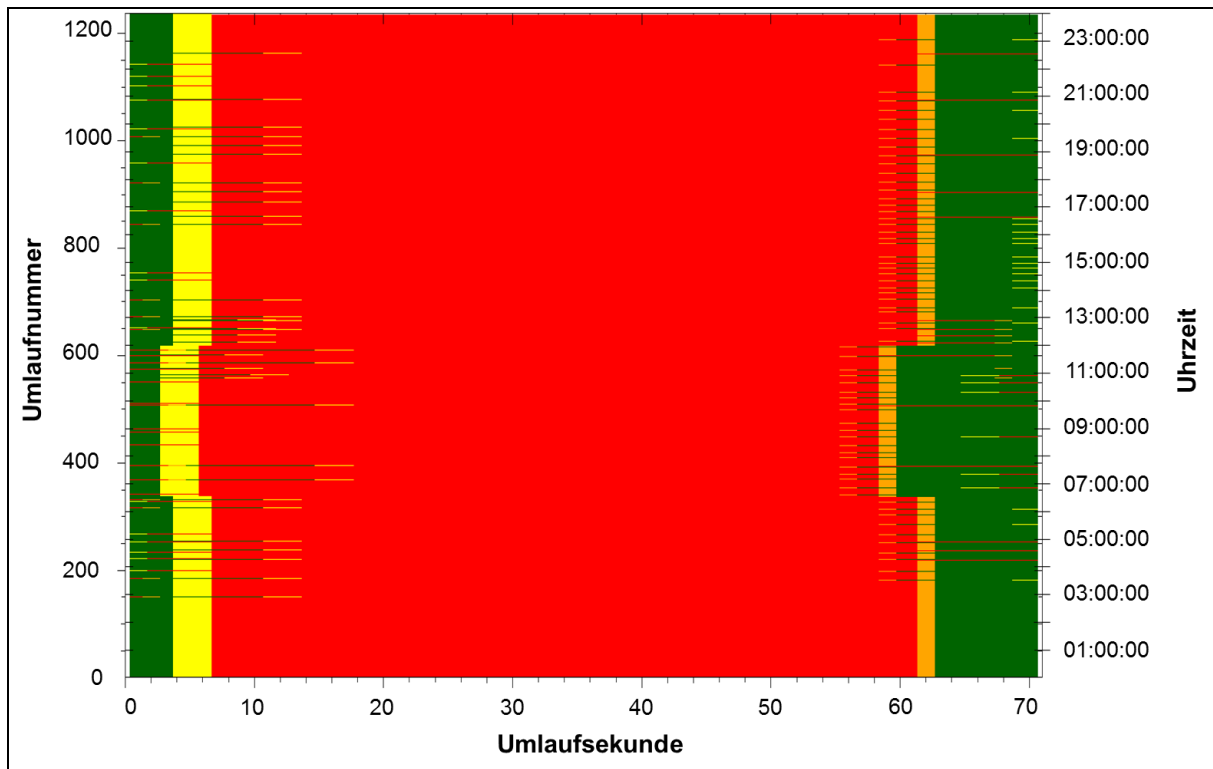


Abbildung 3-9: Signalbildverlauf der Signalgruppe A über einen Tag

Die verkehrlichen Daten wurden nach einzelnen Signalprogrammen aufgeteilt. Die nachfolgenden Ergebnisse beruhen auf den Daten lediglich eines Signalprogramms, wobei der Datenumfang 13.505 Umläufe betrug. Die Prognosealgorithmen nutzten 70% als Trainingsdaten, die übrigen 30% als Testdaten auf welchen die nachfolgenden Prognoseergebnisse beruhen. Allgemein konnte während der Testphase festgestellt werden, dass sich die Prognoseergebnisse der SVM von denen der Regressionsbäume kaum unterscheiden. Daher werden in den Grafiken für die Grünwahrscheinlichkeitsverteilungen in diesem Abschnitt lediglich Prognoseverläufe für unterschiedliche Prognosehorizonte und Datenmodelle unterschieden, nicht jedoch nach den verschiedenen Prognosealgorithmen. Zudem konnte festgestellt werden, dass sich die Ergebnisse für umlaufübergreifende Prognosen (1 Umlauf voraus, 2 Umläufe voraus, 3 Umläufe voraus) sehr stark ähneln, weshalb die Prognosehorizonte hier ausschließlich in eine Prognose innerhalb des aktuellen Umlaufs (nächster Grünbeginn und nächstes Grünende) und eine umlaufübergreifende Prognose (Prognose des übernächsten Grünbeginns bzw. Grünendes) unterschieden werden. Da der KP Oberbilker Markt lediglich eine ÖV-Abhängigkeit aufweist, ergaben sich 2 unterschiedliche Prognoseverläufe der Grünwahrscheinlichkeit (vgl. Abbildung 3-10). Zusätzlich wurden für die ausgewählten Test-Signalgruppen die relativen Grünwahrscheinlichkeiten (ohne Prognoseverfahren) berechnet und deren Verläufe in die Grafiken aufgenommen (Referenz).

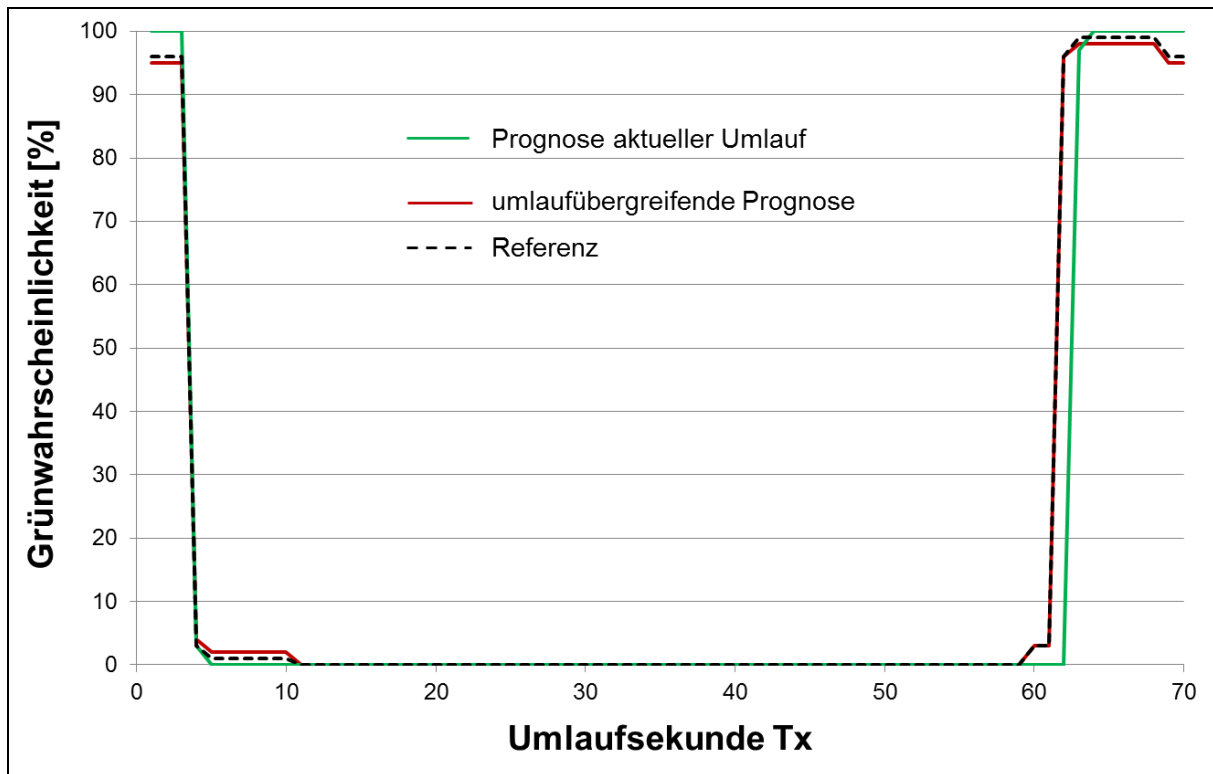


Abbildung 3-10: Grünwahrscheinlichkeiten mit und ohne Prognose für den KP Oberbilker Markt

Aus den Verläufen in Abbildung 3-10 lässt sich erkennen, dass sich durch die Verwendung einer Prognose umlaufübergreifend keine Verbesserung der Grünwahrscheinlichkeit im Sinne einer Verkleinerung der Unsicherheitsbereiche im Vergleich zum Referenzverlauf erreichen ließ. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass die für eine Prognose verwendeten ÖV-Daten lediglich einen Einfluss auf direkt bevorstehende Schaltzeiten haben, nicht jedoch auf die Schaltzeiten zukünftiger Umläufe. Eine Prognose der Schaltzeiten des aktuellen Umlaufs brachte hingegen deutlich sicherere Wahrscheinlichkeitssprünge, so dass sich die Unsicherheitsbereiche im Bereich von Grünanfang und –ende verkleinern ließen.

KP Südring (Düsseldorf)

Der Signallageplan dieses Knotenpunktes ist mit der betrachteten Test-Signalgruppe DL in Abbildung 3-11 dargestellt.

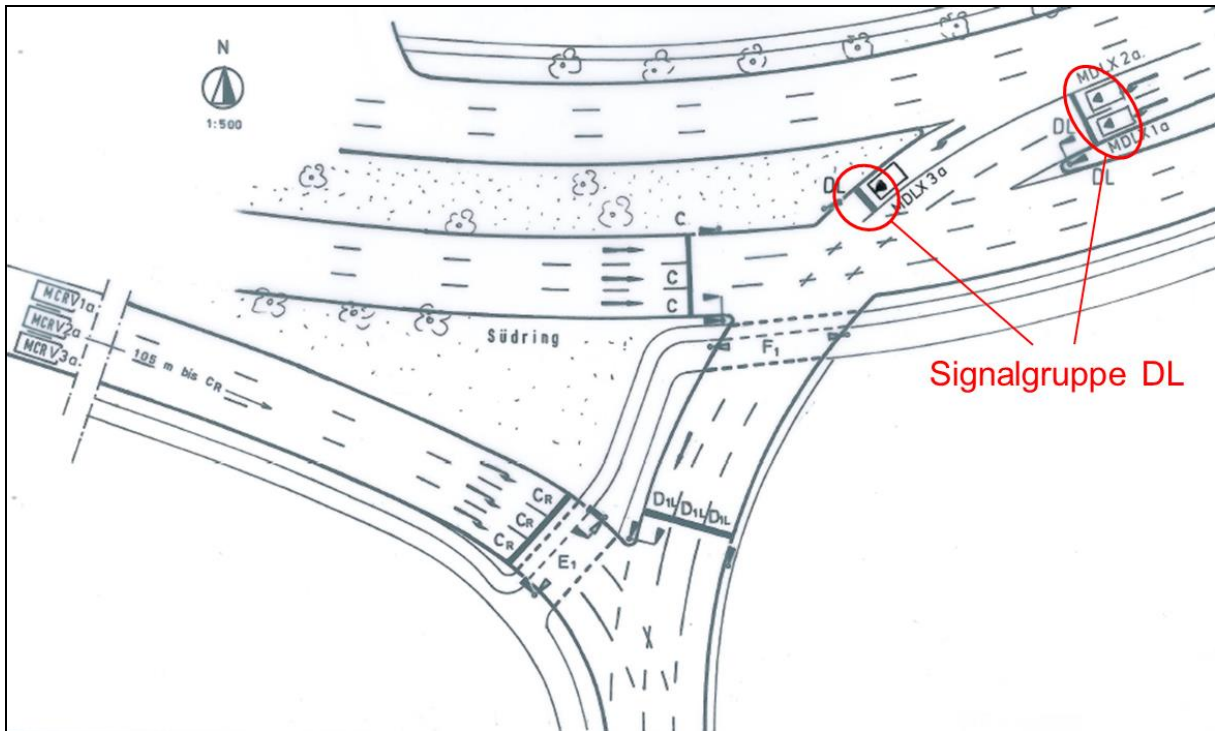


Abbildung 3-11: Signallageplan des KP Südring

Die Signalsteuerung wird in dem Fall ausschließlich durch den IV beeinflusst. Die Freigabezeit der Signalgruppe DL kann dabei in Abhängigkeit eines Zeitlückenkriteriums der haltliniennahen Detektoren angepasst werden. Die Freigabezeit der Signalgruppe CR kann in Abhängigkeit einer Rückstauererkennung an den entsprechenden Detektoren in der westlichen Zufahrt verlängert werden. Der Signalbildverlauf der Signalgruppe DL über einen Tag ist in Abbildung 3-12 dargestellt.

