



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Verkehrsdatenerfassung über Sensoren von LSA

**Collecte de données de trafic par les détecteurs
attribués à la régulation de carrefours à feux**

**Traffic data logging by detectors
used for traffic light control**

Marty + Partner Ingenieurbüro AG
Jan Fischer, Dipl. Informatik Ing. FH

Adaptive Traffic Control AG
Thomas Riedel, Dr. sc. techn. ETH

**Forschungsprojekt VSS 2019/126 auf Antrag des Schweizerischen Ver-
bandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Juli 2021

1701

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Verkehrsdatenerfassung über Sensoren von LSA

**Collecte de données de trafic par les détecteurs
attribués à la régulation de carrefours à feux**

**Traffic data logging by detectors
used for traffic light control**

Marty + Partner Ingenieurbüro AG
Jan Fischer, Dipl. Informatik Ing. FH

Adaptive Traffic Control AG
Thomas Riedel, Dr. sc. techn. ETH

**Forschungsprojekt VSS 2019/126 auf Antrag des Schweizerischen Ver-
bandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Juli 2021

1701

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Jan Fischer, Marty + Partner Ingenieurbüro AG

Mitglieder

Thomas Riedel, Adaptive Traffic Control AG

Federführende Fachkommission

NFK 1.5 Verkehrstelematik

Informations- und Kommunikationstechnologien für das Verkehrsmanagement

Begleitkommission

Präsident

Kurt Amstad, Tiefbauamt Kanton Zürich, Baudirektion

Mitglieder

Markus Bartsch, ASTRA
Gian Dönier, Dienstabteilung Verkehr, Stadt Zürich
Michael Früh, Tiefbauamt des Kantons Zug
Hans Ueli Gamper, Trapeze ITS Switzerland GmbH
Clemens Huber, Amt für Mobilität Kanton Basel-Stadt
Patrick Kissling, Amt für Verkehr und Tiefbau, Kanton Solothurn
Anastasios Kouvelas, Gruppe Strassenverkehrstechnik, IVT, ETH Zürich
Alain Maradan, Tiefbauamt des Kantons Bern

Antragsteller

Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	17
Summary	27
1 Einleitung	37
1.1 Erfassung von Fahrzeugen	37
1.2 Zusätzliche Erfassung von Verkehr	37
1.3 Detektoren und ihre Rollen	38
1.4 Detektoren und Zählstellen	39
1.5 Antworten im Forschungsbericht.....	39
2 Wissenschaftliche Ausgangslage	41
2.1 Stand der Forschung.....	41
2.1.1 Intervalldaten.....	41
2.1.2 Rohdaten.....	41
2.1.3 Hinweise zu Detektionstechnologien im Strassenverkehr (Zitate).....	42
2.2 Forschungsbedarf	44
2.2.1 Besonderheit der Schweiz	46
2.2.2 Rohdaten.....	46
3 Vorgehen und Methodik	47
3.1 Technisches	47
3.1.1 Systeme und Daten.....	47
3.1.2 Video-Aufnahmen	48
3.2 Praktisches	49
3.2.1 Plausibilisierung von Einzeldetektoren	49
3.2.2 Messlücken	49
3.2.3 Zusätzliche Messgrössen durch Doppeldetektoren	50
3.3 Einführendes Beispiel	50
3.4 Vorbereitung.....	52
3.5 Versuch 1 in Zollikon, ZH.....	53
3.6 Versuch 2 in Solothurn und Zuchwil, SO	54
4 Ergebnisse: Signalverarbeitung	57
4.1 Fehlerkorrigierende Codes.....	57
4.2 Einzeldetektor.....	58
4.2.1 Störungen.....	58
4.2.2 Technische Einflüsse	58
4.2.3 Signalanalyse	58
4.3 Doppeldetektor.....	58
4.3.1 Geschwindigkeit	58
4.3.2 Fahrzeugklassen.....	59
4.4 Anfahrverhalten.....	60
4.5 Kolonnenverhalten	62
5 Ergebnisse: Zählgenauigkeit	63
5.1 Zählgenauigkeit in Zufahrt SOLO_16 1 (West).....	63
5.1.1 Erhöhung der Zählgenauigkeit	64
5.1.2 Gesamtbetrachtung der Zählgenauigkeit.....	65
5.2 Zählgenauigkeit in Zufahrt SOLO_16 3 (Ost)	66
5.2.1 Erhöhung der Zählgenauigkeit	67
5.3 Zählgenauigkeit in Zufahrt ZUCH_10 West"	67

5.4	Zufahrten von Norden und Süden	68
5.4.1	Süden.....	69
5.4.2	Norden	71
5.5	Zufahrt von Osten	73
5.6	Brückenstück	75
5.7	Vergleich mit einer Verkehrszählstelle.....	76
6	Ergebnisse: Beispiele der Signalverarbeitung	79
6.1	Störung.....	79
6.1.1	Ungewöhnliches, aber korrektes Verhalten	79
6.1.2	Fehlerhafte, kurze Impulse	80
6.1.3	Fehlerhafte, lange Belegungszeiten	81
6.1.4	Langfristiges Schwingen	81
6.2	Übersprechen	87
6.3	Signalanalyse für Doppeldetektoren.....	90
6.4	Längsvergleich.....	94
6.5	Gegenverkehr	95
6.6	Quervergleich.....	96
6.6.1	Velo und Motorfahrzeuge.....	97
6.6.2	Motorfahrzeuge	98
6.7	Anfahrverhalten.....	100
6.7.1	Von Osten (ZUCH_10).....	100
6.7.2	Von Süden (ZUCH_10).....	101
7	Schlussfolgerungen und Forschungsbedarf	103
7.1	Schlussfolgerungen	103
7.2	Resultierender Forschungsbedarf	104
7.2.1	Auswertung des anfahrenden Verkehrs und von Fahrzeugpuls.....	104
7.2.2	Beobachtung der Staulänge und der Reisezeit	105
7.2.3	Erweiterung auf andere Verkehrsträger.....	106
7.2.4	Beobachtung von Koordinationsbrüchen.....	106
7.2.5	Ermittlung von Längensklassen.....	106
7.2.6	Zählen von Velos und Motorrädern	106
7.2.7	Beobachtung von Quell-Ziel-Beziehungen	106
7.2.8	Kombination mit anderen Datenquellen.....	106
8	Empfehlung für die Umsetzung in die Praxis	107
8.1	Vor dem Zählen	107
8.2	Während des Zählens.....	108
8.3	Periodische Nachprüfungen.....	109
8.4	Plausibilität.....	109
8.4.1	Regel 1: Detektor und Signalgruppe.....	110
8.4.2	Regel 2: nachts kann man die Fahrzeuge verfolgen	110
8.4.3	Regel 3: entfernte Detektoren.....	111
8.4.4	Regel 4: Korrelation	111
8.5	Auswahl der Detektoren zum Zählen von Fahrzeugen	112
8.5.1	Zu lange Detektoren verwerfen	112
8.5.2	Aus den kurzen Detektoren auswählen	112
	Anhänge.....	115
	Glossar und Abkürzungen	173
	Glossaire et abréviations	176
	Glossary and abbreviations.....	177
	Literaturverzeichnis.....	178
	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	180
	Projektabschluss	185

Zusammenfassung

Der vorliegende Forschungsbericht hat untersucht, wie gut man mit Detektoren **Fahrzeuge zählen** kann. Die betrachteten Detektoren sind für die **verkehrsabhängige Regelung** von Knotenpunkten installiert worden und nicht mit der ursprünglichen Absicht, Fahrzeuge zu zählen. Die Messungen der Detektoren liegen als **Rohdaten** vor, flankengenau alle Zehntelsekunden. Meist sind die Detektoren Induktionsschleifen, selten Videodetektoren. Der Bericht konzentriert sich auf **Motorfahrzeuge**. Am Rand wird auch versucht, Motorräder und Velos zu erkennen sowie Lastwagen von Personenwagen zu unterscheiden.

Solche Detektoren können durchaus auch zum Zählen geeignet sein, recht genau, und dürfen für Verkehrszählungen verwendet werden. Es müssen aber gewisse Voraussetzungen erfüllt sein. Der Bericht entwickelt darum Leitlinien

- zur **Auswahl** der Detektoren,
- zur Überwachung der **Genauigkeit** der Messungen und
- zur Vorverarbeitung der Messungen zur **Erhöhung** der Zählgenauigkeit.

Damit kann eine Zählgenauigkeit mit **Fehlern von unter 1 %** erreicht werden.

Weiter geht der Bericht der Frage nach, welche weiteren nützlichen Grössen aus **qualitätsgesicherten Detektordaten** errechnet werden können.

Zählen

Mit welchen LSA-Detektoren kann man korrekt zählen? Welche Zählgenauigkeit kann erreicht werden? Wie ist das Vorgehen zum Erreichen der bestmöglichen Zählgenauigkeit?

Genauigkeit

Es gibt nicht den korrekt messenden und somit korrekt zählenden Detektor per se. Alle Messungen von LSA-Detektoren können mit Fehlern behaftet sein. Wie kann man die Fehler eines Detektors entdecken und quantifizieren? Und wie kann man sie korrigieren?

Die Fehler müssen durch die **Beobachtung im System selbst** erkannt und auch korrigiert werden können. Dazu müssen häufig nebst den Messungen eines betrachteten Detektors selbst auch Messungen umliegender Detektoren beigezogen werden. Zu Kontrollzwecken werden in der Forschungsarbeit externe Videoaufnahmen beigezogen.

Unabhängigkeit

Die Erkenntnisse sind weitestgehend unabhängig von der Detektionstechnologie. Für eine eventuelle Vorverarbeitung der Messdaten soll sie keine Rolle spielen.

Zusatznutzen

Qualitätsgesicherte Detektor-Messungen haben einen hohen Zusatznutzen zur Bestimmung und Überwachung von **Modellparametern**, beispielsweise des **Zeitbedarfswerts**, des **Fahrverhaltens** oder von **Quell-Ziel-Beziehungen**, aber auch zur Ermittlung regelungstechnisch relevanter Grössen wie **Staulängen** und **Verlustzeiten**. Auch zur Kombination mit Messungen anderer Systeme («**Data Fusion**») sind sie dadurch sehr gut verwendbar.

Statistische Anforderungen

Für eine landesweite Statistik oder auch den internationalen Vergleich müssen die Zählwerte – und allgemein alle Messwerte – den folgende drei Kriterien genügen:

- **Vergleichbarkeit:** Die Messungen müssen untereinander vergleichbar sein.
- **Kontinuität:** Die Messungen müssen über die Zeit miteinander vergleichbar sein.
- **Qualität:** Die Messungen müssen bezifferbaren Qualitätsanforderungen genügen.

Die Forschungsarbeit beschreibt das Vorgehen, um diese Anforderungen sicherzustellen.

Definition der Zählgenauigkeit

Die Zählgenauigkeit bzw. Güte kann in der folgenden Metrik durch die Anzahl Sterne ausgedrückt werden¹:

Güte	*	**	***	****
Fehler	< 15 %	< 10 %	< 5 %	< 2 %

Tab. 1 Qualitätsklassen für Verkehrsmesswerte

Voraussetzung für die Verwendung eines Detektors ist, dass keine technischen Fehler vorliegen, siehe dazu später die Aufzählung im Kapitel «[Fehlertypen](#)».

Periodische Überprüfungen werden empfohlen. Für diese Tests sollte die Technologie der Detektoren keine Rolle spielen dürfen. Es hat sich auch gezeigt, dass sich die dominant verwendeten Induktionsschleifen nicht gross von Videosensoren unterscheiden bezüglich der Möglichkeiten, sich zu irren.

Übersprechen, Prellen, Auslassen von Fahrzeugen kann je nach Situation durch Veränderung der Empfindlichkeit des Detektors korrigiert werden. Kostenintensivere Abhilfen schaffen auch das Verschieben eines Detektors, die Veränderung seiner Form oder gar der Einbau eines Doppeldetektors mit Richtungsempfindlichkeit. Darauf soll hier nicht weiter eingegangen werden, zumal in den meisten Fällen ein System zum Zählen von Fahrzeugen nur «Gast» an bestehenden Detektoren ist und eine Veränderung der bestehenden Detektoren sie die ihnen zugedachte Aufgabe möglicherweise nicht mehr korrekt erfüllen lassen könnte.

Bestimmung der Zählgenauigkeit

Die Zählgenauigkeit kann im System nur im Vergleich mit anderen, auf derselben Fahrlinie liegenden Detektoren bestimmt werden (siehe Kapitel 5). Ein Vergleich mit Handzählungen ist natürlich auch möglich, was in dieser Arbeit anhand von Videoaufnahmen durchgeführt worden ist. Ebenso können Vergleiche mit Zählstellen anderer Systeme durchgeführt werden, in diesem Bericht mit einer VDE-Zählstelle (siehe Abschnitt 5.7). Idealerweise liegen dabei mindestens drei Detektoren auf einer Fahrlinie:

- Es gibt eine **Häufung** von Zählwerten, wo sich mindestens zwei Detektoren in etwa einig sind.
- Bei **Patt**-Situationen (die Detektoren sind sich paarweise einig über den Zählwert, es gibt aber keine klare Mehrheit) hilft nur ein Blick auf den aufgezeichneten Signalzeitplan, wo sporadische, systematische oder Verkehrs-induzierte Fehler erkennbar sind.
- Je kleiner die **Garbe** der Kurven, welche als korrekt identifiziert worden sind, umso besser ist die Zählgenauigkeit.