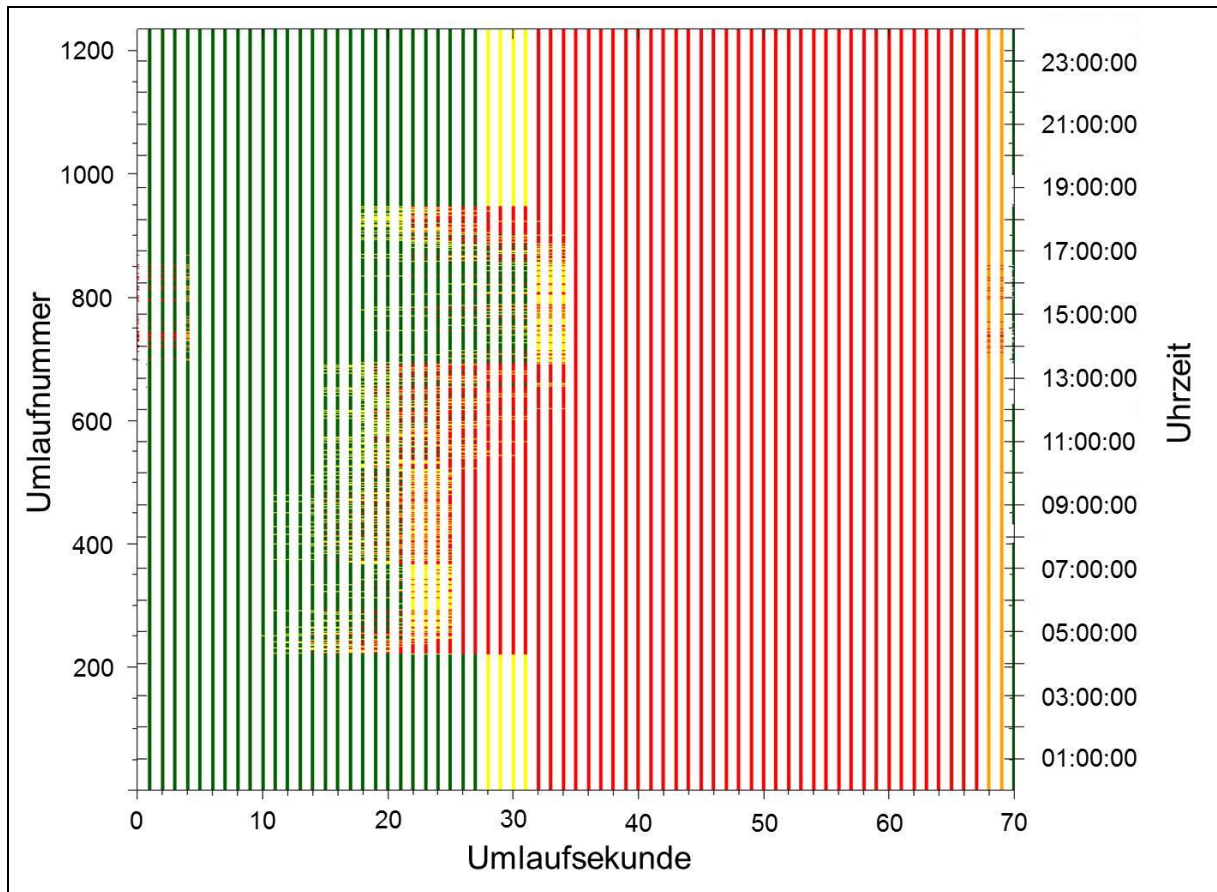


Abbildung 3-12: Signalbildverlauf der Signalgruppe DL über einen Tag

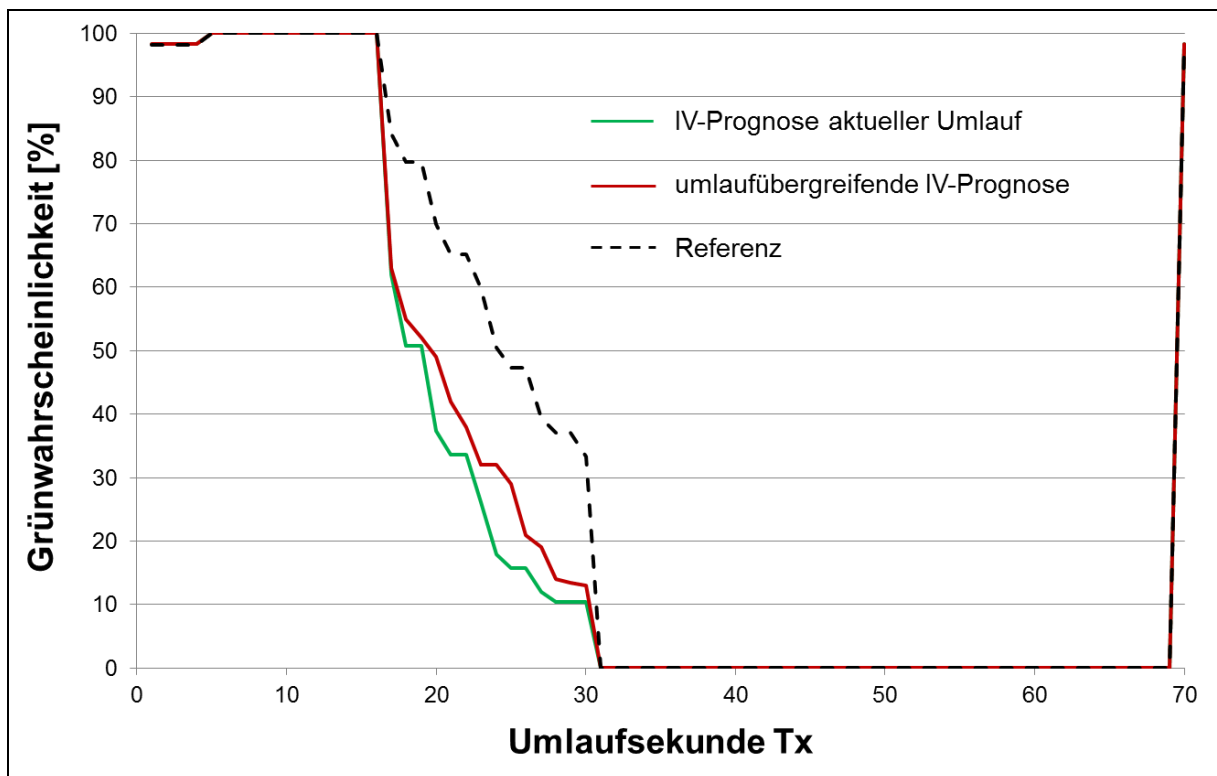


Abbildung 3-13: Grünwahrscheinlichkeiten mit und ohne Prognose für den KP Südring

Der Datenumfang für das betrachtete Signalprogramm betrug 7.204 Umläufe. Die Verläufe der Grünwahrscheinlichkeiten zeigt Abbildung 3-13. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass sich der Unsicherheitsbereich zwischen frühestem und spätestem Grünende durch die Verwendung einer Prognose nicht verkleinern ließ. Zwar ergaben sich im Vergleich zu einem Referenzverlauf deutlich höhere Wahrscheinlichkeitssprünge, dennoch kann kein sicheres Rot bzw. Grün an ein Fahrerassistenzsystem übergeben werden. Allgemein ist die Verkehrsstärke keine optimale Eingangsvariable für eine Prognose, da die Schaltzeiten im Falle einer Zeitlückensteuerung direkt von den eintretenden Zeitlücken an den Detektoren vor Ort abhängig sind und diese Zeitlücken nur sehr schwach mit der Verkehrsstärke korrelieren.

KP Auestadion (Kassel)

Der Signallageplan des Kasseler KP Auestadion ist in Abbildung 3-14 dargestellt. Die ausgewählte Test-Signalgruppe 9 ist ebenfalls gekennzeichnet.

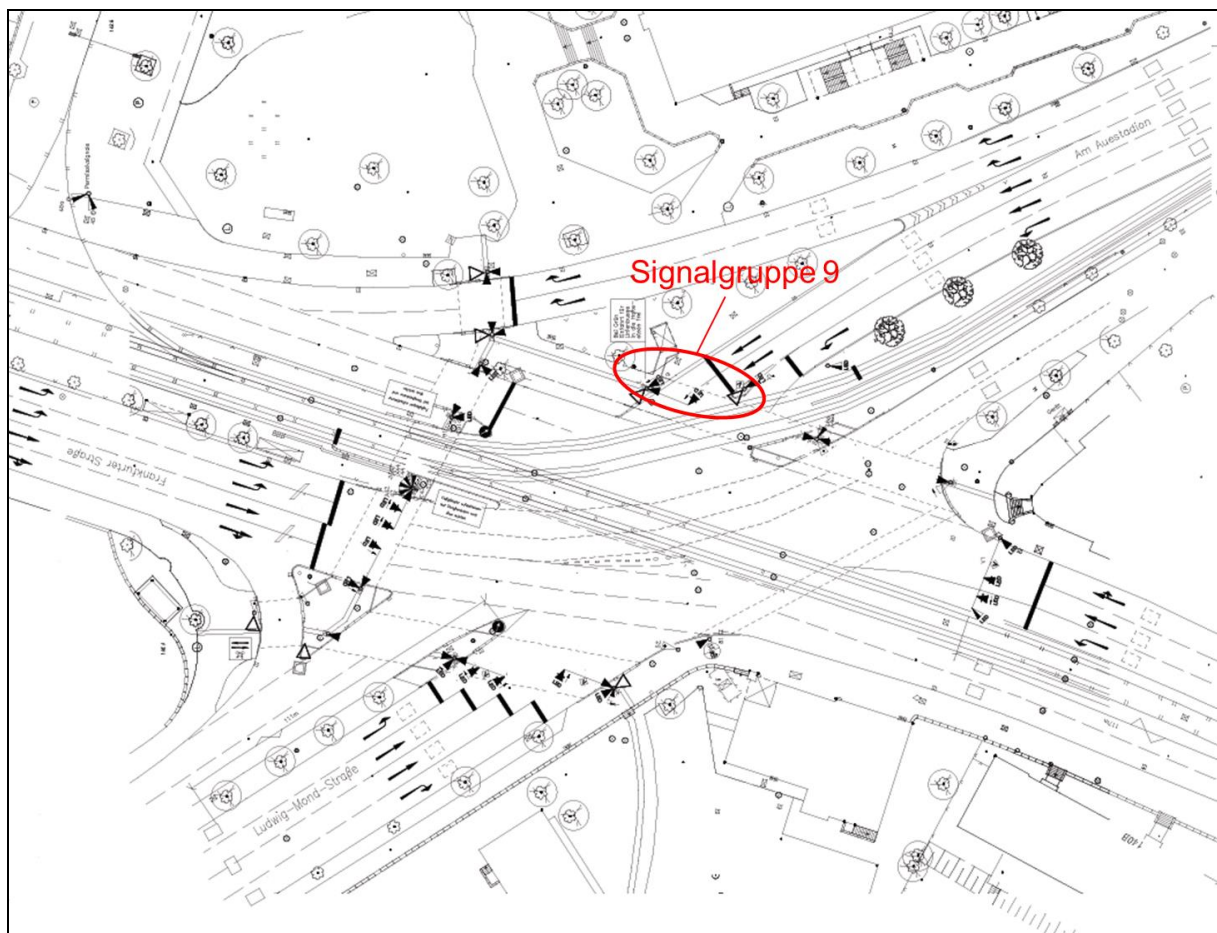


Abbildung 3-14: Signallageplan des KP Auestadion

Die Signalsteuerung dieses Knotenpunktes ist vergleichsweise komplex. Während bei den vorangegangenen Testknotenpunkten auch Signalgruppen mit festen Schaltzeiten vorhanden waren, sind für den KP Auestadion die Schaltzeiten jeder Fz-Signalgruppe sowohl im Bereich des Grünanfangs als auch im Bereich des Grünendes verkehrsabhängig veränderbar. Die Signalsteuerung reagiert neben ÖV-Fahrzeugen auch auf IV-Detektionen. Der Signalbildverlauf über einen Tag der Test-Signalgruppe 9 ist in Abbildung 3-15 dargestellt.

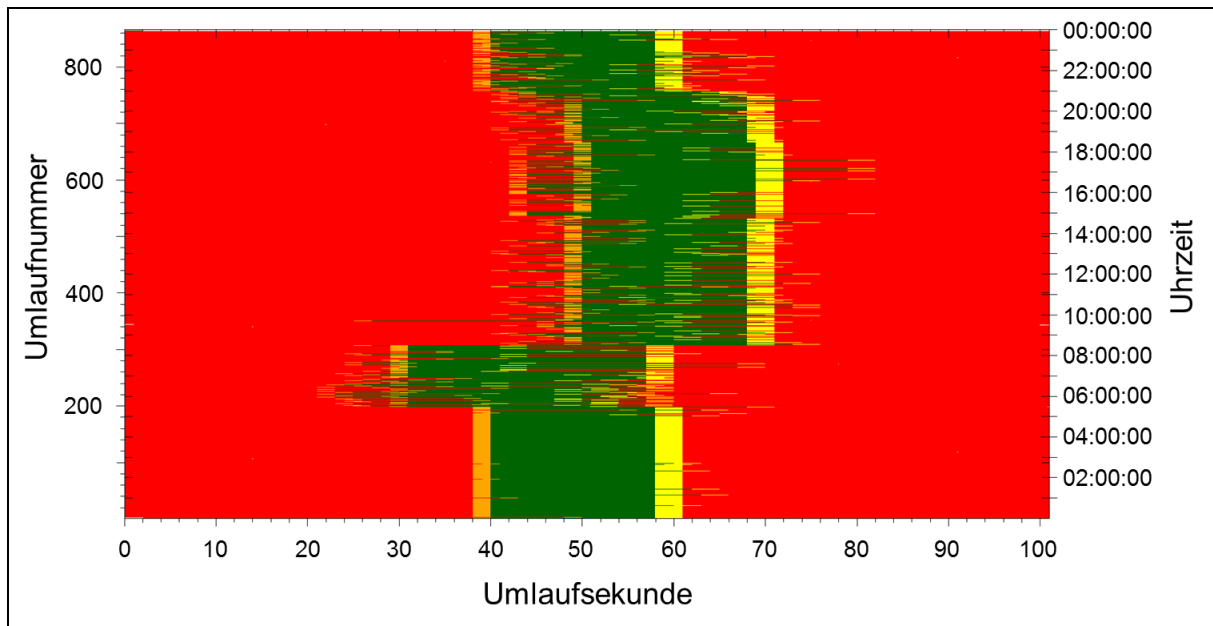


Abbildung 3-15: Signalbildverlauf der Signalgruppe 9 über einen Tag

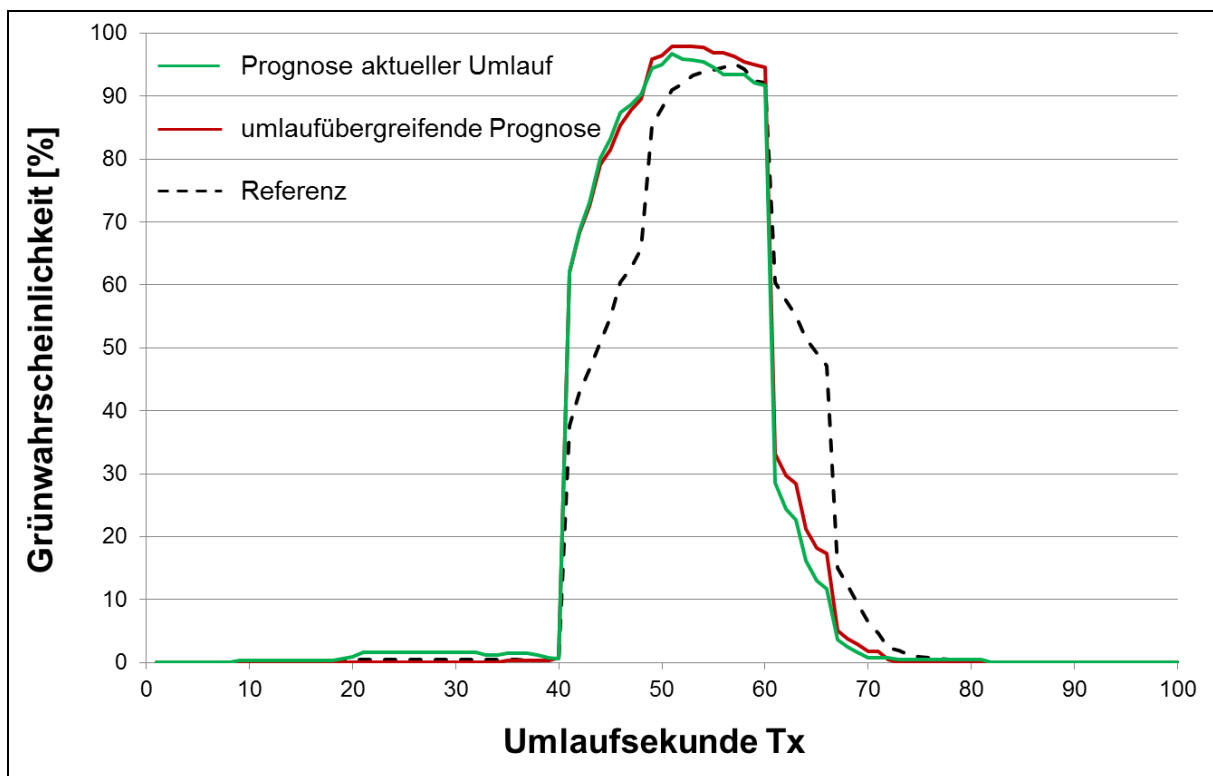


Abbildung 3-16: Grünwahrscheinlichkeiten mit und ohne Prognose für den KP Auestadion

Der Datenumfang für das betrachtete Signalprogramm betrug 17.324 Umläufe. In den Prognosen wurden sowohl IV- als auch ÖV-Daten berücksichtigt. Auch für dieses Beispiel ließ sich feststellen, dass sich unter Verwendung einer Prognose zwar größere Wahrscheinlichkeitssprünge im Vergleich zu einem Referenzverlauf ergeben (vgl. Abbildung 3-16), diese jedoch den zeitlichen Bereich der „unsicheren“ Grünwahrscheinlichkeiten nicht verkleinern können. Neben der Tatsache, dass die Verkehrsstärke keine optimale Eingangsvariable für eine Prognose ist, könnte eine weitere Ursache für die dargestellten Ergebnisse womöglich

in der Steuerungslogik selbst begründet liegen. Diese könnte verschiedene Anforderungsausschlüsse beinhalten, wodurch bspw. ein gleitender Freigabezeitabbruch infolge eines Zeitlückenkriteriums durch eine ÖV-Anmeldung unwirksam wird.

KP Dresdener Straße (Kassel)

Der Signallageplan des KP Dresdener Straße ist mit Kennzeichnung der gewählten Test-Signalgruppe in Abbildung 3-18 dargestellt.

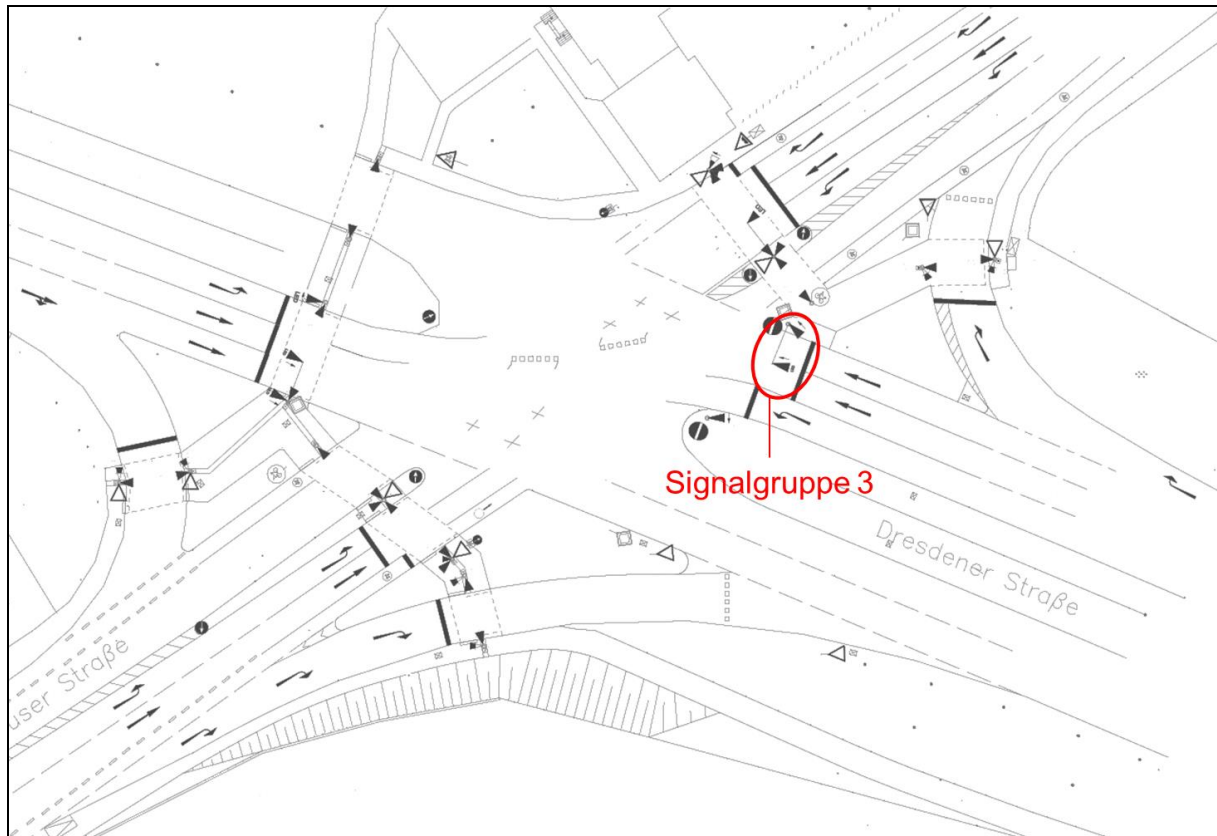


Abbildung 3-17: Signallageplan des KP Dresdener Straße

Aus dem Signallageplan in Abbildung 3-17 geht hervor, dass dieser über keinerlei IV-Detektoren oder ÖV-Meldepunkte verfügt. Die Schaltzeiten dieses Test-KP sind folglich ausschließlich durch Fußgängeranmeldungen beeinflusst. Der Signalbildverlauf über einen Tag der SG 3 ist in Abbildung 3-18 dargestellt. Dieser zeigt, dass deren Grünanfang im Falle einer FG-Anmeldung um einen festen zeitlichen Betrag verzögert wird. Das Grünende bleibt hingegen konstant.

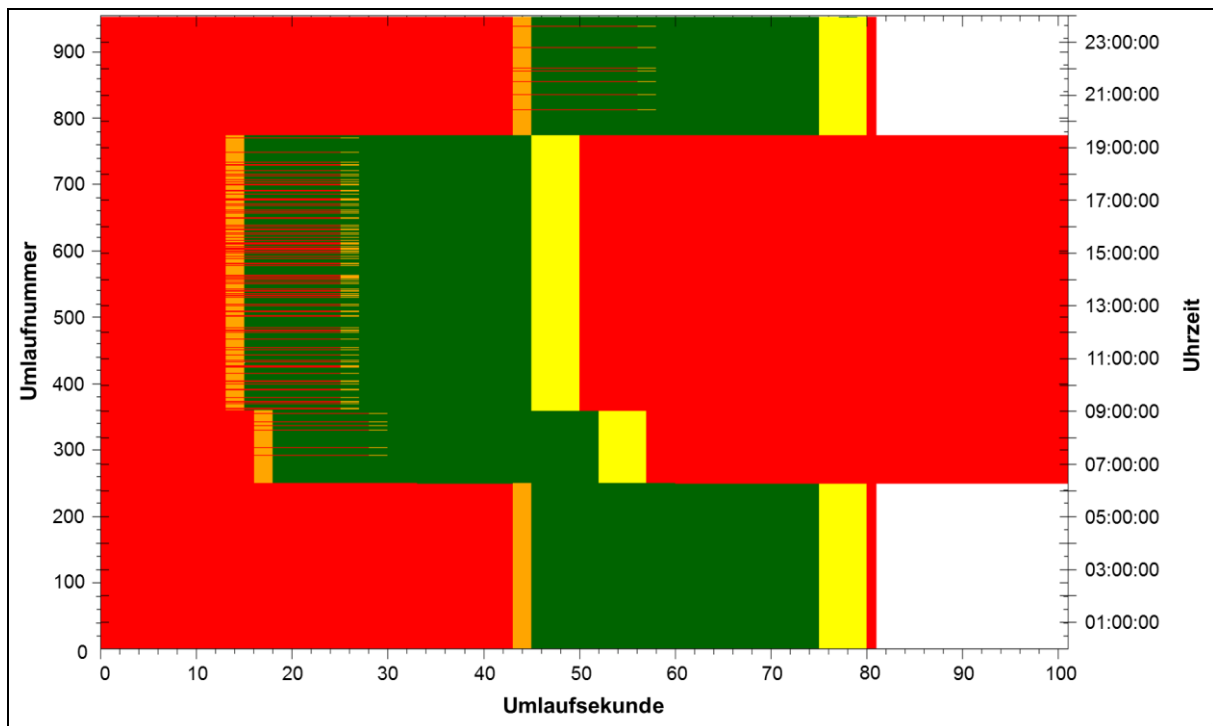


Abbildung 3-18: Signalbildverlauf der Signalgruppe 3 über einen Tag

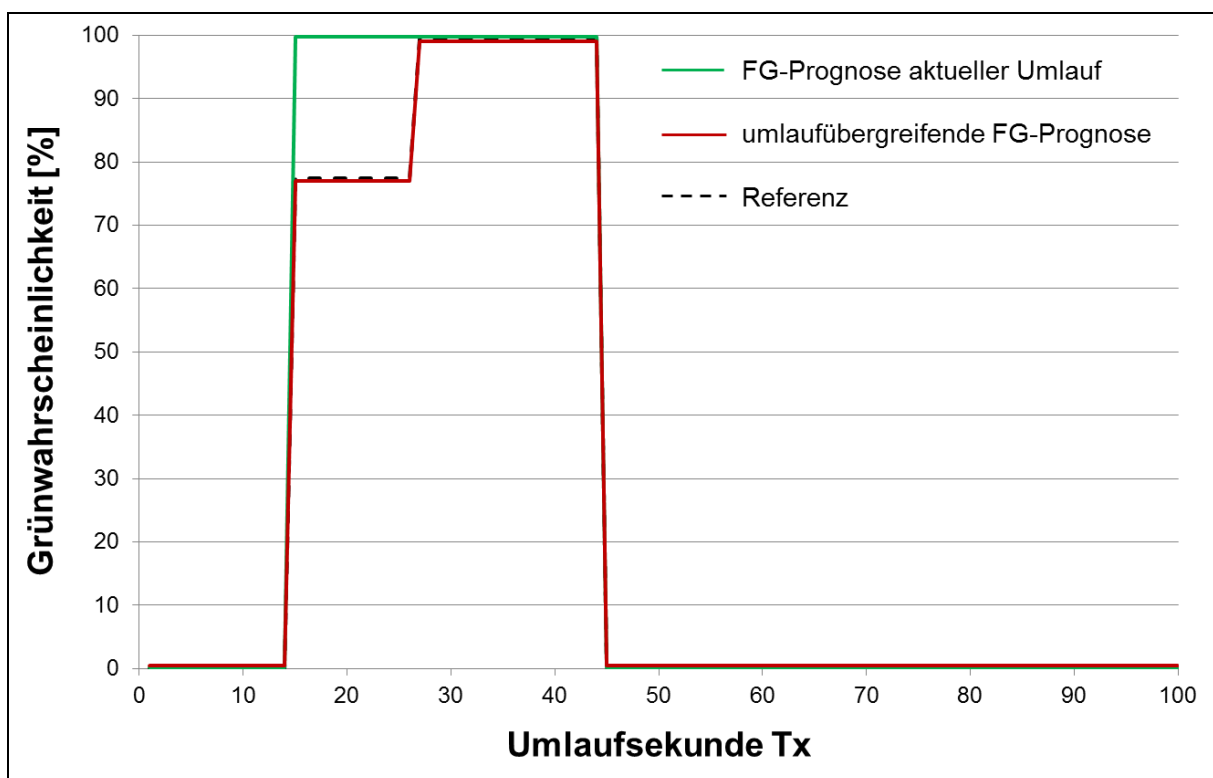


Abbildung 3-19: Grünwahrscheinlichkeiten mit und ohne Prognose für den KP Dresdener Straße

Der Datenumfang für das betrachtete Signalprogramm betrug 5.198 Umläufe. Für eine Schaltzeitprognose wurden in dem Fall die Zeitpunkte einer FG-Anmeldung nach dem Prinzip des Datenmodells für ÖV-Daten eines jeden Umlaufs verwendet. Aufgrund des festen Grünendes decken sich die Wahrscheinlichkeitsverläufe unter Verwendung einer Prognose

in diesem Bereich mit dem Referenzverlauf (vgl. Abbildung 3-19). Im Bereich des Grünanfangs ergab sich lediglich für eine Prognose für den direkt bevorstehenden Grünbeginn eine deutliche Verkleinerung des Unsicherheitsbereichs gegenüber dem Referenzverlauf. Auch hier liegt die Begründung in der Tatsache, dass die FG-Anmeldungen umlaufübergreifend keinen Einfluss auf die Schaltzeiten haben, sondern ausschließlich den direkt bevorstehenden Grünanfang beeinflussen.

KP B83 (Kassel)

Der markanteste Knotenpunkt im Hinblick auf die Signalsteuerung liegt ebenfalls im Prüffeld Kassel und wird hier als KP B83 bezeichnet. Den Signallageplan mit Kennzeichnung der Test-Signalgruppe zeigt Abbildung 3-20.

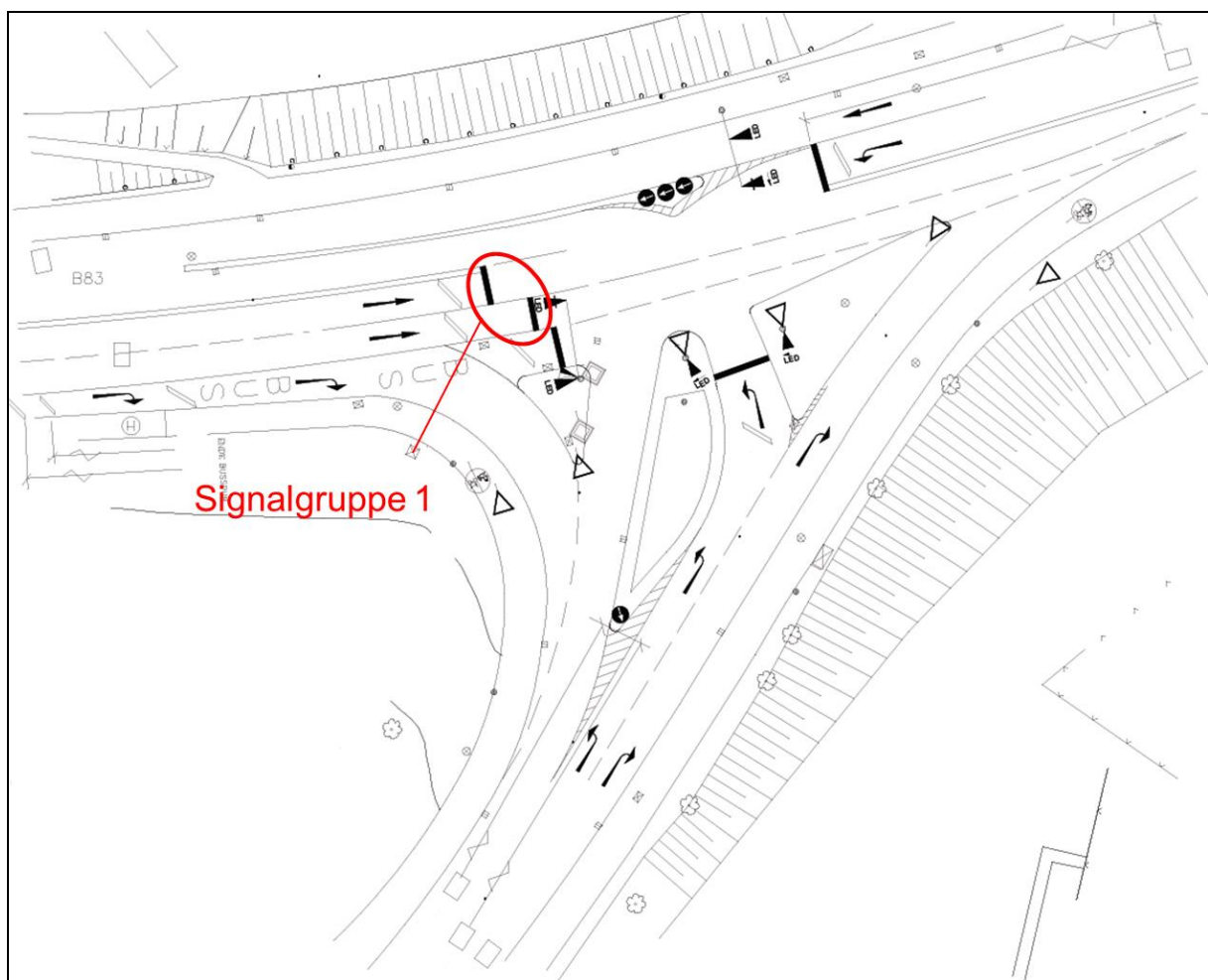


Abbildung 3-20: Signallageplan des KP B83

Der Signalbildverlauf der Test-Signalgruppe 1 in Abbildung 3-21 zeigt, dass es sich bei der Signalsteuerung in dem Fall um eine Signalprogrammabildung handelt. Dabei sind Phasenfolge, Phasenanzahl und die Freigabezeiten frei veränderbar. Der Verkehrsstrom der hier betrachteten Signalgruppe 1 wird nur gesperrt, wenn eine Anforderung des gegenüberliegenden Linksabbiegerstroms oder des Linkseinbiegerstroms aus der Nebenrichtung vorliegt. Die Freigabe für diese Ströme erfolgt dabei nicht zu einem bestimmten Zeitpunkt im Umlauf.