Es liegt auf der Hand, dass man in der Abfolge von Detektoren denjenigen zum Zählen wählt, welcher die höchste Zählgenauigkeit hat. Dabei empfehlen sich folgende flankierende Massnahmen für zukünftige Störungen im Fall ausreichender Redundanz:

- Bereitstellung von **Ersatz-Detektoren** aus derselben Garbe, falls der gewählte Detektor ausfallen sollte, kurzzeitig gestört ist oder sein Verhalten suspekt wird.
- Falls nicht vorhanden, sollte aus weiteren Detektoren in derselben Zufahrt genügend Information hergeleitet werden, um mindestens die Zählwerte temporär zu ersetzen.
- Eventuell auch Bereitstellung von Ersatz-Detektoren, deren Abweichung der Zählwerte bezüglich des gewählten Detektors beschreibbar sind, entweder durch einen konstanten Offset, einen Proportionalitätsfaktor oder durch eine **Abweichungs-Ganglinie** [8].

So kann man sicherstellen, dass ein Ausfall eines Detektors nicht auch zum Ausfall der Statistik führt.

¹ Framework Guidelines for Data and Service Quality Requirements. EIP Sub-Activity 3.2. Data and Service Quality Requirements for (Real-Time) Traffic Information incl. Road Safety Related Traffic Information

Erhöhung der Zählgenauigkeit

Es ist wünschenswert, so genau wie möglich zählen zu können. Zur Erhöhung der Genauigkeit gibt es eine Reihe von Methoden. Sie alle gehen von einer Vorverarbeitung des Rohsignals der Detektoren aus, bevor es in Zählwerte umgewandelt wird. Hier sind die Vorverarbeitungen in aufsteigender Komplexität aufgezählt.

- Korrektur mit **Tiefpass**-Filter: Das Rohsignal des Detektors wird durch einen Tiefpass geschickt. Ein Tiefpass filtert hohe Frequenzen, also kurze Impulse und kurze Lücken. Dadurch werden prellende Signale und auch Detektionen von Zweirädern ausgemerzt. Einen reinen Tiefpass zu verwenden ist jedoch gefährlich, denn ein kurzer Impuls ist nicht immer ein Fehler.
- **Signalanalyse am Einzeldetektor** und Erkennung von **Störungen**: Normalerweise zeigen Detektoren Effekte, die mit Prellen verglichen werden können. Sie sind auf Anhänger oder elektromagnetische Unstetigkeiten des Fahrzeuges zurückzuführen. Die Frequenz von solchem Prellen ist häufig deutlich höher als Lücken zwischen Fahrzeugen und Impulsdauern von Fahrzeugen. Prellen kann mit relativ einfachen Mitteln herausgefiltert werden, allerdings unter Einbusse von Detailinformationen über die Fahrzeugtypen und häufig auch unter Verlust der Zählung von Velos und Motorrädern.

Bekannte Störungen müssen genau beschreibbar sein. Am einfachsten sind sie für elektrische Schienenfahrzeuge beschreibbar. Aber auch sporadisch prellende Detektoren können auf Störungen zurückzuführen sein. Während der gestörten Zeit können Detektoren häufig nicht zum Zählen verwendet werden. In dieser Zeit sollte ein Ersatz-Detektor verwendet werden.

- **Signalanalyse am Doppeldetektor** durch die Behandlung von **Haltelinien-nahen Doppeldetektoren**, vor und nach der Haltelinie oder beide nach der Haltelinie: meist sind diese beiden Detektoren unterschiedlich empfindlich eingestellt und ermöglichen eine differenzierte Erklärung und Behebung von beobachteten Phänomenen.
- Behandlung von **Detektionssequenzen** von zwei und mehr Detektoren auf derselben Fahrlinie, falls vorhanden: damit können die Einkopplung von Gegen- und Parallelverkehr sowie von Zweirädern erkannt werden; Velos zeigen zudem andere Phänomene als Motorräder.
- **Signalanalyse an parallelen Detektoren** durch die Behandlung von **parallelen Fahrspuren in dieselbe Richtung** zur Identifikation von überholenden Motorrädern, überholten Velos und unsauber befahrenen Fahrspuren
- Behandlung von parallelen Fahrspuren in die **Gegenrichtung** und dadurch ausgelöstem Übersprechen
- **Verfolgung** der Fahrzeuge über mehrere Knoten mit dem Ziel herauszufinden, ob es sich um ein wirkliches Motorfahrzeug handelt, ob es ein Velo oder ein Motorrad ist, ob gemessene Preller auf einen Anhänger zurückgehen, usw. Als Zusatznutzen kann man eine zeitvariante Quell-Ziel-Matrix schätzen [7].
- **Rechtswidriges Verhalten** wird von der Vorverarbeitung erkannt. Die Erkennung ist nicht immer klar, da es sich auch um fehlerhafte Impulse handeln kann. Meist wird sie durch die Betrachtung mehrerer Detektoren klar und der gleichzeitigen Kenntnis des Zustandes der Signalgruppen, wie beispielsweise
 - die **Rotfahrer**, erkannt von den beiden Detektoren vor und nach der Haltelinie,
 - überholende **Motorräder** auf einer richtungsfremden Abbiegespur Spur lassen sich eventuell verfolgen,
 - **Umfahren** des Lichtsignals auf einer anderen Spur,
 - Befahren des Fußgängerstreifens oder des Trottoirs durch ein Velo.

Der Forschungsbericht diskutiert diese Verfahren und entwickelt Grundlagen für eine automatische Erkennung.

Ermittelte Zählgenauigkeit

Beispielhaft werden die rohen und die korrigierten Zählwerte einer typischen Zufahrt² hier eingeführt. Auf dem Weg zur Haltelinie überfährt ein Fahrzeug die folgenden verwertbaren Detektoren:

- «3» für die Anmeldung
- «1» vor der Haltelinie für Motorfahrzeuge
- «V» vor der Haltelinie für Velos
- «R» nach der Haltelinie («Rotlicht-Detektor»)

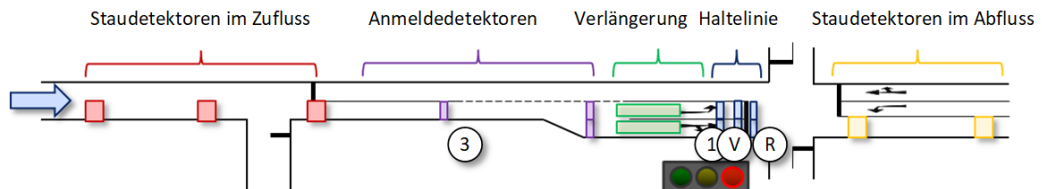


Abb. 2 Wichtigste Detektoren und ihre Rollen in einer Zufahrt

Folgendes Detektionsverhalten kann festgestellt werden:

- Nur Detektor «V» detektiert Velos (V)
- Alle Detektoren detektieren Motorfahrzeuge (MFZ) und auch Motorräder (MR), Motorräder werden aber häufig unzuverlässig detektiert

Die Vorverarbeitung der Messungen gemäss [Signalanalyse am Einzeldetektor](#) (siehe später) bringt folgende Veränderungen mit sich:

- Keiner der Detektoren detektiert mehr Motorräder.

Das ist auf das Fahrverhalten der Motorräder zurückzuführen und zwar insbesondere auf den Abstand in einer anfahrens- oder langsam fahrenden Kolonne, welcher dem Detektionsmuster eines Anhängers gleicht.

So entsteht folgende typische Qualitäts-Analyse der Möglichkeit, mit LSA-Detektoren zu zählen. Die Sterne sind gemäss [Tab. 1](#) vergeben:

Detektor	Erkannte Fahrzeugklassen		Abweichung zu Handzählung		Weitere Klassen	
	unkorrigiert	korrigiert	unkorrigiert	korrigiert	V	MR
3	MFZ und MR	MFZ	** < 8 %	** < 6 %		
1	MFZ und MR	MFZ	**** < 1 %	**** < 1 %		< 17 %
V	MFZ, MR und V	MFZ und V	**** < 2 %	**** < 1 %	** < 7 %	
R	MFZ und MR	MFZ	**** < 2 %	**** ≈ 0 %		

Tab. 3 Typische Zähl-Genauigkeiten von Detektoren in einer Zufahrt

Velos und Motorräder

In [Tab. 3](#) sieht man, dass der korrigierte Detektor R die Motorfahrzeuge so gut wie richtig zählt, aber keinerlei Velos und Motorräder mehr. Er kann deshalb als Referenz für die anderen Detektoren in der Zufahrt verwendet werden.

- Detektor V zählt neben den Motorfahrzeugen auch die **Velos**. Differenzbildung führt zur experimentell ermittelten Fehlerrate von **-7 %**.
- Unkorrigiert zählt Detektor 1 mit der höchsten Genauigkeit die Summe von Motorfahrzeugen und **Motorrädern**. Die Differenzbildung mit der Anzahl Motorfahrzeuge führt hier zu einer experimentell ermittelten Fehlerrate von **-17 %**, was aber ausserhalb der tolerierten Genauigkeit liegt.

In Kapitel [5](#) wird die Zählgenauigkeit im Detail beschrieben.

² Zufahrt 1 am Knoten 16 in Solothurn ([SOLO 16](#))

Die wichtigsten Ergebnisse

Qualitätsgesicherte Messungen

Der Forschungsbericht entwirft ein Verfahren zur Ermittlung von **Zählwerten mit Konfidenzwerten** für LSA-Detektoren. Eine Fehlerrate von $< 1\%$ ist möglich, $< 2\%$ ist häufig und $< 5\%$ ist in den meisten Fällen erreichbar. Das ermöglicht in Zukunft die systematische Verwendung von LSA-Detektoren als zusätzliche Zählstellen, schweizweit und im internationalen Austausch. Ihre Resultate ermöglichen qualitätsgesicherte Zählwert-Statistiken.

Damit diese Genauigkeit erreicht wird, müssen die Detektorsignale in den meisten Fällen vorverarbeitet werden. Dabei verzichtet man auf die Ermittlung von Fahrzeugklassen.

Auf der Basis von auf diese Art qualitätsgesicherten Detektorsignale können **Verkehrszustände** auf Einzel- und Doppeldetektoren errechnet werden, welche auf der berechneten Überfahrgeschwindigkeit basieren. Das kann in statistische Angaben über **Stautunden** umgerechnet werden.

Befinden sich mehrere qualitätsgesicherte Detektoren in einer Zufahrt, kann daraus eine diskretisierte **Staulänge** bestimmt werden.

Ebenso bei mehreren qualitätsgesicherten Detektoren in einer Zufahrt können **Reise- und Verlustzeiten** geschätzt werden [11], ebenso die **Anzahl Halte** bis zur Überfahrt bei Grün.

Verständnis

Der Forschungsbericht hilft, viele **Detektions-Phänomene** in und anhand der Messdaten zu verstehen. Sie nutzt zur Erklärung Videoaufnahmen. Nur sehr wenige Fälle müssen als «spontane Störung» abgetan werden. Sie zeigt einen Weg auf, wie die Phänomene **erkannt** und wie die dadurch verursachten Störungen **behoben** werden können. Der Forschungsbericht schafft ebenfalls die Grundlagen, das Erkennen und das Beheben zu **automatisieren**.

Anwendung

In Empfehlungen für die Umsetzung in die Praxis stellt der Forschungsbericht die Schritte vor, mit welchen LSA-Detektoren zum Zählen ausgewählt werden können und in der gelieferten Qualität überwacht, im besten Fall sogar verbessert werden können.

Auf der Basis qualitätsgesicherter Detektormessungen können nicht nur Zählwerte errechnet werden, sondern auch weitere nützliche Grössen. Der Verkehrszustand, die Stautunden und die Reisezeit sind erwähnt worden. Es ist in Zukunft aber denkbar, auch weitere Grössen zu berechnen und zu überwachen, wie den **Zeitbedarfswert** und damit die **Leistungsfähigkeit**, die **optimale Gründauer**, **Brüche in Koordinationen**, bis hin zur Beobachtung von zeitvarianten **Quell-Ziel-Beziehungen** [7].

Nutzen

- Die Erhöhung der Zählgenauigkeit von Detektoren verhilft den Verkehrsingenieuren zu **genaueren Planungswerten** in höherer Granularität.
- Stautunden, Staulängen, Geschwindigkeiten und Reisezeiten sind als **statistische Werte** interessant, welche bisher innerstädtisch nur spärlich vorliegen.

Schliesslich ist es denkbar, dass nach Umsetzung in der Praxis solche Werte auch online zur Verfügung gestellt werden können (via OCIT-I PD, OCIT-C oder auch DATEX II),

- was einerseits zu einem besseren **Verständnis der Abläufe im Verkehr** führen kann und direkt in die **Verbesserung** von Knotensteuerung und Verkehrsmanagement einfließen kann,
- und andererseits auch online für Eingriffe durch das **Verkehrsmanagement** verwendet werden kann.

Somit ist eine längerfristige Wirkung der Forschungsarbeit zu erwarten, welche dem Verständnis und der Verbesserung des Verkehrsflusses dienen wird.

Fehlertypen

Die Fehlerrate der erreichbaren Zählgenauigkeit ist sehr häufig kleiner als 15 % und erreicht Werte von unter 2 %. Mit Vorverarbeitung können die Fehler sogar unter 1 % liegen.

Ein Detektor muss eine Reihe von Tests bestehen, einerseits bevor er überhaupt zum Zählen zugelassen wird, andererseits beim späteren Zählen im Betrieb. Dazu werden periodische Überprüfungen empfohlen. In Kapitel 8 «[Empfehlung für die Umsetzung in die Praxis](#)» wird ein Leitfaden entwickelt, wie man bei der Auswahl von Detektoren vorgehen soll.