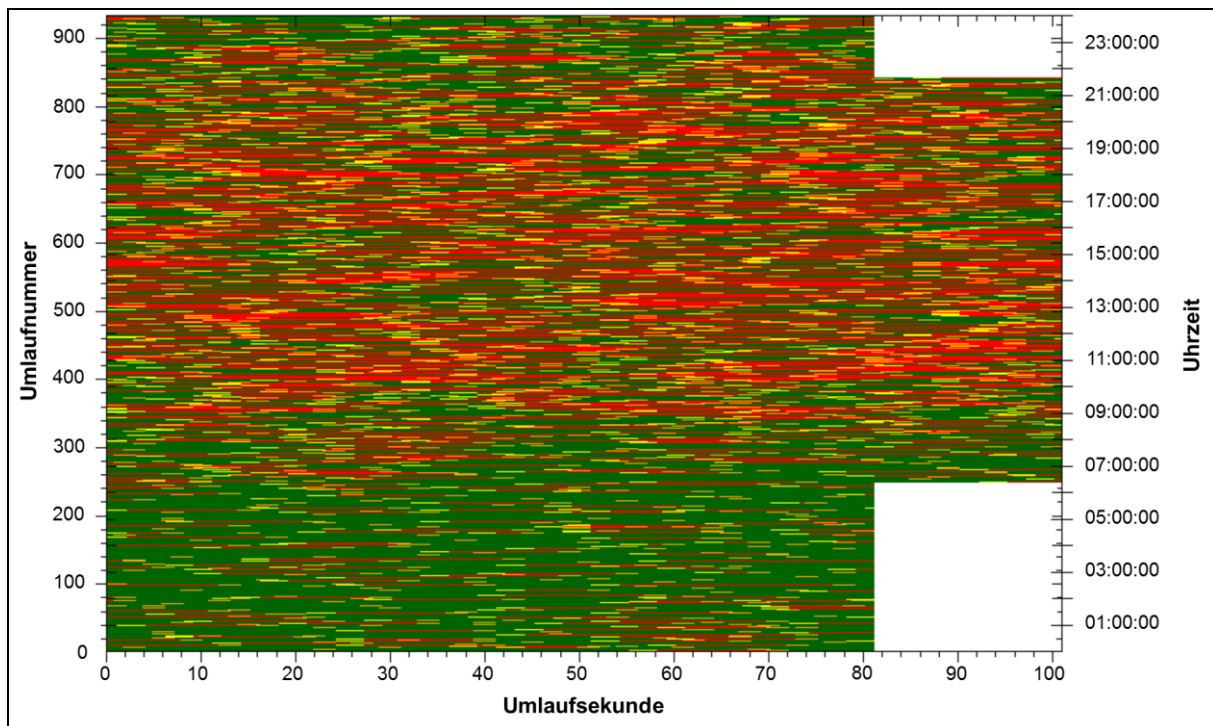


Abbildung 3-21: Signalbildverlauf der Signalgruppe 1 über einen Tag

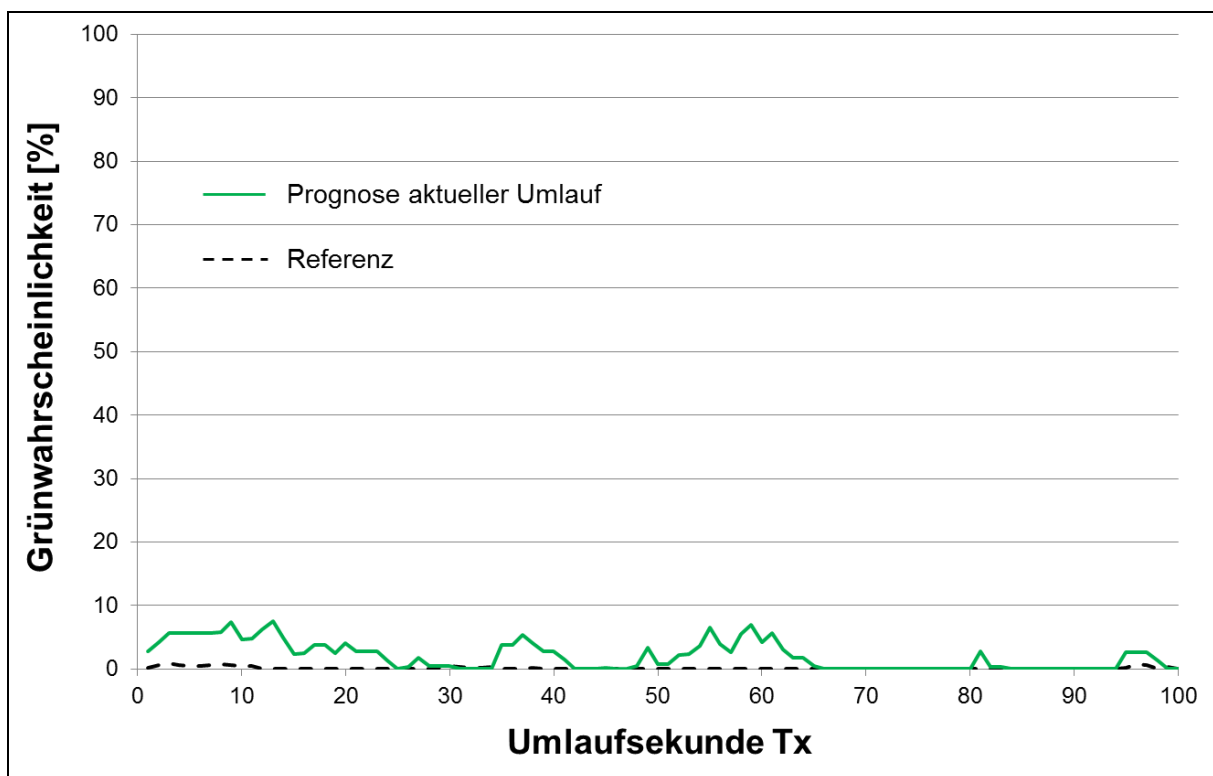


Abbildung 3-22: Grünwahrscheinlichkeiten mit und ohne Prognose für den KP B83

Der Datenumfang für das untersuchte Signalprogramm betrug 11.206 Umläufe. Da für den KP B83 alle Signalprogrammelemente frei veränderbar sind, traten die Schaltzeiten der betrachteten Signalgruppe 1 zu jeder beliebigen Sekunde innerhalb eines Umlaufs auf. Der Referenzverlauf verläuft daher nahezu gleichverteilt auf der Achse der Umlaufsekunden TX (vgl. Abbildung 3-22). Umlaufübergreifend können keine brauchbaren Prognosen generiert

werden, da die entsprechenden Systemvariablen keinen Zusammenhang aufweisen. Ein entsprechender Grünwahrscheinlichkeitsverlauf wäre deckungsgleich mit dem Referenzverlauf, weshalb an dieser Stelle auf dessen Darstellung in Abbildung 3-22 verzichtet wurde. Durch die Verwendung der Verkehrsstärke für eine Prognose direkt bevorstehender Schaltzeiten ließen sich die Werte für die Grünwahrscheinlichkeit an bestimmten Stellen nur geringfügig verbessern. Jedoch lassen sich diese keinesfalls für eine Informationsgenerierung innerhalb eines Fahrerassistenzsystems verwenden.

Die hier vorgestellten Anwendungsfälle dienten während der Forschungsarbeiten zum Test der verschiedenen Prognoseverfahren sowie diverser Datenmodelle in Vorbereitung auf eine betriebliche Umsetzung der Schaltzeitprognose in den Test- und Prüffeldern. Der Schwerpunkt der betrieblichen Umsetzung lag in der Erstellung einer Software-Applikation und eines betrieblichen Prozesses, der es mit möglichst wenig Aufwand erlaubt, für alle geeigneten Signalgruppen einer Stadt eine Schaltzeitprognose zu erstellen und online zu verteilen. Da die betriebliche Umsetzung von dem Projektpartner Gevas Software übernommen wurde, wird an dieser Stelle für eine tiefergehende Auswertung der Schaltzeitprognose in Düsseldorf und Kassel auf den Firmenabschlussbericht von Gevas Software verwiesen.

AP 5300: Bewertung

Aus verkehrlicher Sicht ergeben sich durch die Kenntnis der bevorstehenden Schaltzeitpunkte wesentliche Verbesserungsmöglichkeiten. Der Fahrer ist durch die Kenntnis der bevorstehenden Umschaltzeitpunkte in der Lage, seine Zufahrt auf einen lichtsignalisierten Knotenpunkt zu optimieren. Durch die Vorankündigung wird die Zeit, bis das erste Fahrzeug die Haltlinie passiert hat, reduziert. Bei hoher Verkehrsbelastung kann somit auch die Verkehrskapazität gesteigert werden. Diese verkehrlichen Wirkungen resultieren allerdings nicht aus der Schaltzeitprognose direkt, sondern aus den Applikationen Verzögerungs- und Grüne Welle Assistent (US-1, US-2). Daher wurde die verkehrliche, ökologische Wirkung für die Schaltzeitprognose nicht bewertet.

Jedoch lässt sich die Wirkung einer Schaltzeitprognose in Hinblick auf eine mögliche Verkleinerung der statistisch unsicheren zeitlichen Bereiche innerhalb eines Umlaufs, für die nicht sicher ist ob das Signalbild Rot oder Grün zeigen wird, bewerten. Es ließ sich feststellen, dass eine Schaltzeitprognose erwartungsgemäß mit steigender Komplexität der Signalsteuerung an Nutzen verliert. Bei einer Zeitlückensteuerung bspw. reagiert die Steuerungslogik innerhalb von Sekunden auf den Verkehrsablauf. Daher lassen sich die verkehrabhängigen Schaltzeiten, wenn überhaupt, nur unter einem sehr kurzen zeitlichen Horizont mit einer ausreichenden statistischen Sicherheit prognostizieren, wodurch sie für die Generierung einer Handlungsempfehlung für den Fahrer nicht mehr verwertbar sind. Zudem müssen für solche Fälle idealerweise Latenzzeiten im Bereich von Millisekunden vorhanden sein, was in den Test- und Prüffeldern nicht der Fall war. Umlaufübergreifende Prognosen brachten nur sehr selten einen Informationsgewinn im Vergleich zu einer rein statistischen Häufigkeitsverteilung der Schaltzeiten, da die verwendeten Detektordaten lediglich einen Einfluss auf direkt bevorstehende Schaltzeitpunkte einer Signalgruppe haben. Um die Prognoseergebnisse für diese Fälle zu verbessern, müsste der genaue Verkehrsablauf für zukünftige

Umläufe prognostiziert werden, was jedoch aufgrund des sehr instationären Verkehrsflusses in der Realität kaum möglich scheint. Eine Ausnahme bilden hierbei teilverkehrsabhängige Knotenpunkte mit FG- und/oder ÖV-Beeinflussung. Deren direkt bevorstehende Schaltzeiten lassen sich aufgrund meist konstanter Phaseneinschübe gut prognostizieren. Auch der Prognosehorizont ist in diesen Fällen ausreichend hoch, um eine brauchbare Fahrerinformation generieren zu können.

3.2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Generierung von Fahrerinformationen in den Assistenzsystemen nach US-1 und US-2 beruht auf der Verwendung von bevorstehenden Schaltzeitpunkten (Grünanfang und Grünnende), welche mit einer bestimmten Mindestwahrscheinlichkeit eintreten müssen. Allein unter der Verwendung historischer Schaltzeiten ergeben sich je nach Komplexität der zugrunde liegenden Signalsteuerung verschieden große zeitliche Bereiche innerhalb eines Umlaufs, für welche diese Mindestwahrscheinlichkeit nicht erreicht wird. Zwar sind für einen Großteil der städtischen Signalgruppen trotz dieser sogenannten Unsicherheitsbereiche dennoch zeitliche Kernbereiche vorhanden, für welche der Signalgruppenzustand Grün statistisch sicher ist, jedoch umfassen diese, speziell im Prüffeld Kassel, nur wenige Sekunden. Zudem können sich die Unsicherheitsbereiche u.U. auch über den gesamten Umlauf erstrecken.

Die Verkleinerung oder gar vollständige Eliminierung der beschriebenen Unsicherheitsbereiche durch eine Schaltzeitprognose erzielt folglich einen Mehrwert bzgl. der Informationsgenerierung durch die Fahrerassistenzsysteme, da die statistisch sichere Grünzeit einer Signalgruppe innerhalb eines Umlaufs verlängert oder überhaupt erst identifiziert werden kann. Je nach aktuellem Verkehrsablauf sind somit aufgrund der verbesserten Informationslage mehr Fahrzeuge in der Lage, den betreffenden Knotenpunkt während der Grünphase zu passieren.

3.2.3 Nutzen des Systems

Die Umsetzung der Schaltzeitprognose hat sich unter Verwendung verschiedener Prognosealgorithmen in Hinblick auf eine einfache Übertragbarkeit auf verschieden komplexe Steuerungsverfahren als technisch machbar erwiesen. Aufgrund der in den Test- und Prüffeldern vorhandenen Latenzzeiten und durch die von den Applikationen aus US-1 und US-2 geforderten Prognosehorizonte ließen sich Unsicherheitsbereiche innerhalb eines Umlaufs für Signalgruppen mit einer Freigabezeitanpassung nur selten verkleinern. Unter der Annahme entsprechend kurzer Latenzzeiten im Bereich von Millisekunden und kurzer Prognosehorizonte (≤ 5 Sekunden) ließen sich jedoch auch für diese Fälle verlängerte statistisch sichere Grünzeiten generieren (vgl. Meilensteinbericht 4 – Bewertung). Eine Schaltzeitprognose liefert jedoch für vergleichsweise einfache Steuerungsverfahren mit einer Phasenforderung durch Fußgänger und ÖV-Fahrzeuge sichere Ergebnisse, welche deutlich verlängerte sichere Grünzeiten im Vergleich zu einer historischen Häufigkeitsverteilung liefern. Zudem ist der Prognosehorizont in diesen Fällen für die Generierung einer entsprechenden Handlungsempfehlung für den Fahrer, welche durch diesen auch befolgt werden kann, ausreichend groß. Der Nutzen der Schaltzeitprognose infolge der betrieblichen Umsetzung in den Test-

und Prüffeldern kann dem Firmenbericht des Projektpartners Gevas Software, sowie dem Meilensteinbericht 4 – Bewertung entnommen werden.

3.2.4 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es wurden anderweitig Forschungstätigkeiten auf dem Gebiet der Prognose verkehrsabhängiger LSA-Schaltzeiten bekannt. In folgenden Projekten wurden dazu verschiedene Ansätze erforscht und erprobt:

- SHARE (gefördert vom österreichischem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie und der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG)
- EFA 2014/2 (gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung)

In den aufgezählten Forschungsprojekten wurden zwar Ansätze für eine Schaltzeitprognose untersucht, jedoch unterscheiden sich diese grundlegend von den hier vorgestellten Prognoseverfahren. Zudem variieren die Projektziele und deren Umsetzung je nach Zielstellung des Gesamtprojekts.