Folgende Tests muss ein Detektor bestehen können:

- **Technische Fehler:** Mit der Überprüfung auf technische Fehler stellt man eine Grund-Plausibilität sicher. Am besten ist die Plausibilität sichtbar in der Aufzeichnung eines Signalzeitenplans mit zugehörigen Detektoren:
 - Die Detektionen passen zum angezeigten Bild der **nächstgelegenen Signalgruppe**.
 - Das **statistische Verhalten** entspricht demjenigen von Autoverkehr (plausible Belegungsdauern und Lücken).
 - Die Detektionen passen zu den **umliegenden Detektionen**.

Gründe für technische Fehler können unter anderem die folgenden sein:

- Vertauschte Kanalnummern zweier Detektoren
- Fehlerhafte Auswerteeinheit eines Detektors oder fehlerhafter Detektor selbst
- **Sporadische Fehler:** Detektoren können im Betrieb unregelmässig unplausible Werte aus folgenden Gründen liefern:
 - Elektromagnetische **Einkopplung** durch Fahrzeuge auf den Detektoren und in ihrer unmittelbaren Nähe – oder optische Störungen
 - Elektromagnetische Einkopplung durch **elektrische Schienenfahrzeuge**
 - Automatisches **Nachjustieren** der Detektoren [8], was zu temporärem Schwingen oder zu plötzlichen Dauerbelegungen führen kann
- **Technologie-bedingte systematische Fehler:** Detektoren können im Betrieb immer wieder dieselben Phänomene zeigen:
 - **Nicht-Erkennung** gewisser Fahrzeuge, die bestimmten Typen angehören
 - **Prellen** am Anfang oder am Ende eines Impulses oder einer Belegung oder spontanes Schwingen während einer Dauerbelegung [1]
 - **Verirrte**, nicht erklärbare Impulse
- **Verkehrs-induzierte systematische Fehler:** Die Zuordnung einer Messung zur Fahrlinie eines Fahrzeugs ist unsicher, beispielsweise in folgenden Fällen:
 - Übersprechen des **Gegenverkehrs** oder einer **parallelen** Fahrspur
 - **Spurwechsel**
 - **Überholen** auf einer anderen Spur (häufig bei Motorrädern)
 - **Ungenaues** Befahren einer Spur (beispielsweise zum Überholen von Velos)
 - **Schneiden** von Spuren

Je nach Lage und technischer Ausstattung der Detektoren können die sporadischen, systematischen oder Verkehrs-induzierten Fehler gar nicht vorkommen oder sehr dominant sein. Die Mischung der Häufigkeit der verschiedenen Fehler bestimmt die Zählgenauigkeit.

Eine wichtige Rolle spielt der **Doppeldetektor**, häufig vor und nach der Haltelinie gelegen. Er ermöglicht auf kurzer Distanz eine redundante Betrachtung der Messdaten und dadurch eine erleichterte Erkennung von Phänomenen.

Signalanalyse am Einzeldetektor

Einzeldetektoren zeigen Prellen und sonstige unregelmässige Schwingungen im eigentlich konstanten Signalverlauf als unerwünschte Störungen. Einzeldetektoren erkennen auch regelmässig Anhänger oder Führerkabine von Lastwagen als Einzelsignale. Wenn nur die Anzahl Fahrzeuge ohne Erkennung von Anhängern oder Schätzung einer Klassierung gezählt werden soll, sind diese Mehrfachdetektionen störend und müssen unterdrückt werden. Dies kann in einer Vorverarbeitung des Rohsignals geschehen.

Die folgende Abbildung zeigt eine typische Detektionssequenz eines Detektors. Die zeitliche Auflösung in horizontaler Richtung ist typischerweise 0.1 s, kann aber auch besser sein. Als Werte in vertikaler Richtung treten nur 0 für «nicht belegt» und 1 für «belegt» auf.

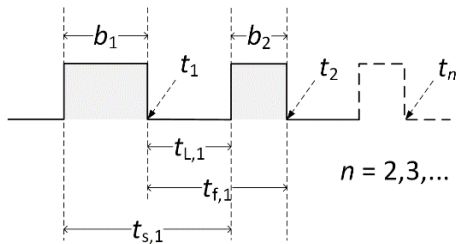


Abb. 4 Gemessenes Signal eines einzelnen Detektors

- b_n ist die Belegungszeit.
- n dient der Nummerierung der aufeinander folgenden Impulse, startend bei 1.
- t_n ist der Zeitpunkt der fallenden Flanke des n -ten Impulses.
- $t_{L,1}$ ist die Nettozeitlücke («Lücke») zwischen dem ersten und dem zweiten Impuls.
- $t_{f,1}$ ist die Bruttozeitlücke («Folge» oder «fallend») zwischen dem ersten und dem zweiten Impuls, gemessen zwischen den fallenden Flanken. Wir verwenden sie hier nicht.
- $t_{s,1}$ ist die Bruttozeitlücke («steigend») zwischen dem ersten und dem zweiten Impuls, gemessen zwischen den steigenden Flanken. Wir verwenden sie hier nicht.

Folgende Effekte können im Rohsignal eines Detektors erkannt werden:

- Schwingt ein Detektor, dann ist t_L meist ≤ 0.1 s für alle Impulse 1 bis n .
- Für Anhänger, Führerkabine oder Zugfahrzeuge von Sattelschleppern ergibt sich meistens eine Nettozeitlücke t_L von ≤ 0.6 s und in den meisten Fällen > 0.1 s.
- n ist für Anhängerzüge meist 2, für Sattelschlepper kommt auch 3 vor.

Beschränkt man sich auf die Filterung von kurzen Nettozeitlücken mit dem Ziel der Verbesserung der Zählwerte von Motorfahrzeugen, kann man auf die Unterscheidung zwischen Prellen, Schwingen und Anhängerzügen verzichten:

- Dafür unterdrückt man so lange die Nettozeitlücken, bis sie wieder t_L von > 0.6 s sind.
- Möchte man Prellen erkennen, dann achtet man gleichzeitig auf kurze Nettozeitlücken: wenn $t_L \leq 0.1$ s ist und $n=2$, dann handelt es sich um Prellen.
- Wenn $n > 3$ ist, dann handelt es sich um eine Störung.

Für die Signal-Vorverarbeitung folgt hieraus, dass steigende Flanken sofort weitergeleitet werden können. Fallende Flanken müssen zuerst bezüglich Nettozeitlücken überprüft werden. Sie dürfen erst dann weitergeleitet werden, wenn die Zeit der längsten erwarteten Nettozeitlücke abgelaufen ist.

Signalanalyse am Doppeldetektor

Folgen zwei Detektoren in kurzem Abstand aufeinander, dann können die beiden zusammen algorithmisch als Doppeldetektor behandelt werden. Üblicherweise werden Doppeldetektoren dediziert zur exakten Zählung, zur Bestimmung der Fahrzeugklasse und zur Messung der Geschwindigkeit an geeigneter Stelle in die Fahrbahn eingelassen, wie bei den VDE-Zählstellen. Im Umfeld von LSA-Detektoren sind die Doppeldetektoren häufig «ad hoc» zu finden, d.h. sie sind nicht als solche erstellt worden, sondern es sind Detektoren, die nahe beieinander liegen, z.B. kurz vor und kurz nach der Haltelinie.

Doppeldetektoren liegen so nahe beieinander, dass sich maximal zwei Fahrzeuge darauf befinden können, eines auf dem ersten Detektor und eines auf dem zweiten. Das soll hier die Annahme sein. Den Fall, dass die Detektoren so weit auseinander liegen, dass sich mindestens ein weiteres Fahrzeug zwischen den Detektoren befinden kann, lassen wir nicht unter den Begriff des Doppeldetektors fallen.

Es hat sich gezeigt, dass die Ad-hoc-Doppeldetektoren nicht wie dedizierte Doppeldetektoren verwendet werden können. Häufig sind die magnetischen oder optischen Eigenschaften der beiden Detektoren unbekannt oder zueinander unterschiedlich bezüglich ihrer Empfindlichkeit. Auch haben sie häufig unterschiedliche Bauformen – so detektieren sie vor der Haltelinie häufig auch Velos am rechten Strassenrand, nach der Haltelinie nicht.

Doppeldetektoren eignen sich in erster Linie zur Bestimmung und zur Korrektur von Zählfehlern. In zweiter Linie können Geschwindigkeiten mit recht guter Präzision bestimmt werden. In dritter Linie kann versucht werden, Fahrzeugtypen und -klassen zu bestimmen. Das ist einerseits über unterschiedliche Empfindlichkeiten möglich (Erkennung von Zweirädern nur auf einem der beiden Detektoren) oder über die Auswertung der Impulslänge in Funktion der bestimmten Geschwindigkeit, um so auf die Länge der Fahrzeuge zu schliessen. Das ist aber häufig schwierig, da die magnetischen oder optischen Echos der Fahrzeuge nicht systematisch auf ihre Länge schliessen lassen.

Die nächste Abbildung zeigt schematisch die messbaren Grössen zweier aufeinanderfolgender Detektoren.

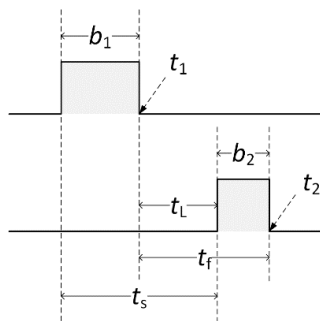


Abb. 5 Gemessene Signale eines Doppeldetektors

- Die 1. Belegungszeit b_1 wird vom 1. Detektor gemessen.
- Die 2. Belegungszeit b_2 wird vom 2. Detektor gemessen.
- Dazwischen liegt die Nettozeitlücke t_L («Lücke»). Normalerweise ist dieser Wert positiv, aber bei kurzem Abstand zwischen den Detektoren oder bei langen Fahrzeugen kann er auch negativ sein.
- Als Referenz-Zeiten werden jeweils die fallenden Flanken t_1 und t_2 genommen. Dadurch wird auch eine Auswertung bei anfahrendem Verkehr nach Rot ermöglicht. Nur bei Rückstau auf den 2. Detektor ist keine Auswertung möglich.
- Die Fahrzeit t_F wird zwischen den beiden fallenden Flanken bestimmt.
- Der Vollständigkeit halber gibt es auch eine Fahrzeit t_s zwischen den beiden steigenden Flanken, die wir hier aber nicht verwenden wollen.

Signalanalyse an parallelen Detektoren

Detektoren sind Fahrspuren zugeordnet. Es kommt aber vor, dass Detektoren auch Fahrzeuge einer angrenzenden Spur detektieren. Das kann vom Gegenverkehr ausgelöst werden oder vom parallel fahrenden Verkehr. Wir nennen das hier «Übersprechen», wenn ein Fahrzeug aus einer anderen Spur detektiert wird. Übersprechen führt zu Zählfehlern und zu Falschanmeldungen.

Liegt in der übersprechenden Spur ebenfalls ein Detektor, auf gleicher Höhe oder nicht weit davon entfernt, kann das Übersprechen anhand der Beobachtung der zeitlichen Abfolge der Signale der beiden Detektoren erkannt werden.

Die nächste Abbildung zeigt verallgemeinert die gemessenen Belegungssignale der beiden nebeneinander liegenden Detektoren. Das Fahrzeug fährt auf der linken Spur und wird vom Detektor der rechten Spur mit detektiert.

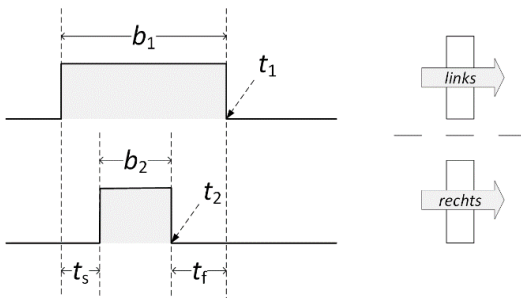


Abb. 6 Gemessene Signale zweier nebeneinander liegender Detektoren

- Die linke, 1. Belegungszeit b_1 wird vom 1. Detektor gemessen.
- Die rechte, 2. Belegungszeit b_2 wird vom 2. Detektor gemessen.
- Als Referenz-Zeiten werden jeweils die fallenden Flanken t_1 und t_2 genommen.
- Der Zeitunterschied der beiden steigenden Flanken wird von t_s wiedergegeben.
- Der Zeitunterschied der beiden fallenden Flanken wird von t_f wiedergegeben.

In der Abbildung wird für die Messung der Zeiten t_s und t_f angenommen, dass der Impuls der rechten Spur vollständig innerhalb des Impulses der linken Spur liegt. Sollte dies nicht der Fall sein, können die Zeiten negativ werden.

Wenn die Detektoren nicht auf derselben Höhe liegen, wird eine Offset-Zeit t_o eingeführt, welche der Fahrzeit zwischen den beiden Detektoren Rechnung trägt. Dadurch können die vorhin eingeführten Variablen gleich weiter verwendet werden, ausser natürlich t_2 .

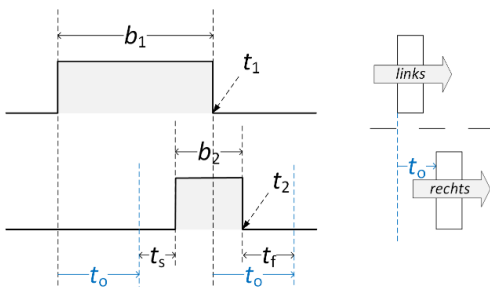


Abb. 7 Gemessene Signale zweier benachbarter, verschobener Detektoren

Weitere Resultate

Verkehrsdatenerfassung muss sich nicht auf das Zählen beschränken.

Obwohl sich diese Arbeit auf Zählungen konzentriert hat, können qualitätsgesicherte Einzeldetektoren für zahlreiche zusätzlichen Messungen verwendet werden, wie:

Messung des Anfahrverhaltens am Einzeldetektor

In [Abb. 8](#) ist beispielhaft die gemittelte, qualitätsgesicherte Bruttozeitlücke anfährender Fahrzeuge in drei parallelen Fahrspuren gezeigt, und zwar in Funktion der Position des anfährenden Fahrzeuges in der Warteschlange vor einem Rotlicht.

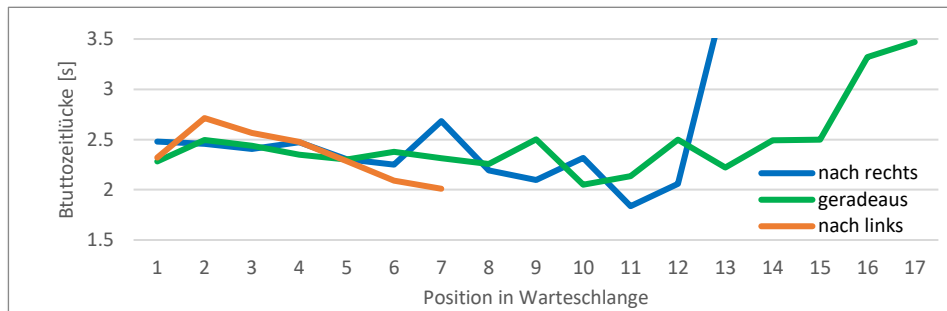


Abb. 8 Beispielhaftes Anfahrverhalten in einer Zufahrt

Aus der Messung des Anfahrverhaltens an der Haltelinie kann der aktuelle **Zeitbedarfswert** der Fahrzeuge berechnet und **angebotene** mit **genutzter Grünzeit** verglichen werden. Ebenso kann die **Kapazität** von Zufahrt und Knoten berechnet und die gemessenen Zeitbedarfswerte mit den für den Entwurf der Regelung verwendeten verglichen werden.

Weitere Einzelheiten dazu findet man in den Abschnitten [4.4](#) und [6.7](#).

Erkennung von Stau und Stautendenz am Einzeldetektor

Zur Erkennung von Stau und Stautendenz dienen üblicherweise Verlängerungsdetektoren (siehe [Abb. 2](#)) oder Staudetektoren. Die meisten Detektoren in den Zufahrten sind jedoch kürzer. Mit einem kurzen Detektor ist das schwierig, denn er kann bei Stau in eine Lücke zwischen zwei Fahrzeuge fallen und unbelegt bleiben.

Verfügt man über eine qualitätsgesicherte Belegungszeit des Detektors, kann man aus der Beobachtung der Veränderung der Geschwindigkeit der Fahrzeuge Stau und Stautendenz erkennen [\[4\]](#): Bei genügender Anzahl solcher Detektoren in der Zufahrt kann eine **diskrete Staulänge** berechnet werden. Wenn zusätzlich der Zustand der Signalgruppe bekannt ist, kann daraus eine aktuelle **Verlustzeit** berechnet werden und die **Anzahl Halte** geschätzt werden anhand der Anzahl Umläufe, welche ein Fahrzeug in der Zufahrt verbringt.

Erkennung der Geschwindigkeit am Doppeldetektor

Doppeldetektoren ermöglichen die Messung einer **Geschwindigkeit**, anhand welcher darauf geschlossen werden kann, wie zäh der Verkehr fließt, so auf Stautendenz. Da Doppeldetektoren meist um die Haltelinie herum zu finden sind, kann dort auf die **Güte des Abflusses** und ein eventuelles Überstauen eines Knotens geschlossen werden.

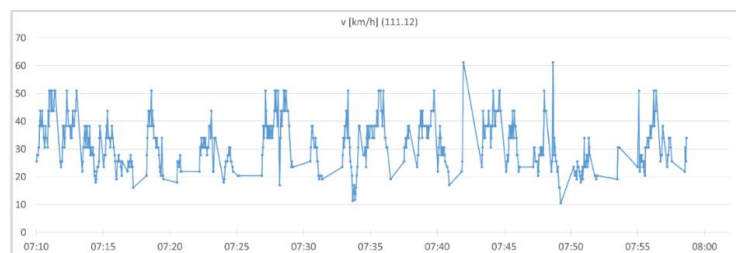


Abb. 9 Geschwindigkeit auf einer Doppelschleife

Weitere Einzelheiten dazu findet man in den Abschnitten [4.3.1](#) und [6.3](#).

Résumé

Ce rapport de recherche examine comment des **véhicules** peuvent être **comptés** au moyen de détecteurs installés pour la **régulation de carrefours** (« détecteur armoire ») et non pas uniquement pour le comptage de véhicules. Les mesures se font sous forme de **données brutes** en termes de fronts montants et descendants tous les dixièmes de seconde. La plupart des détecteurs sont des boucles inductives, moins fréquemment des détecteurs vidéo. Le rapport se concentre sur les **véhicules**. Les possibilités de reconnaître des deux-roues ont aussi été examinées, de même une distinction entre camions et voitures.

Oui, il est tout à fait possible de compter assez précisément avec de tels détecteurs ! Pas avec tous les détecteurs et pas aussi bien avec tous.

Le rapport de recherche élabore donc des lignes directrices

- pour **sélectionner** les détecteurs,
- pour surveiller la **précision** des mesures et
- pour prétraiter les mesures afin d'**augmenter** la précision de comptage.

Cela permet d'obtenir une précision de comptage avec des **erreurs inférieures à 1 %**.

Le travail se poursuit avec la question de savoir quelles autres valeurs utiles peuvent être calculées à partir de données de **détection de qualité assurée**.

Comptage

Avec quels détecteurs armoire peut compter correctement ? Quelle précision de comptage peut-on obtenir ? Comment obtenir la meilleure précision de comptage possible ?

Précision

Il n'existe pas de détecteur armoire qui mesure de manière parfaite et donc qui compte tout à fait correctement en soi. Toute mesure de détecteurs peut être sujette à des erreurs. Comment découvrir et quantifier les erreurs d'un détecteur ? Et comment peut-on les corriger ?

Il devrait être possible de reconnaître et de corriger les erreurs en les **observant dans le système lui-même**. Pour y parvenir, les mesures d'un détecteur doivent normalement être comparées aux mesures de détecteurs environnants. Des enregistrements vidéo externes sont utilisés dans la recherche à des fins de contrôle.

Indépendance

Les résultats sont autant que possibles indépendants de la technologie de détection. La technologie ne doit jouer aucun rôle dans le prétraitement des données de mesure.

Valeurs ajoutées

Les mesures de détecteurs de qualité assurée ajoutent des valeurs supplémentaires pour déterminer et surveiller des **paramètres** d'un **modèle de trafic**, tels que le créneau inter-véhiculaire, le **comportement de conduite** ou les **relations origine-destination** mais aussi pour la détermination de paramètres pour la régulation en tant que **longueurs de file d'attente** et **de temps perdus**. Ils peuvent également très bien être utilisés combinés avec des mesures d'autres systèmes (« **data fusion** »).

Besoins statistiques

Pour les statistiques nationales ou les comparaisons internationales, les valeurs comptées – et généralement toute valeur mesurée – doivent répondre aux trois critères suivants :

- **Comparabilité** : les mesures doivent être comparables entre elles.
- **Continuité** : les mesures doivent être comparables dans le temps.
- **Qualité** : Les mesures doivent répondre à des exigences de qualité quantifiables.

Ce rapport décrit la procédure nécessaire pour répondre à ces besoins statistiques.

Définition de la précision de comptage

La précision ou la qualité du comptage peut être exprimée dans la métrique suivante par le nombre d'étoiles³ :

Qualité	*	**	***	****
Erreur	< 15 %	< 10 %	< 5 %	< 2 %

Tab. 10 Classes de qualité pour les mesures de trafic

La condition préalable à l'utilisation d'un détecteur est qu'il n'y ait pas d'erreurs techniques, voir plus loin le chapitre « [Types d'erreurs](#) ».

Des examens périodiques sont recommandés. La technologie utilisée pour la détection ne devrait pas avoir d'importance pour ces tests. Il a également été montré que les boucles d'induction majoritairement utilisées ne diffèrent pas beaucoup des capteurs vidéo en ce qui concerne les possibilités d'erreurs de détection.

La diaphonie, les rebonds, les sauts de véhicule peuvent être corrigés en modifiant la sensibilité du détecteur en fonction de la situation. Des améliorations plus coûteuses peuvent également être fournies en déplaçant un détecteur, en modifiant sa forme ou même en installant un détecteur double à sensibilité directionnelle. Nous n'entrerons pas dans ces détails d'autant plus que dans la plupart des cas un système de comptage de véhicules n'est qu'un « invité » des détecteurs existants et qu'un changement dans les détecteurs en place pourrait éventuellement ne plus leur permettre d'accomplir correctement leur tâche prévue.

Détermination de la précision de comptage

La précision de comptage ne peut être déterminée dans le système qu'en comparaison avec d'autres détecteurs situés sur la même trajectoire de conduite. Un comptage manuel est bien sûr une possibilité, ce qui a été réalisé dans ce travail à l'aide d'enregistrements vidéo. Des comparaisons peuvent également être effectuées avec des stations de comptage extérieures au système. Ce qui a été fait et a donné une confirmation de bonne qualité pour les comptages externes et une assez bonne concordance avec les comptages des détecteurs. Idéalement, il y aura au moins trois détecteurs sur une trajectoire de conduite :

- Il y a un **cumul** de comptages là où au moins deux détecteurs concordent à peu près.
- Dans les situations d'**impasse** (les détecteurs s'accordent par paire sur la valeur de comptage mais il n'y a pas de majorité claire), seule une considération du plan de feux peut aider pour identifier des erreurs sporadiques, systématiques ou liées au trafic.
- Plus le **faisceau** de courbes identifiées comme correctes est petit, meilleure est la précision du comptage.

Il est évident que le choix parmi une séquence de détecteurs pour le comptage se portera sur celui qui a la précision de comptage la plus élevée. Les mesures d'accompagnement suivantes sont recommandées pour éviter de futures perturbations:

- Fournir des **détecteurs de remplacement** du même faisceau au cas où le détecteur sélectionné échoue, s'il fonctionne mal pour un court laps de temps ou si son comportement devient étrange.
- S'ils ne sont pas disponibles, il faut essayer de dériver assez d'information de détecteurs environnants pour remplacer les valeurs de comptage temporairement.
- De plus, ou si ce n'est pas disponible autrement, prévoir des détecteurs de remplacement dont les différences de comptage par rapport au détecteur initialement choisi peuvent être décrites par un décalage constant, un facteur de proportionnalité, ou par une **courbe d'écart** [8].

Il s'agit de s'assurer qu'une défaillance d'un détecteur n'entraîne pas une défaillance des statistiques.

³ Framework Guidelines for Data and Service Quality Requirements. EIP Sub-Activity 3.2. Data and Service Quality Requirements for (Real-Time) Traffic Information incl. Road Safety Related Traffic Information

Augmentation de la précision de comptage

Il est souhaitable de pouvoir compter le plus précisément possible. Il existe un certain nombre de méthodes qui peuvent être utilisées pour augmenter cette précision. Elles assurent toutes un prétraitement du signal brut des détecteurs avant sa conversion en valeurs de comptage. Les types de prétraitement sont répertoriés par ordre croissant de complexité.

- Correction avec un filtre **passé-bas** : Le signal brut du détecteur est envoyé à travers un filtre passe-bas qui filtre les hautes fréquences, c'est-à-dire les impulsions courtes et les intervalles courts. Cela élimine les signaux de rebond et les détections des deux-roues. Cependant, utiliser un passe-bas pur est dangereux, car une impulsion courte n'est pas toujours une erreur.
- [Analyse du signal d'un seul détecteur](#) et détection de **perturbations** : les détecteurs présentent généralement des effets comparables au rebond. Ils sont dus à des remorques ou à des discontinuités électromagnétiques dans l'écho du véhicule. La fréquence de ces rebonds est souvent significativement plus élevée que les intervalles entre les véhicules et les durées d'impulsions des véhicules. Les rebondissements peuvent être filtrés avec des moyens relativement simples mais en perdant des informations détaillées sur les types des véhicules et souvent en perdant les comptages de vélos et motos.

Les perturbations connues doivent être décrites avec précision. Le cas le plus simple est celui des véhicules ferroviaires électriques (trams). Mais les détecteurs qui rebondissent sporadiquement peuvent aussi être dus à des interférences. Pendant le temps perturbé, les détecteurs ne peuvent souvent pas être utilisés pour le comptage. Un détecteur de remplacement doit être utilisé pendant cet intervalle de temps.

- [détecteur double](#) par traitement de signaux de deux détecteurs **près de la ligne d'arrêt**, avant et après la ligne d'arrêt ou à la fois après la ligne d'arrêt : ces deux détecteurs sont généralement calibrés pour différentes sensibilités et ainsi permettent une explication différenciée et l'élimination de phénomènes observés.
- Traitement de **séquences de détection** de deux ou plusieurs détecteurs sur la même trajectoire de conduite, si disponible : cela permet la découverte de signaux induits par trafic opposé ou parallèle ou encore par des deux-roues; de plus, les vélos présentent des phénomènes différents de ceux des motos.
- [Analyse des signaux de détecteurs parallèles](#) en traitant **des voies parallèles** dans le **même sens**; il s'agit d'identifier des motos qui dépassent, des vélos dépassés et des véhicules qui ne choisissent pas correctement leurs voies.
- Traitement des voies parallèles dans la **direction opposée** et des effets de diaphonie qui en résultent
- **Suivi** de véhicules sur plusieurs carrefours dans le but de savoir s'il s'agit d'une voiture, d'un vélo ou d'une moto, si les rebonds sont dus à une remorque, etc. En tant que valeur ajoutée, on peut même estimer une matrice origine-destination qui varie avec le temps [7].
- Aussi une **conduite illégale** peut être reconnue par le prétraitement. La reconnaissance n'est pas toujours claire, car des impulsions erronées peuvent se ressembler. La reconnaissance devient généralement claire en regardant plusieurs détecteurs et en connaissant l'état des groupes de feux, en identifiant
 - **Un passage au feu rouge**, reconnu par les deux détecteurs avant et après la ligne d'arrêt,
 - Des **motos** en train de dépasser sur une voie qui n'est pas destinée à leur direction,
 - Ceux qui **évitent** un feu tricolore en choisissant une voie différente,
 - Un vélo qui emprunte un passage piéton ou le trottoir.