Weiterhin wurden verschiedene Prognoseansätze bekannt, welche außerhalb nennbarer Forschungsprojekte untersucht wurden. Jedoch unterscheiden sich auch diese grundsätzlich von den hier vorgestellten Verfahren.

Der Prognoseansatz der Support Vector Machines wurde während der Projektlaufzeit anderweitig in Singapur und Cambridge erprobt. Allerdings verwenden diese Städte modellbasierte Steuerungsverfahren, welche nicht Teil der Untersuchungen in UR:BAN waren. Zudem wurden innerhalb der veröffentlichten Untersuchungen keine Detektordaten für eine Prognose verwendet. Aufgrund der Anwendung der SVM auf die in den Test- und Prüffeldern vorhandenen regelbasierten Steuerungsverfahren und die zusätzliche Nutzung aller zur Verfügung stehenden verkehrlichen Daten (ÖV-Daten, Detektordaten, etc.) standen in den Untersuchungen verschiedene Aspekte der Forschung und Entwicklung im Vordergrund, wodurch sich die Ergebnisse deutlich voneinander unterscheiden.

3.2.5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Erfolgte Veröffentlichungen :

WEISHEIT, T.: *Algorithmenentwicklung zur Prognose von Schaltzeitpunkten an verkehrsabhängigen Lichtsignalanlagen*. HEUREKA´14 – Optimierung in Transport und Verkehr, Stuttgart, 02.-03.04.2014, Tagungsband auf CD.

WEISHEIT, T.; HOYER, R.: *Prediction of Switching Times of Traffic Actuated Signal Controls using Support Vector Machines*. In: Fischer-Wolfarth, J.; Meyer, G.: *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2014*, Springer Verlag, S. 121 - 129, Juni 2014.

WEISHEIT, T.; SCHÄFER, M.; HOYER, R.: *Support Vector Machines - A Suitable Approach for a Prediction of Switching Times of Traffic Actuated Signal Controls*. 21st World Congress on Intelligent Transport Systems – Detroit, September 7-11, 2014, Proceedings.

WEISHEIT, T.; HOYER, R.: *Schaltzeitprognose von verkehrsabhängigen Lichtsignalanlagen unter Berücksichtigung verschiedener Steuerungsverfahren*. Straßenverkehrstechnik 08/2015, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2015.

Geplante Veröffentlichungen:

Die Universität Kassel plant einen Journal-Beitrag zum Thema „Smartphone-basierte Fahrerinformation unter Verwendung von Echtzeitdaten verkehrsabhängig gesteuerter LSA über Mobilfunk“.

Zudem ist die Veröffentlichung der Dissertationsschrift von Herrn Toni Weisheit zum Thema „Schaltzeitprognose verkehrsabhängiger LSA“ in der Schriftenreihe Verkehr der Universität Kassel vorgesehen.

4 Schlussbericht zu US-6

4.1 Kurzdarstellung

4.1.1 Aufgabenstellung der Universität Kassel

Die aus den stadtseitig bereitgestellten Daten sollen über Mobilfunk an die Assistenzsysteme in Fahrzeugen übermittelt und daraus Fahrerinformationen generiert werden. Im Gegenzug werden den städtischen Zentralen Fahrtverlaufsdaten für die Qualitätskontrolle der Signalisierung geliefert, aus denen sich sehr effizient Rückschlüsse auf die Signalisierungsqualität im Straßenverlauf ziehen lassen. Aus diesem Anlass sollte im Arbeitskreis "US-6 Grüne-Welle-Qualitätsmanagement" neue Verfahren zur Bewertung von LSA-Koordinierung getestet, entwickelt, implementiert und erprobt werden. Neben den Fahrtverlaufsdaten stehen der Zentrale auch LSA-Prozess- und Versorgungsdaten zur Verfügung, welche gleichermaßen als Eingangsdaten zur Bewertung der Koordinierungsqualität verwendet werden sollten. Als Leiter des Arbeitspaketes bestanden die wesentlichsten Aufgaben der Universität Kassel in der Grundlagenanalyse für Methoden zur Qualitätsbeurteilungen von Grünen Wellen, in der Definition von Qualitätskenngrößen sowie in der Entwicklung und Erprobung von geeigneten Bewertungsverfahren. Für die betriebliche Implementierung der entsprechenden Algorithmen in die Verkehrsmanagementzentralen in Kassel und Düsseldorf war der Projektpartner GEVAS software zuständig. Darauf aufbauend wurden Tests und Bewertungen der betrieblichen Applikation von den Projektpartnern der beiden Städte durchgeführt. Die Universität Kassel hatte ferner die Aufgaben, die einzelnen Arbeitspakete zu koordinieren und den Wissensaustausch zwischen den einzelnen Projektpartnern sicherzustellen.

AP 2600: Spezifikation

Aufgabe: Spezifikation einer Methode zur Qualitätsbeurteilung von Grünen Wellen anhand von LSA-Prozess- und Versorgungsdaten sowie von mikroskopischen Fahrtverlaufsdaten kleinerer Stichproben inkl. der Definition von Qualitätskenngrößen sowie Bewertungs- und Überwachungsfunktionen des Qualitätsmanagements

AP 3600: Implementierung

Aufgabe: Implementierung der in AP 2600 spezifizierten Methoden zur Qualitätsbeurteilung von Grünen Wellen in eine Entwicklungs- und Testumgebung inkl. der Bewertungs- und Überwachungsfunktionen, Analyse der der Qualitätskenngrößen, Funktionsnachweis der Algorithmen einschließlich Fehlersuche. Fortwährende Entwicklung und schrittweise szenariobasierte Erprobung von Algorithmen zur Qualitätsbeurteilung von LSA-Koordinierungen

AP 4600: Test und Demonstration

Aufgabe: Unterstützung der Inbetriebnahme der betrieblichen Applikation zur Qualitätsbeurteilung, Analyse der Qualitätskenngrößen und Analyse der funktionalen Systemgrenzen

AP 5600: Bewertung

Aufgabe: Bewertung des Grüne-Welle-Qualitätsmanagements in den Verkehrsmanagementzentralen der Städte durch die Mitwirkung an Betrieb der integrierten Applikationen; funktionale Tests und Funktionsüberwachung und Mitwirkung an Gesamtsystemtests

4.1.2 Voraussetzungen der Vorhabensdurchführung

Aus Sicht der Verfahrensentwicklung waren keine Voraussetzungen zur Entwicklung von geeigneten Methoden zur Qualitätsbeurteilung von Grünen Wellen anhand von LSA-Prozess- und Versorgungsdaten sowie von mikroskopischen Fahrtverlaufsdaten kleinerer Stichproben erforderlich. Für die betriebliche Implementierung waren jedoch entsprechende Schnittstellen zwischen LSA-Steuergerät und Verkehrsmanagementzentrale zum Austausch von LSA-Prozessdaten sowie Schnittstellen zwischen Fahrzeug, MDM und Verkehrsmanagementzentrale notwendig. Die Erstellung geeigneter Schnittstellen war wesentlicher Bestandteil des Teilprojekts "KI - Kooperative Infrastruktur" und wird an dieser Stelle nicht weiter beschrieben.

4.1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt verlief ohne Verzögerungen nach dem in Abbildung 2-1 aufgeführtem Zeitplan.

4.1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Vorhabenbeginn

Die Bewertung von LSA-Koordinierungen unter Anwendung von LSA-Schaltzeiten wurde bereits im Forschungsprojekt ARRIVE untersucht. Dabei wurden die sich im Zeit-Weg-Diagramm einstellenden Grünbänder analysiert. Die Grünbänder, welche hier den idealisierten Verlauf eines Fahrzeugpulses versinnbildlichen sollen, werden mit den Grünzeiten an jedem Knotenpunkt verglichen. Sofern die Ankunftszeit des "Pulks" nicht im Freigabezeitraum liegt, wird eine Störung am Anfang und am Ende des Grünbandes und anschließend eine sogenannte "Störintensität" ermittelt. Für eine angestrebte Optimierung werden verschiedene Varianten durch die Variation der Versatzzeit erstellt, bewertet und mit einer Qualitätskennzahl versehen. Über einen Vergleich dieser Qualitätswerte lässt sich die beste Lösung ermitteln. Da im Projekt ARRIVE kein automatisiertes Verfahren entwickelt wurde, erfolgte die Bewertung und Optimierung der koordinierten Steuerung manuell. Daher bestand nach wie vor ein Forschungsbedarf hinsichtlich einer automatisierten Bewertung von koordinierten Lichtsignalanlagen, welcher mit dem Arbeitskreis US-6 bedient werden sollte. Der Bewertungsansatz aus ARRIVE wurde hierfür aufgegriffen und entsprechend erweitert. Auch die Verwendung von Fahrtverlaufsdaten zur Bewertung und auch zur Steuerung von Lichtsignalanlagen war bereits Bestandteil von einigen Forschungsvorhaben wie AKTIV-VM und KOLINE. In den Projekten wurde jedoch ein dezentrales kooperatives System fokussiert, bei dem die Fahrzeuge mit straßenseitigen Kommunikationseinrichtungen der kooperativen LSA entsprechende Daten austauschten. Daher war eine umfassende Bewertung von Koordinierungen nur bedingt möglich. Das in UR:BAN-VV zu entwickelnde zentralenbasierte kooperative System ermöglicht hingegen eine zentralseitige, netzweite Bewertung von Lichtsig-

nalanalgen. Daher mussten in US-6 u. a. die Fahrtverlaufsdaten so spezifiziert werden, dass eine Bewertung nach bestehenden oder neu zu entwickelnden Verfahren möglich ist.

4.1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In allen Arbeitspaketen des Grüne-Welle-Qualitätsmanagement war eine enge Vernetzung und Zusammenarbeit mit den Projektpartnern der Städte Düsseldorf und Kassel sowie Gevas-Software gegeben. Diese Zusammenarbeit wurde zudem zu den erforderlichen Zeitpunkten innerhalb des Projekts um den Projektpartner BMW erweitert, um die Spezifikation der bereitzustellenden Fahrtverlaufsdaten (FCD) abzustimmen.

4.2 Eingehende Darstellung

4.2.1 Erzielte Ergebnisse

AP 2600: Spezifikation

Mit dem Grüne-Welle-Qualitätsmanagement sollen beliebige Streckenzüge der Prüf- und Testfelder auf das Vorhandensein von LSA-Koordinierungen untersucht werden. Nicht nur das Auffinden von nicht geplanten Grünen Wellen, sondern auch das Lokalisieren und das Beheben von Defiziten in der Signalisierung von LSA sind Bestandteil des Qualitätsmanagements. Aufgrund der definierten Zielfunktionen wurde US-6 "Grüne-Welle-Qualitätsmanagement" in drei Unterkategorien untergliedert. Diese umfassen die Qualitätsbewertungen von Koordinierungen mit Signalbildern, die Bewertung von Grünen Wellen mittels Floating Car Data (FCD) sowie die Visualisierung von Grünbändern.

Zur Bestimmung der Qualität von Koordinierungen wurde zunächst ein Verfahren entwickelt, welches ausschließlich auf LSA-Prozessdaten sowie auf Geoinformationsdaten zurückgreift. Als Eingangswerte dienen Umschaltzeitpunkte, Informationen über die Lage von Haltlinien sowie Knotenpunkt- und Signalgruppenzuweisungen. Das Verfahren greift nicht auf Informationen über die vorhandene Verkehrslage zurück (kein Zugriff auf Fahrzeug- und/oder Detektordaten) und ist somit übergreifend auf jeden Streckenzug anwendbar.

Bei dem entwickelten Verfahren handelt es sich um die sogenannte Grünbandverletzungsmethode. Durch Grünbänder werden hier die Bewegungen der Verkehrsteilnehmer in einem Zeit-Weg-Diagramm dargestellt. Die Breite der Grünbänder ergibt sich aus der Freigabezeit des stromabwärtsliegenden signalisierten Knotenpunkts. Sie ist also ein Maß für die Anzahl der Verkehrsteilnehmer, die sich in einem Pulk fortbewegen könnten. Bei der Grünbandverletzungsmethode wird überprüft, ob die Breite eines Grünbandes über mehrere Knotenpunkte hinweg gleich bleibt oder aufgrund suboptimaler Lage von Freigabezeiten verkleinert wird. Trifft ein Grünband über die gesamte Breite auf eine Freigabezeit, so wird das Grünband nicht gestört. Aus rein hypothetischer Sicht könnten alle Fahrzeuge des Pulks den betrachteten Knotenpunkt passieren – eine Koordinierung wäre aus Planungssicht vollständig gegeben und theoretisch wirksam (links in Abbildung 4-1). Trifft ein Grünband nicht über die gesamte Breite auf eine Freigabezeit, wird das Grünband "verletzt". Aus Planungssicht kann ein Pulk den Knotenpunkt dann nicht mehr als Ganzes passieren. Durch diese Störung ver-

jüngt sich das durchgehende Grünband (rechts in Abbildung 4-1) und entsprechende Störintensitäten können ermittelt werden.

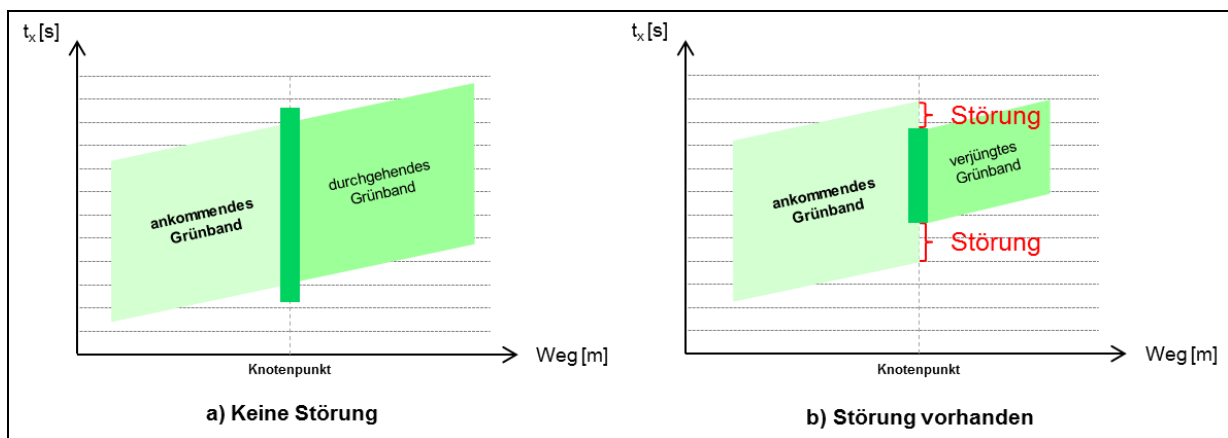


Abbildung 4-1: Theorie der Grünbandverletzungsmethode

Bevor die Störintensität SI ermittelt werden kann, ist eine Vielzahl von Vorüberlegungen und Vorprozessen notwendig. Neben der Bestimmung der Progressionsgeschwindigkeit (Anstieg des Grünbandes im Weg-Zeit-Diagramm) müssen beispielsweise die theoretischen Fahrzeiten zwischen zwei Knotenpunkten sowie die Grünzeiten normiert werden. Die normierte Grünzeit stellt hierbei die theoretische Ankunftszeit am letzten Knotenpunkt bzw. an der letzten Haltlinie bei freier Fahrt dar. Der Grund für die Ermittlung einer normierten Grünzeit ist die einfachere Berechnung der Störintensitäten.