Le rapport de recherche discute des procédures et développe une base pour la détection automatique.

Précision de comptage déterminée

Les valeurs de comptage brutes et corrigées d'une approche typique d'un carrefour sont utilisées à titre d'exemple. Un véhicule passe sur les détecteurs utilisables suivants lors de l'approche de la ligne d'arrêt :

- « 3 » pour le premier appel
- « 1 » devant la ligne d'arrêt pour les véhicules à moteur
- « V » devant la ligne d'arrêt pour les vélos
- « R » après la ligne d'arrêt (« détecteur de feu rouge »)

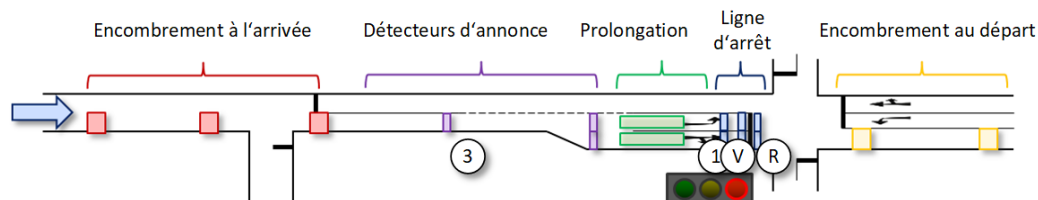


Fig. 11 Les détecteurs les plus importants et leurs rôles lors d'une approche

Un comportement de détection suivant peut être constaté :

- Seul le détecteur « V » détecte les vélos (V)
- Tous les détecteurs détectent les véhicules à moteur (VM) et également les motos (M), mais la détection des motos est souvent peu fiable

Le prétraitement des mesures selon « [Analyse du signal d'un seul détecteur](#) » (voir plus loin) réalise les améliorations suivantes :

- Aucun des détecteurs ne peut plus détecter les motos.

Ceci est dû au comportement de conduite des motos et en particulier à la distance conservée dans les pelotons lents ou qui accélèrent, qui s'apparente à une détection de remorque.

Un résultat typique de l'analyse de qualité de comptages avec des détecteurs de carrefours est montré dans le tableau suivant. Les étoiles sont attribuées selon [Tab. 10](#) :

Détecteur	Catégories de véhicules détectées		Déviation par rapport aux comptages manuels		Autres classes	
	Non corrigé	Corrigé	Non corrigé	Corrigé	V	M
3	VM et M	VM	** < 8 %	** < 6 %		
1	VM et M	VM	**** < 1 %	**** < 1 %		< 17 %
V	VM, M et V	VM et V	**** < 2 %	**** < 1 %	** < 7 %	
R	VM et M	VM	**** < 2 %	**** ≈ 0%		

Tab. 12 Précisions typiques de comptage des détecteurs lors d'une approche

Les autres catégories de véhicules ne peuvent pas être déterminées sans une calibration additionnelle et l'utilisation de détecteurs doubles.

Vélos et motos

Le détecteur corrigé « R » compte les véhicules à moteur quasi parfaitement, comme on peut le voir dans le tableau [Tab. 12](#), mais plus de vélos ou de motos. Il peut donc être utilisé comme référence pour les autres détecteurs de l'approche.

- En plus des véhicules à moteur, détecteur « V » compte également des **vélos**. La différence calculée conduit au taux d'erreur déterminé expérimentalement de **-7 %**.
- Détecteur « 1 » non corrigé compte la somme des véhicules à moteur et des **motos** avec la plus grande précision. La différence calculée avec le nombre de véhicules à moteur conduit à un taux d'erreur déterminé expérimentalement de **-17 %**, ce qui, cependant, est en dehors de la précision tolérée.

Principaux résultats

Mesures de qualité assurée

Le rapport de recherche développe un procédé de calcul de **comptages de véhicules avec des valeurs de confiance** pour des mesures effectuées par détecteurs armoire. Un taux d'erreur < 1 % est possible, < 2 % est courant et < 5 % est réalisable dans la plupart des cas. Cela permettra l'utilisation systématique de détecteurs armoire comme stations de comptage supplémentaires à l'avenir, dans toute la Suisse et dans l'échange international de données. Les résultats permettent des statistiques de comptage de qualité garantie.

Afin d'atteindre cette précision, les signaux des détecteurs doivent être prétraités dans la plupart des cas. Les classes de véhicules ne sont pas détectées.

Sur cette base des **conditions de circulation** peuvent être calculées sur des détecteurs individuels et doubles en fonction de la vitesse de passage. Ces données peuvent être transformées en informations statistiques sur **les heures (durées) d'encombrement**.

Dans le cas de plusieurs détecteurs à qualité garantie lors d'une approche, une **longueur d'encombrement** discrétisée peut être déterminée.

De même, les **temps de déplacement** et les **temps perdus** peuvent être estimés [11], ainsi que le **nombre d'arrêts** avant de passer le carrefour.

Compréhension

La recherche permet de comprendre de nombreux **phénomènes de détection** à la base des données de mesure. Pour trouver l'explication, des enregistrements vidéo sont utilisés. Très peu de cas doivent être considérés comme des « troubles spontanés ». Le projet montre comment les phénomènes **peuvent être reconnus** et comment les perturbations causées par eux peuvent être **éliminées**. Le projet de recherche crée également les bases de l'**automatisation** de la détection et de l'amélioration des données.

Application

Dans des recommandations de mise en œuvre, la recherche présente des étapes qui permettent de sélectionner les détecteurs armoire pour le comptage et de surveiller la qualité fournie, voir, dans le meilleur des cas, de les améliorer.

Les mesures de détection de qualité garantie permettent non seulement de calculer des comptages mais également d'autres mesures utiles. L'état de trafic, les heures d'encombrement et le temps de voyage ont été mentionnés. À l'avenir cependant, il est également envisageable de calculer et de surveiller d'autres variables comme le **temps requis par véhicule** et donc la **capacité du carrefour**, les temps **verts optimum**, les **ruptures de coordination** et même des **matrices origine destination** observées [7].

Avantages

- L'augmentation de la précision de comptage aide les ingénieurs de trafic à obtenir des **valeurs de planification plus précises** avec un niveau de granularité plus élevé.
- Les heures d'encombrement, la longueur des encombrements, la vitesse et les temps de trajet sont intéressants en tant que **valeurs statistiques**, valeurs qui, jusqu'à présent, ne sont que peu disponibles dans des centres ville.

Enfin il est pensable que, après la mise en œuvre dans la pratique, ces valeurs peuvent également être disponibles en ligne (via OCIT-I PD, OCIT-C ou bien DATEX II).

- D'une part cela peut conduire à une meilleure **compréhension des processus dans le trafic** et peut directement contribuer à **améliorer** la régulation de carrefour comme la gestion du trafic.
- D'autre part, cela peut être utilisé directement à des fins de **régulation**.

Ainsi il faut s'attendre à un effet à long terme de ce projet de recherche qui servira à la compréhension et à l'amélioration de la fluidité du trafic.

Types d'erreurs

Le taux d'erreur de la précision de comptage réalisable est très souvent inférieur à 15 % et atteint des valeurs inférieures à 2 %. Par prétraitement, l'erreur peut même être inférieure à 1 %.

Un détecteur doit passer une série de tests, d'abord avant que le détecteur ne soit même approuvé pour le comptage, puis plus tard lors du comptage en cours de fonctionnement. Des examens périodiques de la précision du détecteur sont recommandés.

Un détecteur doit réussir les tests suivants :

- **Erreurs techniques** : Le contrôle des erreurs techniques garantit une plausibilité de base. La plausibilité est la mieux représentée dans l'enregistrement d'un plan de feux avec les détecteurs associés :

- Les détections correspondent aux états du groupe de feux le **plus proche**.
- Le **comportement statistique** correspond à celui du trafic automobile (temps d'occupation et créneaux plausibles).
- Les détections correspondent aux **détections environnantes**.

Les raisons des erreurs techniques peuvent inclure les suivantes :

- Numéros de canal échangés entre deux détecteurs
- Unité d'évaluation défectueuse d'un détecteur ou détecteur lui-même défectueux
- **Erreurs sporadiques** : les détecteurs peuvent délivrer de manière irrégulière des valeurs invraisemblables pendant le fonctionnement pour les raisons suivantes :
 - **Couplage** électromagnétique par les véhicules sur les détecteurs et dans leur voisinage immédiat – ou interférence optique
 - Couplage électromagnétique par **des véhicules ferroviaires électriques** (trams)
 - Réajustement automatique des détecteurs [\[8\]](#), conduisant à une oscillation temporaire ou une occupation continue soudaine
- **Erreurs systématiques induites par la technologie** : les détecteurs peuvent montrer à plusieurs reprises les mêmes phénomènes lorsqu'ils sont en fonctionnement :
 - **Non-détection** de certains véhicules appartenant à certains types
 - **Rebondissement** au début ou à la fin d'une impulsion ou d'un temps d'occupation ou oscillation spontanée pendant une occupation continue [\[1\]](#)
 - Impulsions **erronées** qui ne peuvent pas être expliquées
- **Erreurs systématiques induites par le trafic** : l'affectation d'une mesure à une trajectoire de véhicule est incertaine, par exemple dans les cas suivants :
 - Diaphonie par le trafic en **sens inverse** ou sur une voie **parallèle**
 - **Changement de voie**
 - **Dépassement** sur une voie différente (souvent vu avec des motos)
 - Conduite sur voie **imprécise** (par exemple, en dépassant un vélo)
 - Véhicule qui **coupe** un virage et roule temporairement sur une fausse voie.

En fonction de l'emplacement et de l'équipement technique des détecteurs, les erreurs sporadiques, systématiques ou induites par le trafic peuvent ne pas se produire du tout ou être très dominantes. Le mélange de fréquences des différentes erreurs détermine la précision du comptage.

Le **détecteur double**, souvent situé avant et après la ligne d'arrêt, joue un rôle important. Il permet une visualisation redondante des données de mesure sur une courte distance, facilitant ainsi la détection des phénomènes.

Analyse du signal d'un seul détecteur

Les détecteurs individuels montrent des rebonds et d'autres oscillations irrégulières dans le signal supposé constant comme des perturbations indésirables. Les détecteurs individuels détectent également régulièrement les remorques ou les cabines des camions comme des signaux individuels. Si seul le nombre de véhicules doit être compté, sans reconnaître les remorques ou sans classification, les détections multiples sont perturbatrices et doivent être supprimées. Ceci peut être réalisé en prétraitant le signal brut.

La figure suivante montre une séquence de détection typique pour un seul détecteur. La résolution temporelle dans la direction horizontale est généralement de 0,1 s, mais elle peut également être plus précise. Les seules valeurs dans le sens vertical sont 0 pour « non occupé » et 1 pour « occupé ».

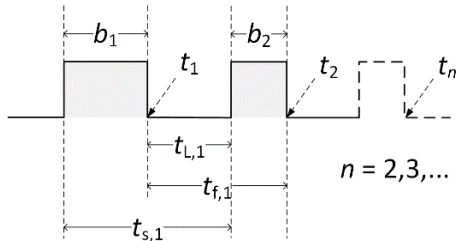


Fig. 13 Signal mesuré pour un seul détecteur

- b_n est le temps d'occupation.
- n est utilisé pour numéroter les impulsions consécutives, en commençant par 1.
- t_n est le temps du front descendant de l'impulsion n .
- $t_{L,1}$ est le créneau intervéhiculaire net entre la première et la seconde impulsion.
- $t_{f,1}$ est le créneau intervéhiculaire brut entre la première et la seconde impulsion, mesuré entre les fronts descendants; il n'est finalement pas utilisé.
- $t_{s,1}$ est le créneau intervéhiculaire brut entre la première et la deuxième impulsion, mesuré entre les fronts montants; il n'est finalement pas utilisé.

Les effets suivants peuvent être reconnus dans le signal brut d'un détecteur :

- Si un détecteur oscille, généralement t_L est $\leq 0,1$ s pour toutes les impulsions 1 à n .
- Pour les remorques, les cabines de conduite ou les tracteurs de semi-remorques, il existe généralement un intervalle de temps net t_L de $\leq 0,6$ s et dans la plupart des cas $> 0,1$ s.
- n vaut généralement 2 pour les camions avec remorques, 3 est souvent vu pour les semi-remorques.

Si seul le nombre total de véhicules doit être amélioré sans reconnaissance de la classe de véhicule, tous les rebonds, oscillations et remorque détectées peuvent être ignorés en filtrant simplement le signal brut :

- On supprime les créneaux intervéhiculaires nets jusqu'à ce qu'ils soient à nouveau de $t_L > 0.6$ s
- Si le rebondissement doit encore être détecté, il faut faire attention aux créneaux intervéhiculaires nets courts : si $t_L \leq 0,1$ s et $n = 2$, alors il s'agit d'un rebondissement.
- Si $n > 3$, il s'agit d'une perturbation

Pour les algorithmes de prétraitement du signal, il s'ensuit que les fronts montants peuvent être transmis immédiatement. Les fronts descendants doivent d'abord être vérifiés pour les créneaux intervéhiculaires nets et ne peuvent être transmis que lorsque la plus grande durée d'un créneau intervéhiculaire net prévu a été dépassée.

Analyse des signaux de détecteurs doubles

Dans le cas de deux détecteurs successifs à courte distance, les deux détecteurs peuvent être traités ensemble de manière algorithmique comme un détecteur double. Habituellement, les détecteurs doubles sont utilisés sur des lieux dédiés au comptage exact, pour déterminer la classe de véhicule et pour mesurer la vitesse, comme c'est le cas avec les stations de comptage traditionnelles. Dans le contexte des détecteurs armoire doubles, les détecteurs peuvent souvent être trouvés « ad hoc », à savoir qu'ils ne sont pas conçus comme détecteurs doubles mais ils se trouvent juste avant et juste après une ligne d'arrêt.

Les détecteurs doubles sont si proches l'un de l'autre qu'il peut s'y trouver un maximum de deux véhicules, un sur le premier détecteur et un sur le second. Le cas où les détecteurs sont si éloignés l'un de l'autre qu'il peut y avoir un véhicule supplémentaire entre eux ne sera pas inclus dans le concept de détecteur double.

Il a été montré que les détecteurs doubles ad hoc ne peuvent pas être utilisés de la même manière que les détecteurs doubles dédiés aux stations de comptage. Les propriétés magnétiques ou optiques sont souvent inconnues, conduisant à une sensibilité différente. En outre, la conception géométrique est souvent différente – par exemple, les vélos en bordure de trottoir sont souvent détectés avant la ligne d'arrêt mais pas après la ligne d'arrêt.

Les détecteurs doubles conviennent principalement à la détermination et à la correction des erreurs de comptage. Deuxièmement, la vitesse peut être déterminée avec une assez bonne précision. Troisièmement, on peut tenter de déterminer les types et les classes de véhicules. Ceci est possible en raison de sensibilités différentes (les deux-roues ne sont pas détectés par l'un des détecteurs) ou par évaluation de la longueur d'impulsion en fonction de la vitesse dérivée, de sorte qu'il est possible d'estimer la longueur du véhicule. Cela est souvent difficile car les échos magnétiques ou optiques du véhicule ne permettent pas de tirer des conclusions systématiques sur leur longueur.

La figure suivante montre schématiquement les paramètres mesurables de deux détecteurs consécutifs.

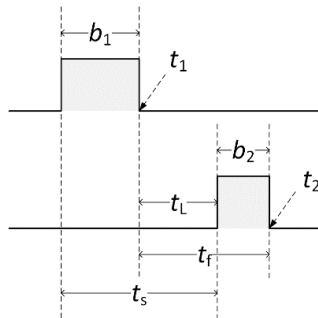


Fig. 14 Signaux mesurés provenant d'un détecteur double

- Le 1^{er} temps d'occupation b_1 est mesuré par le 1^{er} détecteur.
- Le 2^{ème} temps d'occupation b_2 est mesuré par le 2^{ème} détecteur.
- Entre les deux temps d'occupation se trouve un créneau intervéhiculaire. Sa valeur est généralement positive mais elle peut aussi être négative si la distance entre les détecteurs est courte ou si les véhicules sont longs.
- Les fronts descendants t_1 et t_2 sont utilisés comme temps de référence. Cela permet également une évaluation lorsque le trafic démarre après le rouge. Ce n'est qu'en cas d'encombrement sur le 2^{ème} détecteur que l'évaluation n'est pas possible.
- Le temps de parcours t est déterminé entre les deux fronts descendants.
- Pour une bonne exhaustivité, il y a aussi un temps de parcours t_s entre les deux fronts montants mais il n'est pas utilisé ici.

Analyse des signaux de détecteurs parallèles

Les détecteurs sont attribués aux voies. Il arrive cependant que les détecteurs détectent également les véhicules dans une voie adjacente. Cela peut être déclenché par le trafic en sens inverse ou par le trafic circulant sur une voie parallèle. Lorsqu'un véhicule d'une autre voie est détecté, nous appelons cela une « diaphonie ». La diaphonie peut conduire à des erreurs de comptage et à de fausses conclusions.

S'il y a également un détecteur dans la voie d'où la diaphonie arrive, à la même position ou non loin de celle-ci, la diaphonie peut être détectée en observant la séquence temporelle des signaux des deux détecteurs.

La figure suivante montre une vue généralisée sur les signaux d'occupation mesurés par les deux détecteurs situés l'un à côté de l'autre. Le véhicule roule sur la voie de gauche et est également détecté par le détecteur sur la voie de droite.

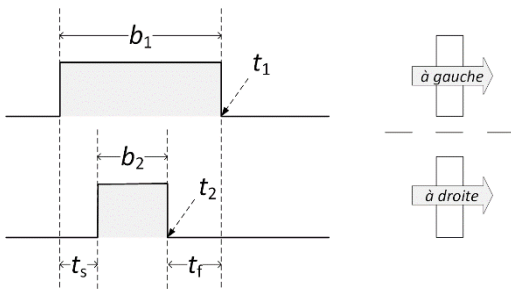


Fig. 15 Signaux mesurés de deux détecteurs en parallèle

- Le temps d'occupation à gauche b_1 est mesuré par le 1^{er} détecteur.
- Le temps d'occupation à droite b_2 est mesuré par le 2^{ème} détecteur.
- Les fronts descendants t_1 et t_2 sont pris comme temps de référence.
- La différence de temps entre les deux fronts montants est représentée par t_s .
- La différence de temps entre les deux fronts descendants est représentée par t_f .

Dans l'illustration, pour mesurer des temps t_s et t_f , il est supposé que l'impulsion de la voie de droite réside entièrement dans l'impulsion de la voie de gauche. Si ce n'est pas le cas, les temps peuvent être négatifs.

Si les détecteurs ne sont pas à la même position de voie, un temps de décalage t_0 est introduit qui prend en compte le temps de trajet entre les deux détecteurs. En conséquence, les variables précédemment introduites peuvent continuer à être utilisées, sauf bien entendu t_2 .

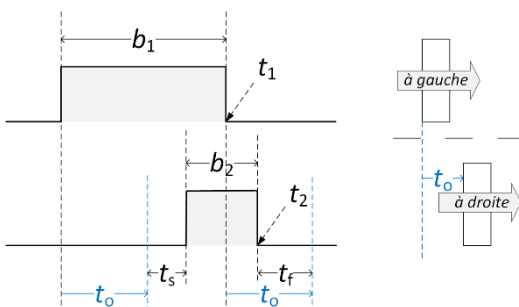


Fig. 16 Signaux mesurés de deux détecteurs en parallèle, légèrement décalés

Autres résultats

La collecte de données de trafic ne se limite pas aux comptages.

Bien que ce rapport se concentre sur le comptage, les signaux de détecteurs à qualité garantie peuvent être utilisés pour bien plus de mesures, comme les suivantes :

Comportement de démarrage sur un seul détecteur

A titre d'exemple, la [Fig. 17](#) montre le créneau intervéhiculaire brut moyen des véhicules s'éloignant après le rouge sur trois voies parallèles, spécifiquement en fonction de la position dans la file d'attente devant le feu rouge.

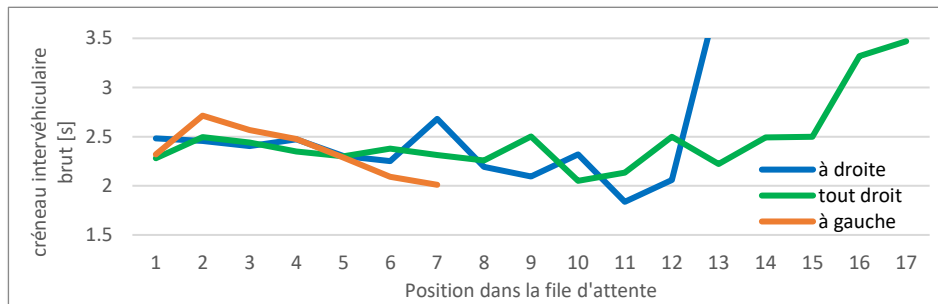


Fig. 17 Comportement de démarrage dans une approche exemple

L'observation du comportement de démarrage à la ligne d'arrêt permet de calculer la moyenne de **temps requis** par véhicule qui peut être comparé avec le **temps vert offert** et **utilisé**. De même, les capacités de l'approche et du carrefour peuvent être calculées et les mesures d'intervalles intervéhiculaires peuvent être comparées à celles utilisées pour le développement de la régulation du carrefour.

Détection d'encombrement et circulation lente par un seul détecteur

Des détecteurs de prolongation (voir [Fig. 11](#)) ou des détecteurs d'encombrement spéciaux (un peu plus longs que les détecteurs de comptage) sont normalement utilisés pour la détection des encombrements et pour une circulation lente. La plupart des détecteurs sont cependant trop courts pour cette tâche car le trafic aurait pu s'arrêter, de telle sorte que le détecteur se trouve dans l'écart entre deux véhicules à l'arrêt.

Les informations de temps d'occupation d'un détecteur peuvent être traitées pour découvrir des changements de vitesse afin de détecter une tendance d'encombrement et enfin l'encombrement même [4] : s'il y a des détecteurs en nombre suffisant sur une approche, une **longueur de file discrète** peut être calculée. Si les états du groupe de feux aval sont également connus, une **perte de temps** actuelle peut être calculée et le **nombre d'arrêts** peut être estimé sur la base du nombre de cycles qu'un véhicule passe dans l'approche.

Détection de la vitesse par un détecteur double

Les détecteurs doubles permettent de mesurer la **vitesse** et la celle-ci peut être utilisée pour déterminer un état de circulation comme fluide, tendance à la congestion et encombré. Étant donné que les détecteurs doubles se trouvent principalement autour de la ligne d'arrêt, ils permettent de calculer une qualité du trafic **sortant** et un **blocage** possible du carrefour.

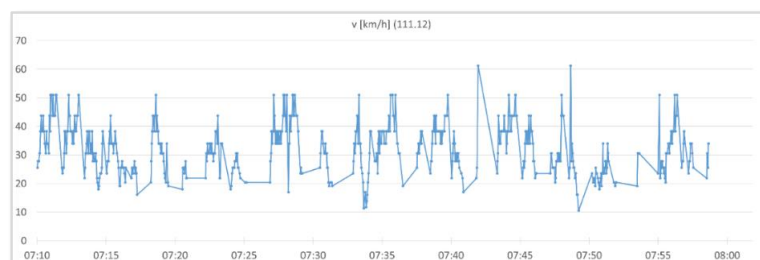


Fig. 18 Vitesse sur une boucle double

Summary

This research report examines how precisely **vehicles** can be **counted** by detectors that have been built for **traffic-actuated control** of intersections, so called “intersection detectors”, and not with the original intention to count vehicles. The detector measurements are available as **raw data** consisting of rising and falling slopes of an occupancy signal every tenth of a second. Most of the detectors examined are inductive loops, with some video detectors. The report focuses on **motor vehicles**. In addition, some identification possibilities for motorcycles and bicycles and differentiations between trucks and cars are shown.

Yes, one can count quite accurately with such detectors! One cannot count with all detectors, and one cannot count equally well with all of them.

The report therefore develops guidelines

- How to **select** the detectors,
- How to monitor **accuracy** of the measurements, and
- How to preprocess measurements in order to **increase** counting accuracy.

Hence a counting accuracy with errors of less than 1 % can be achieved.

The report concludes with the question of what other useful values can be calculated from such quality-assured detector data. The existing, road operator owned detectors will probably never be replaced completely by V2X technologies, so it is worth going into depth.

Counting

What intersection detector can count correctly? What counting accuracy can be achieved? What is the procedure for achieving the best possible counting accuracy?

Accuracy

There is no such thing as a correctly measuring detector and thus correctly counting detector per se. All measurements from intersection detectors can be subject to errors. How can one discover and quantify detector errors? And how can they be corrected?

For technical realization purposes it must be possible to recognize and correct the errors by **observing them in the system itself**. To do so, often measurements of surrounding detectors are added to the measurements of the considered detector itself. External video recordings are used in this research report for validation purposes only.

Independence

The findings are largely independent of the detection technology. Technology should not play a role in any preprocessing of measurement data.

Additional benefits

Quality-assured detector measurements have high added value for **traffic model parameter** determination and monitoring, such as the **headway, driving behavior** or **origin destination relations**, but also for the determination of control relevant values as **queue lengths** and **time loss**. They can also very well be combined with measurements from other systems (“**data fusion**”).

Statistical requirements

For national statistics or international comparisons, count values - and generally all measured values - must meet the following three criteria:

- **Comparability**: The measurements must be comparable with one another.
- **Continuity**: The measurements must be comparable over time.
- **Quality**: The measurements must meet quantifiable quality requirements.

This research report describes procedures to ensure the requirements.

Counting accuracy definition

Counting accuracy or counting quality can be expressed by the following metric using different numbers of stars⁴:

Quality	*	**	***	****
Error	< 15 %	< 10 %	< 5 %	< 2 %

Tab. 19 Quality classes for traffic measurements

The prerequisite for using a detector is that there are no technical errors, see chapter “[Error types](#)” later on.

Periodic reviews are recommended. Detector technology for such tests should not matter. It has also been shown that the behavior of the predominantly used induction loops does not differ much from video sensors with regard to the types of detection errors.