Zur Bestimmung der Störintensitäten müssen sämtliche normierte Grünzeiten aller aufeinanderfolgenden Knotenpunkte bzw. Haltlinien schrittweise verglichen werden. Wenn die normierte Grünzeit später beginnt als die normierte Grünzeit an der Vorgänger-Haltlinie, oder wenn die normierte Grünzeit eher endet als die normierte Grünzeit des Vorgängers, wird das Grünband gestört. Es kommt zur sogenannten Grünbandverletzung und das durchgehende Grünband verkleinert sich. Ist dies der Fall, muss die Störintensität berechnet werden. Die Störintensität bezieht sich auf das Verhältnis von Grünbandverletzung zur Grünbandbreite. Sobald die Grüne Welle gestört wird, verjüngt sich das durchgehende Grünband und die Weiterberechnung bis zur nächsten Haltlinie erfolgt mit neuen maßgebenden Werten. Die Verjüngung des Grünbandes wird solange durchgeführt, bis die Störintensität einen voreingestellten Schwellwert (bspw. der Grenzwert zwischen QSV D und E, siehe Tabelle 4-2

) überschreitet. Beim Überschreiten dieses Schwellwertes wird ein Bruch der Grünen Welle festgestellt und es wird mit einem neuen Grünband weiter gerechnet.

Aufgrund unterschiedlicher Planungsprinzipien der Grünen Welle werden die Störungen am Grünbandanfang und -ende unterschiedlich gewichtet. Die Gewichtungsfaktoren können vom Nutzer nach eigenem Ermessen eingestellt und verändert werden. Die Möglichkeit zur unterschiedlichen Gewichtung der Störintensitäten erfordert eine getrennte Betrachtung der Grünbandverletzung am Anfang und am Ende der Freigabezeit. Die Gewichtung erfolgt durch die Angabe eines Prozentwertes, welcher angibt, bei wie viel prozentualer Störung der maximale Wert der Störintensität ($1,00 = 100\%$) erreicht wird.

Die Störintensität am Grünbandanfang SI_{GBA} ergibt sich aus dem Verhältnis der Grünbandverletzung am Anfang t_{GA} und der Breite des durchgängigen Grünbandes t_{GB} . Zusätzlich werden die frei wählbare Vorlaufzeit t_{VZ} und ein Gewichtungsfaktor für die Grünbandanfangsstörung f_{GBA} berücksichtigt:

$$SI_{GBA} = \frac{(t_{GA} + t_{VZ}) \cdot 100}{f_{GBA} \cdot t_{GB}} \quad \text{für } (t_{GA} + t_{VZ}) > 0$$

Eine schematische Darstellung mit der Zuordnung der Parameter zeigt Abbildung 4-2.

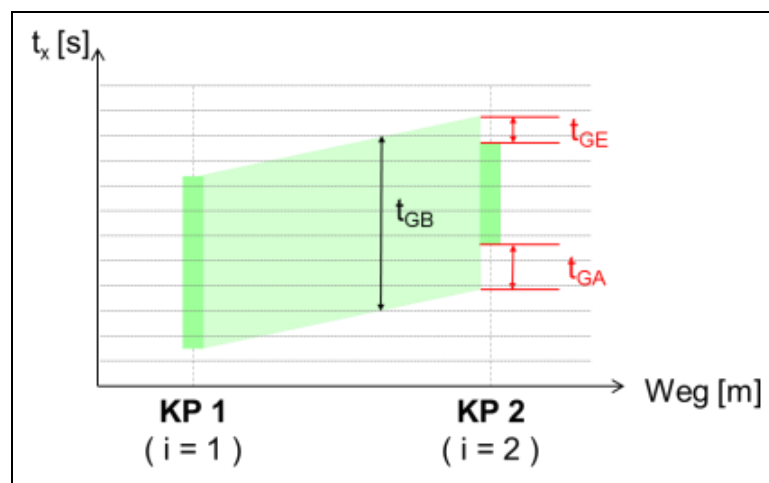


Abbildung 4-2: Grünbandverletzungsmethode mit Parameterzuordnung

Die Ermittlung der Störintensität am Grünbandende (SI_{GBE}) erfolgt äquivalent zur Berechnung der Störintensität am Grünbandanfang. Hier werden jedoch keine weiteren Vor- bzw. Nachlaufzeiten berücksichtigt:

$$SI_{GBE} = \frac{t_{GE} \cdot 100}{f_{GBE} \cdot t_{GB}} \quad \text{für } t_{GE} > 0$$

Die Störintensität bildet sich aus der Summe der Störintensitäten am Grünbandanfang (SI_{GBA}) und am Grünbandende (SI_{GBE}). Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Störintensität maximal einen Wert von 1,00 bzw. 100 % betragen darf.

$$SI = SI_{GBA} + SI_{GBE} \quad 0 \leq SI \leq 1,00$$

Um eine qualitative Aussage über die Grüne Welle treffen zu können, müssen die Störintensitäten für das durchgehende Grünband betrachtet werden. Hierzu werden zunächst die Störintensitäten für jeden Knotenpunkt bzw. jede Haltlinie i sowie für jede Grünzeit bzw. Grüne Welle j in die sogenannte SI-Matrix übertragen (siehe Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: SI-Matrix und QSV-Einschätzung

KP _i / HL _i GW _j	1	2	3	...	i _{max}	max SI(j)	n _ψ (j)	QSV(j)
1	SI _{1,1}	SI _{2,1}	SI _{3,1}	...	SI _{max i,1}	max SI(j=1)	n _ψ (j=1)	QSV(j=1)
2	SI _{1,2}	SI _{2,2}	SI _{3,2}	...	SI _{max i,2}	max SI(j=2)	n _ψ (j=2)	QSV(j=2)
3	SI _{1,3}	SI _{2,3}	SI _{3,3}	...	SI _{max i,3}	max SI(j=3)	n _ψ (j=3)	QSV(j=3)
4	SI _{1,4}	SI _{2,4}	SI _{3,4}	...	SI _{max i,4}	max SI(j=4)	n _ψ (j=4)	QSV(j=4)
5	SI _{1,5}	SI _{2,5}	SI _{3,5}	...	SI _{max i,5}	max SI(j=5)	n _ψ (j=5)	QSV(j=5)
...
j _{max}	SI _{1,max j}	SI _{2,max j}	SI _{3,max j}	...	SI _{max i,max j}	max SI(j=j _{max})	n _ψ (j=j _{max})	QSV(j=j _{max})
$\bar{SI}(i)$	$\bar{SI}(i=1)$	$\bar{SI}(i=2)$	$\bar{SI}(i=3)$...	$\bar{SI}(i=i_{max})$	$\bar{n}_{\psi} =$		
$\sigma(i)$	$\sigma(i=1)$	$\sigma(i=2)$	$\sigma(i=3)$...	$\sigma(i=i_{max})$	$SI_{maßg} =$		
n _ψ (i)	n _ψ (i=1)	n _ψ (i=2)	n _ψ (i=3)	...	n _ψ (i=i _{max})	$QSV_{maßg} =$		
QSV(i)	QSV(i=1)	QSV(i=2)	QSV(i=3)	...	QSV(i=i _{max})			

Anschließend wird für jede Grüne Welle j und für jeden Knotenpunkt bzw. jede Haltlinie i eine Qualitätsstufe ermittelt. Hierbei werden maßgebende Störintensitäten nach der Zeit und nach dem Weg bestimmt. Mit vorher definierten Schwellwerten kann die Einstufung in eine entsprechende Qualitätsstufe nach dem in Tabelle 4-2 dargestellten QSV-Schema erfolgen. Die sechsstufige Qualitätsbewertung basiert auf dem konventionellen Verfahren nach dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2001). Bei der Grünbandverletzungsmethode sind die Schwellwerte durch den Benutzer modifizierbar.

Tabelle 4-2: Qualitätsstufenschema (Default) für durchgehende Koordinierung

Qualitätsstufe (QSV)	Störintensität
A	≤ 15 % (0,15)
B	≤ 30 % (0,30)
C	≤ 45 % (0,45)
D	≤ 60 % (0,60)
E	≤ 75 % (0,75)
F	> 75 % (0,75)

Um eine Aussage über die Koordinierungsqualität des gesamten Streckenzugs über die gesamte betrachtete Untersuchungszeit treffen zu können, wird das arithmetische Mittel aus den maximalen Störintensitäten max SI(j) der Grünbänder gebildet. Die maßgebende Störintensität SI_{maßg} ergibt sich aus:

$$SI_{maßg} = \frac{1}{j_{max}} \sum_{j=1}^{j_{max}} max SI(j)$$

Eine Aussage über die Koordinierungsqualität der gesamten Untersuchungsstrecke und des Untersuchungszeitraumes kann wiederum durch die Einteilung in Qualitätsstufen nach Tabelle 3-2 erfolgen. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise der Koordinierungsbewertung sowie der Algorithmen kann der erstellten Spezifikation entnommen werden.

Im Rahmen von US-6 war auch eine Beurteilung von Grünen Wellen im Prüffeld der Stadt Kassel und im Testfeld der Stadt Düsseldorf mittels FCD vorgesehen. Die Bewertung erfolgte in Absprache mit den Projektpartnern offline. Die von BMW bereitgestellten Fahrtverlaufsdaten umfassten folgende markante Punkte:

- Überfahrt einer Haltlinie
- Halt(e) vor Haltlinie (Unterschreiten einer Geschwindigkeit von 1 m/s)

Für jeden dieser Punkte wurden folgende Informationen bereitgestellt:

- UTC-Date / UTC-Time
- Latitude / Longitude
- Track-ID (als Wiedererkennungsmerkmal notwendig)
- Heading
- Speed

Die Abbildung 4-3 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** verdeutlicht die Aufzeichnungspunkte und den Dateninhalt schematisch. Da die Daten keine Abbildung einer kompletten Fahrtrajektorie zulassen, wird nachfolgend der Begriff "reduzierte Fahrtverlaufsdaten" verwendet.

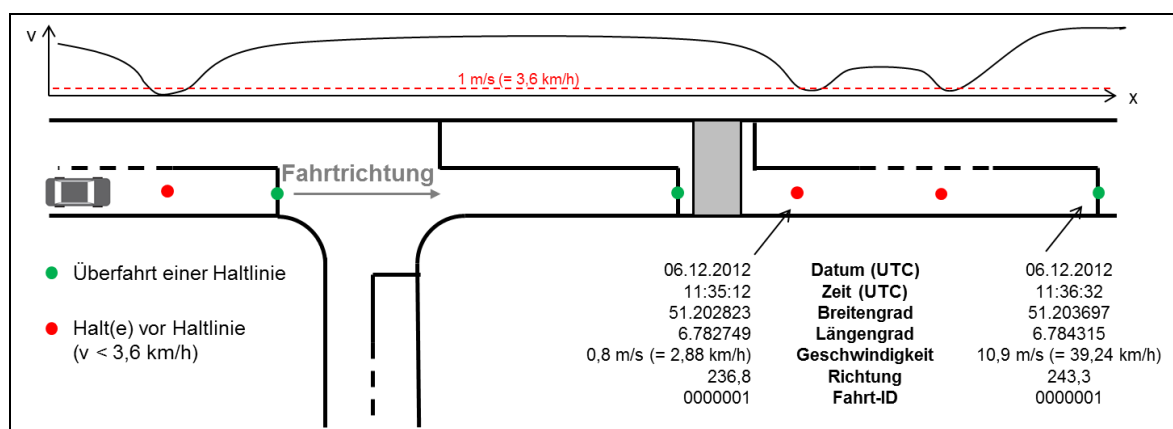


Abbildung 4-3: Darstellung der FCD-Aufzeichnungspunkte und des Dateninhalts

Im Rahmen von US-6 war zu untersuchen, ob und inwiefern bestehende Verfahren zur Bewertung von koordinierten LSA unter Anwendung von den BMW-seitig bereitgestellten Fahrtverlaufsdaten anwendbar sind.

AP 3600: Implementierung

Um das vorgestellte Grünbandverletzungsverfahren auf seine Aussagefähigkeit und Robustheit zu testen, wurden die Algorithmen in einer Simulations- und Testumgebung implementiert. In einem ersten Schritt wurde eine mikroskopische Verkehrsflusssimulation unter Anwendung von VISSIM 5.40 durchgeführt. Hierbei konnten unterschiedliche Strecken- bzw. Netzmodelle verwendet werden. Ein eigens dafür entwickeltes Programm (Teil I: Simulation, Benutzeroberfläche siehe Abbildung 4-4 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden**

werden.) steuerte die Verkehrssimulation über die VISSIM-COM Schnittstelle. Dabei wurden die Simulationsschritte sukzessiv durchgeführt und zu jeder vollen Sekunde T_x Fahrzeug- und LSA-Statusdaten in eine Datenbank geschrieben. Die Simulationsparameter Startzufallszahl, Simulationsdauer und Verkehrsstärke waren dabei frei wählbar. Die eigentliche Simulation wurde in maximaler Geschwindigkeit durchgeführt. Durch das Mitschreiben von Fahrzeugdaten konnte ein Simulationslauf je nach Größe des Netzes, der Belastung und der Simulationsdauer sehr lange andauern. Nach Durchführung des Simulationslaufes wurden die zu jedem Simulationsschritt mitgeschriebenen Fahrzeugdaten gefiltert. Es wurde eine neue Datentabelle erzeugt, welche Informationen über die Ein- und Ausfahrt ins Netz, die Haltlinienüberfahrten sowie das Unterschreiten von 3,6 km/h (1m/s) beinhaltete. Diese Filterung basiert auf der UR:BAN-Spezifikation "Bewertung der Grünen Welle mit FCD - Datenbereitstellung durch BMW", so dass der Umfang der simulierten FCD denen von BMW entsprechen.

UR:BAN US-6 Grüne-Welle-Qualitätsmanagement, TEIL 1: Simulation

UR:BAN **UNIKASSEL UNIVERSITÄT**
Fachgebiet Verkehrstechnik und Transportlogistik

1. Datenbankverbindung

Hier muss zunächst der Webserver Apache und die MySQL-Datenbankverbindung (mittels XAMPP) gestartet werden. Der Webserver läuft auf dem Localhost; also eigene IP angeben! Sofern die eingegebene Datenbank vorhanden ist, werden die Benutzereingaben (User und Passwort) überprüft. Sofern die Datenbank noch nicht existiert, wird eine Neue erstellt und die eingegebenen Benutzerdaten (User und Passwort) gespeichert.