Crosstalk, bouncing, vehicle skipping can be corrected by changing detector sensitivity depending on the placement. More cost-intensive remedies can also be provided by moving a detector, changing its shape or even installing a double detector with directional sensitivity. The report does not go into this further, especially since in most cases a system for counting vehicles is only a "guest" at existing detectors, and a change in the existing detectors could possibly no longer allow them to perform their intended (control) task correctly.

Counting accuracy determination

Within the observed system, counting accuracy can only be determined when in comparison with other detectors located on the same driving trajectory. Comparing with hand counting is of course an off-line possibility, which was carried out for this report on the basis of video recordings. Comparisons can also be made with counters outside the system. This has been executed at one place, with a good quality confirmation for the external counters and a rather good accordance with the observed system detector counts. Ideally, there are at least three detectors on one driving trajectory:

- There should be found a **cumulation** of counts where at least two detectors roughly agree.
- In **stalemate** situations (the detectors agree in pairs on the count value, but there is no clear majority), only a look at the recorded signal timing plan can help, where sporadic, systematic or traffic-induced errors can be identified.
- The smaller the **sheaf** of curves that have been identified as correct, the better the counting accuracy.

In case of a detector sequence, it is obvious to choose the detector for counting which has the highest counting accuracy. The following accompanying measures are recommended for eventual disruptions in case of sufficient detector redundancy:

- Provide at least one **replacement detector** out of the same sheaf if the originally chosen detector should fail, if it malfunctions for a short time, or if its behavior becomes suspicious.
- If not available, try to derive enough information from adjacent detectors in the same approach to temporarily replace at least the counts.
- In addition, or if not available otherwise, provide replacement detectors whose counting differences to the originally chosen detector can be statistically described, either by a constant offset, or a proportionality factor, or by a **deviation curve** [8].

This is to ensure that a failure of a detector does not lead to a failure of the statistics.

⁴ Framework Guidelines for Data and Service Quality Requirements. EIP Sub-Activity 3.2. Data and Service Quality Requirements for (Real-Time) Traffic Information incl. Road Safety Related Traffic Information

Counting accuracy increase

It is desirable to be able to count as accurately as possible. There are a number of methods that can be used to increase accuracy. They all assume preprocessing of the raw detector signal before conversion into count values. Preprocessing types are listed in ascending complexity.

- Correction with a **low-pass** filter: The raw signal from the detector is sent through a low-pass filter. A low pass suppresses high frequencies, i.e., short pulses and short gaps. This eliminates bouncing signals and detections from two-wheelers. However, using a pure low pass is dangerous, because a short pulse is not always a mistake.
- **Single detector signal analysis** and **fault** detection: All detectors can show effects that can be compared to bouncing. They are due to trailers or electromagnetic discontinuities in the vehicle echo. The frequency of such bouncing is often significantly higher than the gap durations between vehicles and the pulse durations of vehicles. Bouncing can be filtered out with relatively simple means, but by losing detailed information about vehicles types and often also losing bicycle and motorcycle counts.

Most of the known faults can be described precisely. The easiest case is electric (light) rail vehicles induction. But sporadic detector bouncing can also be due to interferences. During the disturbed time, detectors often cannot be used for counting at all. A replacement detector should be used during such periods.

- **Double detector signal analysis** by processing signals of double detectors **close** to the **stop line**, before and after the stop line or both after the stop line: these two detectors are usually calibrated to different sensitivities and thus enable a differentiated explanation and elimination of observed phenomena.
- Treatment of **detection sequences** from two or more detectors on the same driving trajectory, if available: this enables the discovery of induced signals by opposite or parallel traffic, and of two-wheelers; in addition, bicycles show different phenomena than motorcycles.
- **Parallel detector signal analysis** by treating **parallel lanes** in the **same direction**; this is to identify overtaking motorcycles, overtaken bicycles and uncertain lane choices.
- Treatment of parallel lanes in **opposite direction** and the resulting crosstalk-like effects
- **Tracking** vehicles over several intersections with the aim of finding out whether it is a real motor vehicle, whether it is a bicycle or a motorcycle, whether measured bouncers are due to a trailer, etc. A time-variant origin destination matrix can be estimated as an additional benefit [7].
- Some **illegal driving** can also be recognized by preprocessing. Its recognition is not always clear, as erroneous pulses may look alike. Recognition usually becomes clear by looking at several detectors and knowing the state of the signal groups, identifying
 - **red light drivers**, recognized by the two detectors before and after the stop line,
 - overtaking **motorcycles** on a wrong turning lane can possibly be tracked,
 - **avoiding** a traffic light by choosing a different lane,
 - driving on the pedestrian crossing or the sidewalk with a bicycle.

The research report discusses procedures and develops a basis for automatic detection.

Determined counting accuracy

The raw and corrected count values of a typical intersection approach are used as an example. A vehicle runs over the following usable detectors on the way to the stop line:

- "3" for first calling
- "1" in front of the stop line for motor vehicles
- "B" in front of the stop line for bicycles
- "R" after the stop line ("red light detector")

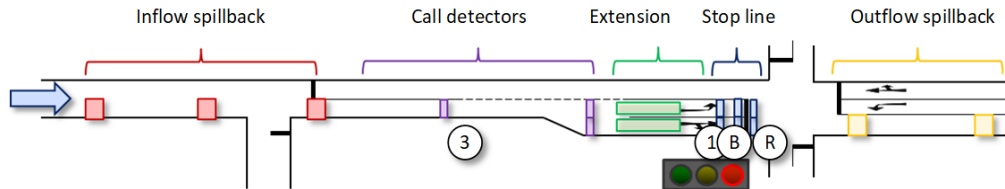


Fig. 20 Most important detectors and its roles in a driveway

The following detection behavior can be found:

- Only detector «B» detects bicycles (B)
- All detectors detect motor vehicles (MV) and also motorcycles (MC), but motorcycle detection is often unreliable

Measurement preprocessing according to the [“Single detector signal analysis”](#) (see later) achieves the following improvements or changes:

- None of the detectors can detect motorcycles anymore.

This is due to the driving behavior of motorcycles and in particular to the headways kept in starting or slow-moving platoons, which is similar to a trailer detection.

The result is the following typical quality analysis of counting possibilities with intersection detectors. The stars are awarded according to [Tab. 19](#):

Detector	Recognized vehicle classes		Deviation from hand counting:		Other classes	
	uncorrected	corrected	uncorrected	corrected	B	MC
3	MV and MC	MV	** < 8 %	** < 6 %		
1	MV and MC	MV	**** < 1 %	**** < 1 %		< 17 %
B	MV, MC and B	MV and B	**** < 2 %	**** < 1 %	** < 7 %	
R	MV and MC	MV	**** < 2 %	**** ≈ 0%		

Tab. 21 Typical counting precisions of detectors in a driveway

Other vehicle classes cannot be recognized without additional calibration effort on double detectors.

Bicycles and motorcycles

The corrected detector R counts motor vehicles almost correctly, as can be seen in [Tab. 21](#), but no longer any bicycles or motorcycles. It can therefore be used as a reference for the other detectors in the approach.

- In addition to motor vehicles, detector B also counts **bicycles**. The calculated difference leads to the experimentally determined error rate of **-7 %**.
- Uncorrected detector 1 counts the sum of motor vehicles and **motorcycles** with highest accuracy. The calculated difference to the number of motor vehicles leads to an experimentally determined error rate of **-17 %**, which, however, is outside tolerated accuracy.

Main findings

Quality assured measurements

The research report develops a method for measuring and calculating **vehicle counts with confidence values** for measurements by intersection detectors. An error rate of < 1 % is possible, < 2 % is common and < 5 % is achievable in most cases.

This enables a systematic use of intersection detectors as additional counting stations in the future, throughout Switzerland and in international data exchange. The results enable quality-assured count statistics.

In order to achieve this accuracy, the detector signals have to be preprocessed in most cases. Vehicle classes are not detected.

On the basis of such quality-assured detector inputs, **traffic conditions** on single and double detectors can be calculated based on a calculated drive-over speed. This data may be transformed in statistical information about **traffic congestion hours** (durations).

In case of several quality assured detectors in an approach, a discretized **congestion length** can be determined.

Likewise, **travel times** and **time losses** can be estimated [11], as well as the **number of stops** until passing the intersection.

Comprehension

The research report helps to understand many **detection phenomena** in and on the basis of the measurement data. It uses video recordings for explanation. Very few cases have to be dismissed as "spontaneous disturbances". It shows a way how the phenomena **can be recognized** and how the disturbances caused by them can be **eliminated**. The research report also creates the basis for **automating** detection and data improvement.

Application

The research report presents recommended steps for implementation in practice. It helps to choose the right intersection detectors for counting and monitoring the delivered quality, and in the best case how to improve the accuracy.

On the basis of quality-assured detector measurements, not only count values can be calculated, but also other useful parameters. Traffic condition, traffic congestion hours and travel time have been mentioned. In the future, however, it is also conceivable to calculate and monitor other variables, such as average **headway** and thus intersection **capacity**, **optimum green time**, **coordination breaks**, and even an observed time-variant **origin destination matrix** [7].

Benefit

- Increasing detector count accuracy helps traffic engineers achieving **more precise planning** input values with better granularity.
- Traffic congestion hours, traffic congestion lengths, speed and travel times are of interesting **statistical values**, which so far are only sparsely available in intersection areas.

Finally, it is thinkable that after implementation in practice, such values can be made available online (via OCIT-I PD, OCIT-C or also DATEX II).

- On the one hand this can lead to a better **understanding of processes in traffic** and can directly help to **improve** single intersection_control and traffic management,
- On the other hand, it can be used directly for control purposes by **network-wide traffic management**.

Thus, a positive long-term effect of the research is to be expected serving to understand and to improve traffic flow.

Error types

The achievable counting error rate is very often less than 15 % and reaches values of less than 2 %. By preprocessing, the error can even be below 1 %.

A detector must pass a series of tests, initially before the detector is even approved for counting, then later while counting under operation. Periodic detector count precision reviews are recommended.

A detector must pass the following tests:

- **Technical errors:** Checking for technical errors ensures a basic plausibility. Plausibility is best visible in a signal timing plan recording with associated detectors:
 - The detection signals match the states of the **closest signal group**.
 - The **statistical behavior** of detector signals corresponds to that of car traffic (plausible occupancy times and gaps).
 - The detections match the **surrounding detections**.

Reasons for technical errors can include:

- Interchanged channel numbers of two detectors
- Faulty evaluation unit of a detector or faulty detector itself
- **Sporadic errors:** Detectors can irregularly deliver implausible values during operation for the following reasons:
 - Electromagnetic **coupling** by vehicles on the detectors and in their immediate vicinity – or optical interference
 - Electromagnetic coupling by **electric (light) rail vehicles**
 - Automatic detector **readjustment** [8], leading to temporary oscillation or sudden continuous occupation
- **Technology-induced systematic errors:** detectors can repeatedly show the same phenomena when in operation:
 - **Non-detection** of certain vehicles belonging to certain types
 - **Bouncing** at the beginning or at the end of an impulse or an occupancy time or spontaneous oscillation during a continuous occupancy [1]
 - **Erroneous** impulses that cannot be explained
- **Traffic-induced systematic errors:** The assignment of a measurement to a vehicle trajectory is uncertain, for example in the following cases:
 - Crosstalk by traffic in the **opposite direction** or on a **parallel** lane
 - **Lane changes**
 - **Overtaking** on a different lane (often seen with motorcycles)
 - **Inaccurate** lane driving (e.g., while overtaking bicycles)
 - Vehicle **cutting a corner** and thus driving temporarily on a wrong lane

Depending on the location and on the technical equipment of the detectors, the sporadic, systematic or traffic-induced errors may not occur at all or be very dominant. The frequency mix of the different errors determines the counting accuracy.

The **double detector**, often located before and after the stop line, plays an important role. It enables redundant viewing on the measured data over a short distance, thereby facilitating phenomena detection.

Single detector signal analysis

Individual detectors can show bouncing and other irregular oscillation in an assumed constant signal curve as undesirable disturbances. Individual detectors also regularly recognize trailers or driver's cabs of trucks like individual signals. If only the number of vehicles is to be counted without recognizing trailers or vehicle classification, multiple detections are disruptive and must be suppressed. This can be achieved by preprocessing the raw signal.

The following figure shows a typical detection sequence for a single detector. The time resolution in the horizontal direction is typically 0.1 s, but it can also be better. The only values in the vertical direction are 0 for "not occupied" and 1 for "occupied".

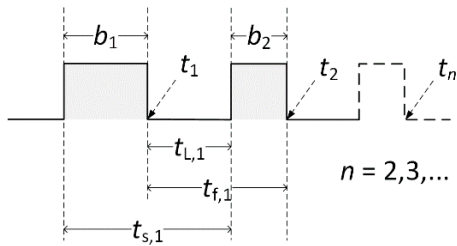


Fig. 22 Measured signal from a single detector

- b_n is the occupancy time.
- n numbers consecutive pulses, starting with 1.
- t_n is the time of the falling slope of the n^{th} pulse.
- $t_{L,1}$ is the net time gap ("left empty") between the first and second pulse.
- $t_{f,1}$ is the gross time gap ("falling") between the first and the second pulse, as measured between the falling slopes, not used here.
- $t_{s,1}$ is the gross time gap ("ascending") between the first and the second pulse, measured between the rising slopes, not used here.

The following effects can be recognized in the raw signal of a detector:

- If a detector oscillates, usually t_L is ≤ 0.1 s for all pulses 1 to n .
- For trailers, driver's cabs or tractor units of semi-trailers, there is usually a net time gap t_L of ≤ 0.6 s and in most cases > 0.1 s.
- n is usually 2 for trucks with trailers, 3 is often seen for semi-trailers.