IP-Adresse:
 User:
 Passwort:
 Database:

Connect

2. Simulationsparameter

Hier müssen die gewünschten Simulationsparameter eingestellt werden. Durch das Laden einer VISSIM-Datei (*.jnp) werden notwendige Informationen ausgelesen und in folgende Datenbanktabellen geschrieben:

- connectors (Strecken mit Verbindungen)
- linkswithstoptines (Strecken mit Haltlinien)
- signalgroups (Signalgruppeninformationen)
- stoptineinfo (Haltlinieninformationen)

Vissim laden

Simulationsdauer [s]:
 Startzufallszahl:
 Zeitschritte/Sim-Sekunde:
 Aufzeichnungsintervall Fz [s]:
 Verkehrsstärke [Fz/h]:
 Ausstattungsrate [%]:

OK

3. Simulation

Hier wird die eigentliche Simulation in maximaler Geschwindigkeit durchgeführt. Es können entsprechende Daten aufgezeichnet werden. Durch das Mitschreiben von Fahrzeugdaten dauert die Simulation je nach Größe des Netzes und der Belastung sehr lange. Durch die externe Simulationsdurchführung entstehen folgende Datenbanktabellen:

- fzdata (optional, Inhalt: Fz-Daten für jeden Sim-Schritt)
- signaldata (optional, Inhalt: Zeit des Signalwechsels für jeden SG mit Signalstatus)

Fahrzeug-Daten aufzeichnen
 LSA-Daten aufzeichnen AutoFilter

Simulation starten
 Simulation beenden
 Vissim schließen

4. Filtern der Fahrzeugdaten

Hiermit können die zu jedem Simulationsschritt mitgeschriebenen Fahrzeugdaten gefiltert werden. Es wird eine neue Datentabelle erzeugt, welche Informationen über die Ein- und Ausfahrt ins Netz, die Haltlinienüberfahrten sowie das Unterschreiten von 3,6 km/h (1m/s) beinhaltet. Diese Filterung bezieht sich auf die UR:BAN-Spezifikation "Bewertung der Grünen Welle mit FCD", Datenbereitstellung durch BMW". Der Name der erzeugten Datentabelle lautet:

Zeitdauer nach Überfahrt der Haltlinie

Ergebnis filtern

- result

Abbildung 4-4: Teil I der Simulations- und Testumgebung für die Analyse von Koordinierungen

In einem nächsten Schritt konnten die archivierten Daten des Simulationslaufes ausgewertet werden. Hierzu wurde ein weiteres Programm "Bewertung & Visualisierung" entwickelt. Die Benutzeroberfläche des Programms ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Nach dem Verbinden

mit der Datenbank konnte die gewünschte Untersuchungsstrecke ausgewählt werden. Der Anwender konnte hier die im Simulationsnetz vorhandenen Knotenpunkte und Signalgruppen nacheinander hinzufügen und somit seine Untersuchungsstrecke schrittweise zusammenstellen. Dabei musste jeweils die Streckenlänge bis zur nächsten LSA sowie die zulässige Höchstgeschwindigkeit angegeben werden. Nach Festlegung der Untersuchungsstrecke erfolgte die Einstellung der Bewertungs- und Darstellungsparameter. Zunächst waren Start- und Endzeit (Simulationszeit) der gewünschten Auswertzeit auszuwählen. Der Anwender hatte weiterhin die Option, verschiedene Bewertungsverfahren mit in die Untersuchung einzubeziehen. Sofern das im Rahmen des Projekts entwickelte und bereits implementierte Grünbandbewertungsverfahren berücksichtigt werden sollte, mussten die Parameter Gewichtungsfaktor für die Störung am Grünanfang g_{GA} , Gewichtungsfaktor für die Störung am Grünende g_{GE} , Vorlaufzeit t_{VZ} , Progressionsfaktor und die Grenzwerte der Qualitätsstufen eingegeben werden. In die Auswertung konnten weiterhin bestehende Untersuchungsverfahren, wie das "HBS-Verfahren (Bewertungskriterium: Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt) und das „Brilon/Schnabel-Verfahren“ (Bewertungskriterium: mittlere Durchschnittsgeschwindigkeit) berücksichtigt werden. Für die Visualisierung der Grünbänder konnten weitere Einstellungen, wie die Berücksichtigung der oben genannten FCD-Events sowie die Darstellung sämtlicher Fahrzeugtrajektorien, vorgenommen werden.

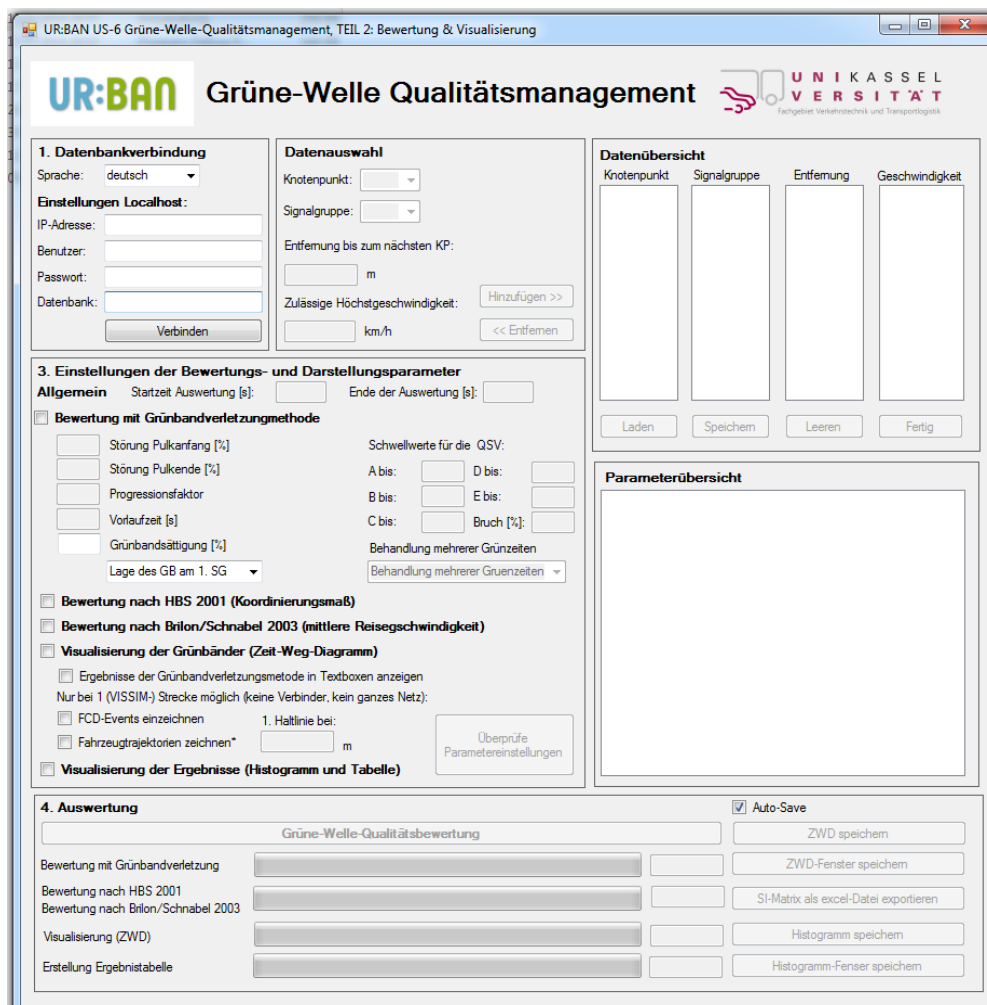


Abbildung 4-5: Teil II der Simulations- und Testumgebung für die Analyse von Koordinierungen

AP 4600: Test und Demonstration

Das zweite Programm ermöglichte neben der Visualisierung der Grünbänder (Abbildung 4-6) auch eine Gegenüberstellung der Ergebnisse verschiedener Bewertungsmethoden (Abbildung 4-7). Hierbei konnten sowohl die Qualitätskriterien als auch die ermittelten Qualitätsstufen verglichen werden. Dies hatte den Vorteil, dass die Ergebnisse der Grünbandverletzungsmethode mit den Kenngrößen des tatsächlichen Verkehrs und mit den Ergebnissen entsprechender Bewertungsmethoden verglichen werden konnten. Die vom Anwender relativ schwer zu quantifizierenden Parameter der Grünbandverletzungsmethode (QSV-Schwellwerte und Gewichtungsfaktoren) wurden dadurch nacheinander angepasst.

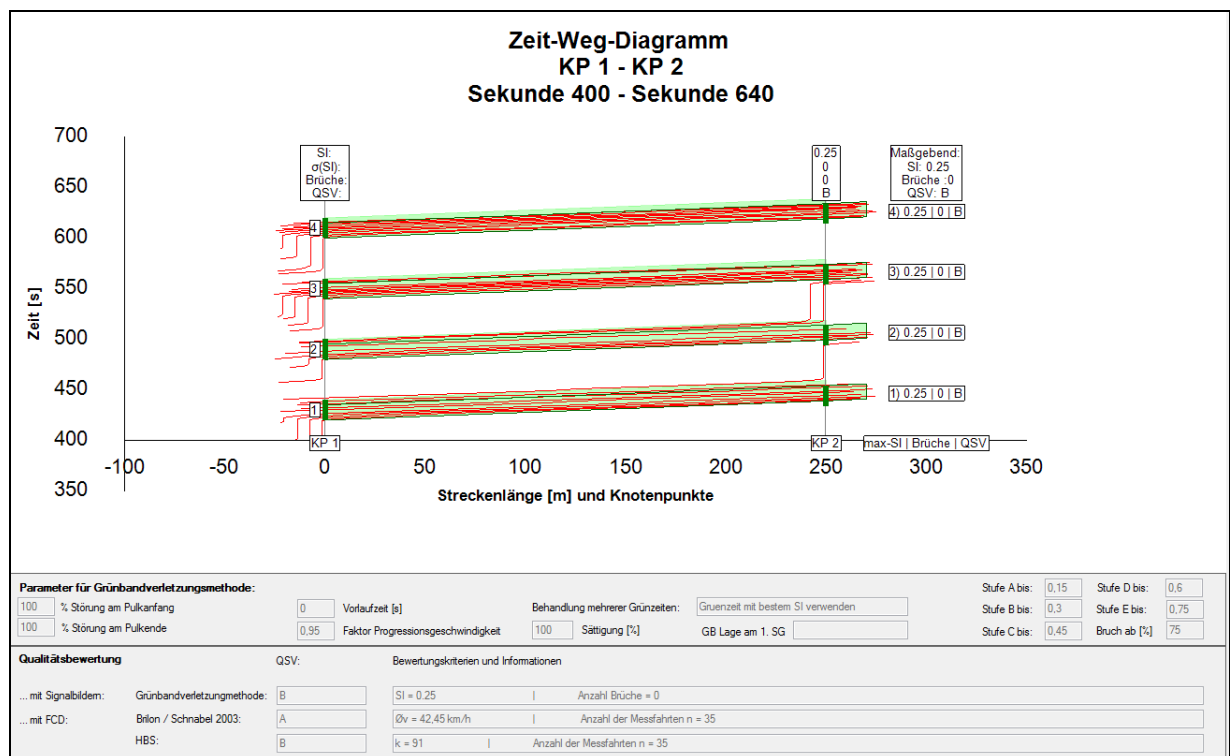


Abbildung 4-6: Visualisierung der Grünbänder inkl. Fahrzeugtrajektorien

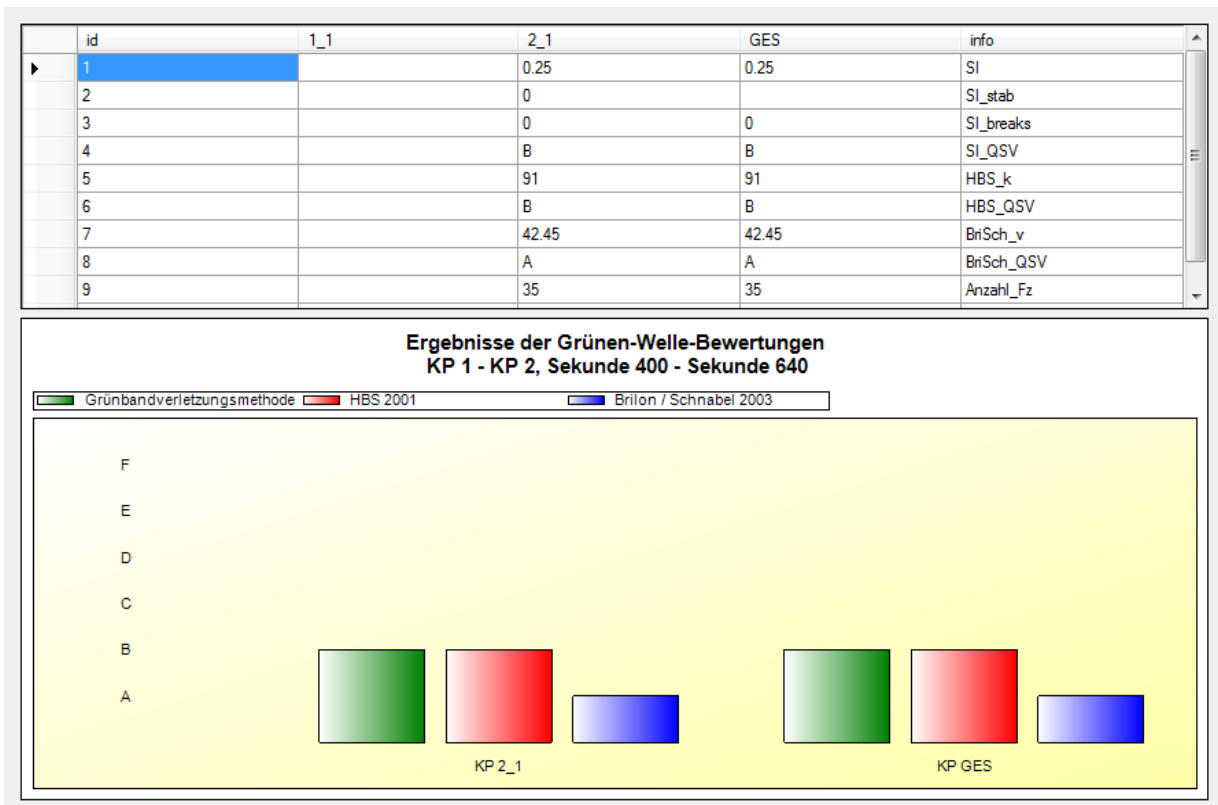


Abbildung 4-7: Gegenüberstellung der Ergebnisse unterschiedlicher Bewertungsmethoden

Ziel weiterer Simulationen war die Quantifizierung der Parameter der Grünbandverletzungsmethode sowie die Entwicklung und Erprobung eines kombinierten Verfahrens unter Berücksichtigung der bestehenden Verfahren nach Brilon/Schnabel und nach dem HBS. Wie im Meilensteinbericht 2 erwähnt, konnte die grundsätzliche Anwendbarkeit der beiden bestehenden Ansätze zur Ermittlung der Qualität von Grünen Wellen mit den von BMW bereitgestellten FCD bereits nachgewiesen werden.

Für die betriebliche Implementierung der entsprechenden Algorithmen in die Verkehrsmanagementzentralen in Kassel und Düsseldorf war Projektpartner GEVAS software zuständig. Hierzu wurde in den Verkehrsmanagementzentralen eine WEB-Applikation erstellt, welche auf Anfrage die Koordinierung eines Streckenzugs überprüft und die Ergebnisse visualisiert. Mit der WEB-Applikation konnten Tests und Bewertungen der betrieblichen Applikation von den Projektpartnern der beiden Städte durchgeführt werden (siehe unten).

AP 5600: Bewertung

Die Anwendung Grüne-Welle-Qualitätsmanagement wurde von Signalplanern des Straßenverkehrs- und Tiefbauamtes der Stadt Kassel in unterschiedlichen Entwicklungsstadien erprobt. Dabei wurde zum einen die Bedienungsfreundlichkeit der Anwendung getestet, zum zweiten aber auch die Verwertbarkeit der Ergebnisse beleuchtet. Die Anmerkungen zur Bedienungsfreundlichkeit wurden zu wesentlichen Teilen in den weiteren Entwicklungsstadien der Anwendung berücksichtigt und dort umgesetzt. Die Städte Kassel und Düsseldorf haben ein gemeinsames Bewertungsschema erstellt, auf dessen Grundlage die Alltagstauglichkeit der betrieblichen Applikation von den für Signalplanung zuständigen Mitarbeitern in der Verwaltung geprüft wurde. Für den Praxistest wurden in Düsseldorf und Kassel jeweils fünf zu

untersuchende Streckenzüge ausgewählt. Die Streckenzüge wurden jeweils getrennt für die Hin- und die Rückrichtung untersucht. Hierbei wurden unterschiedliche Signaldichten (Abstand der Haltlinien) und unterschiedlich lange Streckenzüge ausgewählt. Weitere Details zum Versuchsaufbau und zu den untersuchten Strecken sind im Meilensteinbericht 3 und Testergebnisse im Meilensteinbericht 4 zu finden. Zusammenfassend wurde festgestellt, dass sich das Programm sehr gut zur Überwachung der Qualität der Koordinierung im Tagesverlauf unter dem Einfluss von Verkehrsabhängigkeiten und Programmumschaltungen eignet, weil auch insbesondere die Änderungen der Güte über den Zeitraum überwacht werden können. Dabei kann die WEB-Applikation den Signalplaner, aber auch die für das Qualitätsmanagement zuständigen Mitarbeiter bei der täglichen Arbeit unterstützen. Die angeführten hilfreichen Anmerkungen der Signalplaner im Rahmen der durchgeführten Befragungen halfen dabei, die Bedienungsfreundlichkeit und die Funktionalitäten der Applikation fortlaufend zu optimieren.

4.2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Um die angestrebten verkehrlichen Wirkungen und die sich daraus ergebenden Entlastungen im Umweltbereich zu erzielen, dürfen nicht nur die Prognosedaten ins Fahrzeug zurückgespielt werden, sondern es müssen auch aus den sich dabei ergebenden Informationen der Fahrtverläufe Rückschlüsse auf die Steuerung gezogen werden. Zur Optimierung des Prozesses war daher auch eine Bewertung der koordinierten Steuerung erforderlich. Dabei musste konkret ermittelt werden, wie sich die Datenmodelle, die Bewertungsverfahren und die definierten Anwendungsfälle in der Praxis bewähren und ob es gelingt, die erforderliche Betriebsqualität zu erreichen. Das von der Universität Kassel erarbeitete Verfahren zur Bewertung von koordinierten LSA unter zusätzlicher Berücksichtigung von verkehrsabhängigen LSA ist in der Form neuartig; bedarf jedoch weiterer Forschung.

4.2.3 Nutzen des Systems

Neben der Analyse von einzelnen Koordinierungsbändern, die dazu führen können, die LSA-Steuerung im Detail überprüfen zu können, bietet die Applikation Grüne-Welle-Qualitätsmanagement weitere Funktionen, um einen schnelleren Überblick über die Qualität verschiedener koordinierter Strecken im Stadtgebiet zu erhalten. Diese Funktionen können die Entscheidung unterstützen, in welcher Reihenfolge einzelne koordinierte Strecken analysiert und ggf. überarbeitet werden sollten. Besonders hervorzuheben ist, dass mit den in der WEB-Applikation hinterlegten Algorithmen auch die Qualitätsbewertung von Streckenzügen mit verkehrsabhängig gesteuerten LSA möglich ist. Der Nutzen zeigt sich dadurch, dass mit Hilfe der betrieblichen Applikation mehrere Schwachstellen in den LSA-Koordinierungen in Kassel und Düsseldorf identifiziert und anschließend behoben werden konnten.

4.2.4 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es wurde eine anderweitige Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der Bewertung von LSA-Koordinierungen (Grünen Wellen) bekannt. Im folgenden Projekt wurden ähnliche Ansätze erforscht und erprobt:

- Kapazität und Verkehrsqualität an verkehrabhängig gesteuerten und koordinierten Lichtsignalanlage (Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen und IGS Ingenieurgesellschaft Stolz GmbH)

In dem Forschungsprojekt wurden zwar Verfahren für die Bewertung der Verkehrsqualität an verkehrabhängig gesteuerten und koordinierten Lichtsignalanlagen erarbeitet, das Projektziel sowie deren Umsetzung variierte jedoch nach Zielstellung des Gesamtprojekts stark. Auf der Grundlage von erhobenen Daten wurden in dem Projekt Wartezeitmodelle und Ansätze für die Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs an Lichtsignalanlagen (weiter-) entwickelt und kalibriert. Das in UR:BAN-VV US-6 entwickelte Verfahren stützt sich hingegen allein auf LSA-Prozess- und Versorgungsdaten und ist für ein kontinuierliches Qualitätsmonitoring ausgelegt.

4.2.5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Erfolgte Veröffentlichungen :

RUDOLPH, F., HOYER, R.: *Performance Analysis of coordinated Signalization using Switching Time Data*. 10th European Congress on Intelligent Transport Systems – Helsinki, June 16-19, 2014, Proceedings.

RUDOLPH, F., HOYER, R.: *Quality Assessment of Green Waves using Process Data of Traffic Lights and limited Samples of Probe Vehicle Data*. 20th World Congress on Intelligent Transport Systems – Tokyo, October 14-18, 2013, Proceedings.

Geplante Veröffentlichungen:

Die Universität Kassel plant eine Veröffentlichung der Dissertationsschrift von Herrn Felix Rudolph zum Thema „Qualitätsanalyse koordinierter Lichtsignalsteuerungen unter Verwendung kooperativ gewonnener Messgrößen“ in der Schriftenreihe Verkehr der Universität Kassel geplant.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel UR: BAN-VV (Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement – Vernetztes Verkehrssystem) Teilvorhaben: Urbane Straße (Verzögerungs- und Grüne Welle-Assistent, Schaltzeitprognose, Grüne Welle-Qualitätsmanagement)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Hoyer, Robert Rudolph, Felix Weisheit, Toni	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31. Dezember 2015
	6. Veröffentlichungsdatum 01. Juli 2016
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Universität Kassel Fachbereich Bauingenieur- und Umweltingenieurwesen Fachgebiet Verkehrstechnik und Transportlogistik Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Hoyer Mönchebergstraße 7 34125 Kassel	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19 P 11007 R
	11. Seitenzahl 59
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 10
	14. Tabellen 3
	15. Abbildungen 37
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	

18. Kurzfassung

An lichtsignalisierten Knotenpunkten besteht ein nicht unerhebliches Reduktionspotential von Emissionen durch eine energie- und verbrauchsoptimierte Annäherung an die Haltlinie. Mittels verschiedener fahrzeugseitiger Assistenzsysteme kann dem Fahrer bspw. eine Geschwindigkeitsempfehlung gegeben werden, um die nächste stromabwärtige Lichtsignalanlage während der Grünphase zu erreichen und ohne Halt zu überqueren. Derartige Assistenzsysteme benötigen zur Generierung entsprechender Handlungsempfehlungen Informationen über die bevorstehenden Schaltzeitpunkte der betreffenden Lichtsignalanlagen. Deren Bereitstellung ist im Falle festzeitgesteuerter LSA trivial. Moderne Anlagen hingegen passen ihre Phasen und Phasenübergänge an das aktuelle Verkehrsgeschehen an, wodurch die Schaltzeiten mit jedem Umlauf variieren können. Daher ist eine Prognose dieser verkehrabhängigen Schaltzeitpunkte eine Grundvoraussetzung für ein energie- und verbrauchsoptimiertes Fahren in der Stadt.

In Hinblick auf eine möglichst kostengünstige und barrierefreie Einführung kooperativer Fahrerassistenzsysteme wurde ein zentralbasierter Ansatz gewählt. Die Algorithmen zur Schaltzeitprognose wurden neben weiteren Komponenten wie bspw. einer Haltepunktprognose in die Verkehrszentralen der Städte Düsseldorf und Kassel integriert. Auf diese Weise war weiterhin ein antriebsartabhängiges Routing möglich, da die Informationen über zukünftige Schaltzeiten nicht nur einzelner, sondern aller LSA auf verschiedenen möglichen Streckenzügen verfügbar waren. Eine besondere Herausforderung bei der Verfahrensentwicklung bestand in der Forderung der einfachen Übertragbarkeit der Schaltzeitprognose auf andere Städte und Kommunen. Daher wurden mit Düsseldorf und Kassel zwei Testfelder gewählt, die unterschiedliche Steuerungsphilosophien einsetzen. Während in Düsseldorf größtenteils Freigabezeitenanpassungen vorgenommen werden, kommen in Kassel auch Anlagen mit einer freien Signalprogrammierung zum Einsatz.

Da für eine Schaltzeitprognose bei verkehrabhängig gesteuerten LSA eine einfache Häufigkeitsverteilung historischer Signalbilder statistisch zu unsicher ist, wurden sämtliche zusätzlich zur Verfügung stehenden verkehrlichen Daten wie bspw. Detektordaten zur Verbesserung der Prognosegüte verwendet. Hierfür wurde mit den sogenannten Support Vector Machines ein mathematischer Klassifikator eingesetzt, der die systemischen Zusammenhänge zwischen den verkehrlichen Daten und den resultierenden Schaltzeiten selbstständig erlernt und letztere anschließend für verschiedene zeitliche Horizonte prognostiziert. Grundlage ist dabei eine umlaufgetrennte Aufbereitung der verwendeten Daten innerhalb verschiedener Datenmodelle. Da jedoch Fehlprognosen prinzipiell nicht ausgeschlossen werden können, ist eine direkte Weitergabe der prognostizierten Schaltzeiten an ein Fahrerassistenzsystem kritisch, da mitunter völlig falsche Informationen generiert werden könnten. Daher wurden die Prognosen in einem weiteren Schritt zu Grünwahrscheinlichkeitsverteilungen aufbereitet, wobei lediglich diejenigen Schaltsekunden an die Fahrerassistenzsysteme übergeben werden, die eine festgelegte Mindestwahrscheinlichkeit für Grün aufweisen.

Die entwickelten Verzögerungs- und Grüne Welle-Assistenten nutzen neben den prognostizierten Schaltzeiten auch Informationen aus einer zentralenseitigen Haltepunktprognose zur Abschätzung von Rückstaulängen. Aufgrund der aktuellen Position und Fahrtrichtung im urbanen Straßennetz erhält ein Fahrzeug auf Anfrage die entsprechenden Informationen via Mobilfunk über ein Backend eines Diensteanbieters. Die gesamte Kommunikationskette baut dabei auf standardisierten Schnittstellen auf und liefert die erforderlichen Daten innerhalb weniger Sekunden, so dass eine angepasste Fahrweise bei Bedarf möglich ist. Während der Zufahrt wird dem Fahrer seine virtuelle Position in der Grünphase der vor ihm liegenden LSA angezeigt (Grüne Welle-Assistent). Dadurch ist er in der Lage, diese Grünphase durch eine angepasste Annäherungsgeschwindigkeit zu erreichen und den Knotenpunkt ohne Halt zu passieren. Im Falle eines unvermeidbaren Halts ist durch eine entsprechende fahrzeugseitige Anzeige eine energie- und verbrauchssparende Zufahrt auf die Haltlinie möglich (Verzögerungsassistent).

Im Sinne eines kooperativen Gesamtsystems wurden weiterhin Signalisierungs- sowie Floating Car Daten (FCD) für ein zentralbasiertes Grüne Welle-Qualitätsmanagement verwendet. Dadurch lassen sich sehr effizient Rückschlüsse auf die Signalisierungsqualität im Straßenverlauf ziehen. Aufgrund der Visualisierung der Grünbänder sowie einem berechneten Qualitätsindex bzw. Performance-Index können Störungen einer LSA-Koordinierung identifiziert und in Form einer Anpassung des entsprechenden Signalprogramms behoben werden. Da die zu untersuchenden Streckenzüge frei wählbar sind lassen sich zudem zufällig ergebende Grüne Wellen lokalisieren, welche für ein städtisches Strategiemangement genutzt werden können.

19. Schlagwörter

Verzögerungs- und Grüne Welle-Assistenz, Schaltzeitprognose, Grüne Welle-Qualitätsmanagement

20. Verlag

21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title UR:BAN-VV (Urban Space: User-friendly Assistance Systems and Network Management – Networked Traffic System) Subproject: Urban Street (Deceleration and Green Wave-Assistant, Prediction of Switching Times, Green Wave Quality Management)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Hoyer, Robert Rudolph, Felix Weisheit, Toni	5. end of project 31st. December 2015
	6. publication date 01st. July 2016
	7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address) Universität Kassel Fachbereich Bauingenieur- und Umweltingenieurwesen Fachgebiet Verkehrstechnik und Transportlogistik Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Hoyer Mönchebergstraße 7 34125 Kassel – Germany	9. originator's report no.
	10. reference no. 19 P 11007 R
	11. no. of pages 59
12. sponsoring agency (name, address) Federal Ministry of Economic Affairs and Energy (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 10
	14. no. of tables 3
	15. no. of figures 37
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	

18. abstract

At signalized intersections there are significant possible reductions of emissions by an energy- and fuel-efficient approach to the stop line. By various vehicle side assistance systems e.g. the driver can be provided with a speed recommendation to arrive the next traffic signal during the green phase in order to cross it without stopping. Such assistance systems need information about forthcoming switching times of respective traffic lights to generate appropriate recommendations. In case of fixed time controlled traffic lights the supply of the switching times is trivial. However, modern traffic lights adapt their signal stages and interstages to the current traffic flow, whereby the switching times may vary cycle by cycle. Therefore, the prediction of those switching times is a basic requirement for an energy- and consumption-optimized driving through the city.

With regard to a preferably low-cost and easy implementation of cooperative driver assistance systems, a center-based approach was chosen. The algorithms for a prediction of switching times have been integrated into the traffic control centers of the cities Düsseldorf and Kassel, as well as other components like a prediction of the length of jams at an intersection. Thus, furthermore a drive-dependent routing was possible because the information about forthcoming switching times were available not only for individual but for all traffic lights on various possible traverses. A special challenge during the development process was the requirement of an easy transferability of a prediction algorithm on any traffic lights. Therefore, the test sites Düsseldorf and Kassel have been chosen because those cities use different control methods. While Düsseldorf largely practices adaptations of green periods, in Kassel even traffic lights with a signal plan generation are applied.

A simple frequency distribution of historical signal images is statistically too uncertain for a prediction of switching times of traffic actuated signal controls. Therefore, all additionally available traffic-related data such as detector data were used to improve the prediction accuracy. For this purpose, a mathematical classifier called Support Vector Machines (SVM) was used to independently learn systemic relationships between the traffic-related data and the resultant switching times. Afterwards the latter have been predicted for various time horizons via SVM. A cycle-separated preparation of the used data within different data models is basis. However, false predictions principally cannot be excluded, a direct transfer of the predicted switching times to a driver assistant system is critical, because occasionally completely wrong information could be generated. Therefore, in a further step the predictions were prepared into green probability distributions, whereby only those leap-seconds are passed to the driver assistant systems, which have a definite minimum probability of green.

The developed deceleration and green wave assistant use not only predicted switching times but also information from a central prediction of breakpoints for estimating queue lengths. Due to the current position and driving direction in the urban road network, a vehicle receives the appropriate information after a corresponding request via mobile radio from a backend of a service provider. The entire communication chain is based on standardized interfaces and provides the necessary data within a few seconds, so an adapted driving style is possible when needed. During the drive to an intersection the virtual position in the green phase of the next traffic light is displayed to the driver (green wave assistant). Thus, it is possible to arrive at this green phase by an adapted speed and pass through the intersection without stopping. In case of an unavoidable stop, an energy- and consumption reduced drive on the stop line is possible through a corresponding display in the vehicle (deceleration assistant).

In terms of a cooperative system signaling data and Floating Car Data (FCD) were still used for a central-based quality management of green waves. Thus, conclusions can be drawn very efficiently about the signaling quality at roads. Due to the visualization of green bands and a calculated quality index, disturbing factors can be identified within a freely selectable traverse and can be corrected by an adjustment of the corresponding signal program. In addition, due to traffic actuated switching times randomly resultant green waves could be located, which can be used for an urban strategy management.

19. keywords

Deceleration and Green Wave Assistant, Prediction of Switching Times, Green Wave Quality Management

20. publisher

21. price