If only general vehicle counts shall be improved without vehicle class recognition, all bouncing, oscillating and trailer recognition can be skipped by simply filtering the raw signal:

- Suppress net time gaps until t_L reaches again a value of $>$ of 0.6 s.
- If bouncing should still be detected, attention should be paid to short net time gaps: if $t_L \leq 0.1$ s and $n = 2$, then it is bouncing.
- If $n > 3$, there is probably a faulty detection.

For signal preprocessing algorithms it follows that rising slopes can be passed on immediately. Falling slopes must first be checked for net time gaps and may only be passed on when the largest duration of an expected net time gap has been exceeded.

Double detector signal analysis

In case of two successive detectors at short distance, the two detectors can be treated algorithmically together as a double detector. Usually, double detectors are used at dedicated places for exact counting, to determine vehicle classes and to measure speed at a suitable lane position, as it is the case with traditional counting stations. In an intersection detector environment, double detectors can often be found “ad hoc”, i.e., they have not been designed as double detectors, such as just before and just after a stop line.

Double detectors shall be close together with a maximum of two vehicles on them, one on the first detector and one on the second. This shall be assumed here. The case that the detectors are so far apart that there can be an additional vehicle between them shall not be included in this concept of a double detector.

It has been shown that ad hoc double detectors cannot be used in the same way as dedicated double detectors for counting stations. Their magnetic or optical properties are often unknown leading to different sensitivity. Also, often geometric design is different – e.g., bicycles at the curbside are often detected before the stop line but not after the stop line.

Double detectors are primarily suitable for determining and correcting counting errors. Secondly, speed can be determined with quite good precision. Thirdly, an attempt can be made to determine vehicle types and classes. This is possible due to different sensitivities (two-wheelers are only detected on one of the detectors) or via pulse length evaluation as a function of the derived speed, so that the vehicle length can be estimated. Often this is not straight forward, because the magnetic or optical vehicle echoes do not allow systematic conclusions about their length.

The next figure shows schematically the measurable parameters of two consecutive detectors.

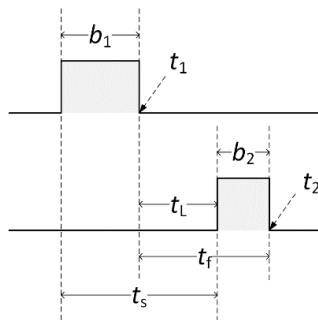


Fig. 23 Measured signals from a double detector

- The 1st occupancy time b_1 is measured by the 1st detector.
- The 2nd occupancy time b_2 is measured by the 2nd detector.
- In between the detector impulses there is a net time gap (“left empty”). This value is usually positive, but it can also be negative if the distance between the detectors is short or if the vehicle is long.
- The falling slopes t_1 and t_2 are taken as reference times. This enables an evaluation as well when traffic is starting after red. Only if there is spillback until the 2nd detector, no evaluation is possible.
- The travel time t_f is determined between the two falling slopes.
- For the sake of completeness, there is also a travel time t_s between the two rising slopes, not used here.

Parallel detector signal analysis

Detectors are assigned to lanes. It happens, however, that detectors also detect vehicles in an adjacent lane. This can be triggered by traffic in the opposite direction or by traffic traveling in a parallel lane. We call this “crosstalk”, when a vehicle from another lane is detected. Crosstalk can lead to counting errors and false conclusions.

If there is also a detector in the lane from where crosstalk arrives, at the same position or not far from it, crosstalk can be detected by observing the detector signal time sequences of the two detectors in one algorithm.

The next figure shows a generalized view of the occupancy signals measured by two detectors located next to each other. The vehicle shall drive in the left lane and is also detected by the detector in the right lane.

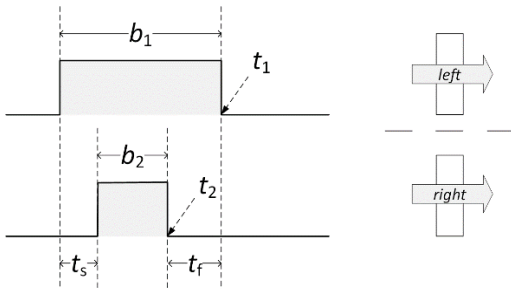


Fig. 24 Measured signals from two parallel detectors located next to each other

- The left, 1st occupancy time b_1 is measured by the 1st detector.
- The right, 2nd occupancy time b_2 is measured by the 2nd detector.
- The falling slopes t_1 and t_2 are taken as reference times.
- The time difference between the two rising slopes is represented by t_s .
- The time difference between the two falling slopes is represented by t_f .

The figure assumes for the measured times t_s and t_f that the pulse of the right lane lies completely within the pulse of the left lane. If this is not the case, the times can become negative.

If the detectors are not at the same lane position, an offset time t_o is introduced which takes into account the travel time between the two detectors. As a consequence, the previously introduced variables can continue to be used, except of course t_2 .

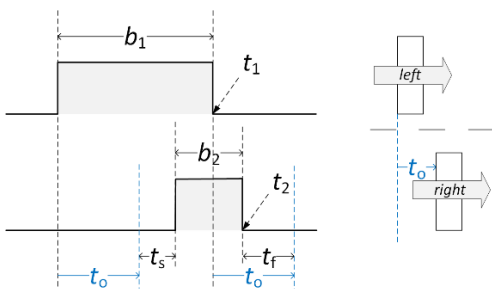


Fig. 25 Measured signals from two neighboring, slightly displaced detectors

Further results

Traffic data collection is not limited to counting.

Even though this report is focusing on counts, input of quality-assured individual detectors can be used for much more additional measurements, e.g.:

Drive-away behavior at a single detector

As an example, [Fig. 26](#) shows the averaged, quality-assured gross time gap (“headway”) of vehicles driving away after red in three parallel lanes, specifically as a function of the waiting queue position in front of the red light.

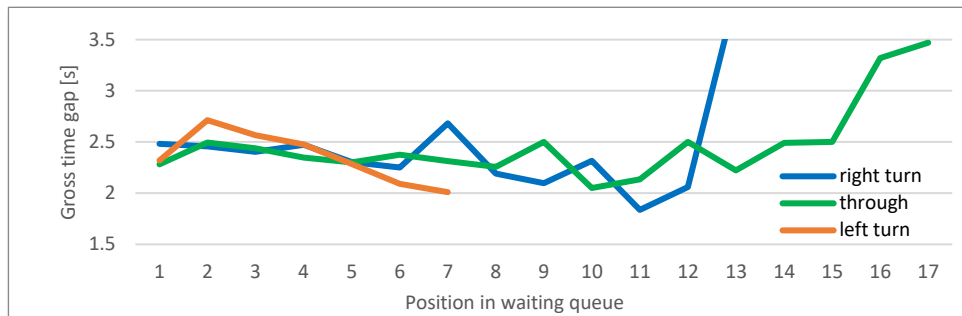


Fig. 26 Drive-away behavior in an example approach

Observing the drive-away behavior at the stop line enables the calculation of the average **time required** by vehicles (average headway) which can be compared with **offered** and **used green time**. Likewise, approach and intersection **capacity** can be calculated, and the measured headways can be compared with those used for intersection control design.

Detection of traffic congestions and slow traffic by a single detector

Extension detectors (see [Fig. 20](#)) or special traffic congestion detectors (a bit longer than counting detectors) are used for detection of traffic congestion and congestion tendency. Most of the detectors, however, are too short for this task because traffic could have stopped in such a way that the detector lies at the gap between two stopped vehicles.

Quality-assured occupancy time information of the detector can be checked for change in speed in order to recognize congestion tendency and finally traffic congestion [\[4\]](#): If there are detectors in sufficient number in an intersection approach, a **discrete queue length** can be calculated. If the state of the downstream signal group is also known, a current **time loss** can be calculated and the **number of stops** can be estimated based on the number of cycles a vehicle spends in the access.

Speed detection by a double detector

Double detectors enable **speed** to be measured, and speed can be used to determine traffic states as fluid, congestion tendency and congested. Since double detectors are mostly found around the stop line, an **outflow** quality and possible **intersection blocking** can be calculated.

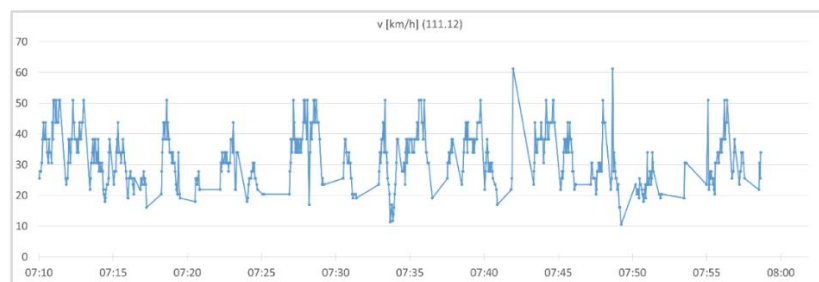


Fig. 27 Speed on a double loop

1 Einleitung

1.1 Erfassung von Fahrzeugen

Mit der Einführung verkehrsabhängiger Lichtsignalanlagen war es nötig geworden, den Verkehr über Detektoren erfassen zu können. In der Schweiz sind schon sehr früh Induktionsschleifen dafür eingesetzt worden. Sie messen die Verstimmung des von ihnen erzeugten elektromagnetischen Feldes durch die Anwesenheit ferromagnetischer Metalle. Induktionsschleifen sind noch heute die dominante Ausprägung von Fahrzeugdetektoren in der Schweiz.

Induktionsschleifen

Jede Induktionsschleife wird von einer so genannten Auswerteeinheit angesteuert. Sie setzt die elektromagnetischen Messungen in die Ausgangssignale «0» und «1» um mit dem Ziel, die Anwesenheit eines Fahrzeuges mit einer «1» anzuzeigen und die Abwesenheit mit einer «0». Auswerteeinheiten müssen auf die angeschlossenen Induktionsschleifen eingestellt werden. Die Empfindlichkeit hängt unter anderem von der meist rechteckigen Fläche der Induktionsschleife ab und von den Anzahl Windungen.

Induktionsschleifen sind Störungen ausgesetzt. Das können schlecht entstörte Elektromotoren sein (in Autos oder Strassenbahnen), die Anwesenheit von viel ferromagnetischem Metall (Weichen) oder elektromagnetische Felder benachbarter Detektoren. Die Auswerteeinheiten sollen diese Effekte so gut wie möglich unterdrücken. Auch Luftfeuchtigkeit und Wetter können einen Einfluss auf das elektromagnetische Verhalten haben. Moderne Auswerteeinheiten können sich selbständig neu kalibrieren.

Andere Technologien

Neben der Induktionsschleife findet man die Videodetektion an zweiter Stelle in der Schweiz [22]. Weitere Technologien wie Ultraschall, Erdmagnetfeld, Infrarot, usw. haben bisher eher experimentellen Charakter und werden hier nicht behandelt.

Zukünftige Technologien

Die Erfassung von Fahrzeugen über ihre Position via GPS und die Übertragung an das Steuergerät findet sich in vielen Forschungsarbeiten und Analysen zu zukünftigen Technologien im Strassenverkehr unter dem Stichwort der **kommunizierenden Fahrzeuge** oder englisch abgekürzt V2X [9]. Auch der Ausdruck von Floating Car Data (FCD) wird in diesem Zusammenhang häufig verwendet. GPS-Positionen sind leider ohne zusätzliche Hilfsmittel heute noch nicht genau genug, um damit die Flanken von Detektoren zu ersetzen [13]. Um die Positionsdaten nutzbringend einsetzen zu können, ist die aktuelle Durchdringungsrate ein Problem: solange nicht alle Fahrzeuge mit V2X ausgerüstet sind, kann man sich auf die Daten nicht als einzige Quelle verlassen, beispielsweise für das Anmelden eines Fahrzeugs bei Rot oder für das Zählen von Fahrzeugen.

1.2 Zusätzliche Erfassung von Verkehr

Im Gegenzug dazu sind solche Daten in der Lage, **streckenbezogene** Daten zu erzeugen und beispielsweise durchschnittliche Reisezeiten zu messen oder Verhältnisse von Quell-Ziel-Beziehungen zu ermitteln. Der Brückenschlag zwischen lückenlosen, ortsfesten Detektordaten und lückenhaften Fahrzeug- und Strecken-orientierten Messungen wird in Zukunft ein wichtiges Thema werden. Das Thema befindet sich aktuell etwas unstrukturiert im thematischen Topf von «Data Fusion» und «Big Data». Es wird auch wichtige Grundlage sein für die Verwendung bei Aufgaben einer «Smart City», wie z.B. die bedarfsabhängige Steuerung der öffentlichen Beleuchtung.

Wer eine solide, kontinuierliche Basis von erfassten Fahrzeugen und daraus errechneten Verkehrs-Messgrössen hat, kann sie durch weitere, lückenhafte Verkehrs-Messwerte anreichern und dadurch verbessern.

In der Schweiz werden die Induktionsschleifen als Detektoren vorerst weiterhin Bestand haben und eine kontinuierliche Basis an Messdaten sein. Die Erforschung ihrer Daten und der Möglichkeiten ihrer Auswertungen ist somit durchaus ein langfristiges Thema und wird es bleiben. Daten von LSA-Detektoren sind heute in der Schweiz allgegenwärtig und können als Grundlage für Ergänzungen durch weitere Messungen verwendet werden, welche beispielsweise von kommunizierenden (FCD, V2I) oder automatisierten Fahrzeugen stammen oder stammen werden.

Darüber hinaus wird in Zukunft auch die Kommunikation **in die Fahrzeuge hinein** immer wichtiger werden, beispielsweise um ihnen eine Verkehrslage zu übermitteln oder auf Phasenwechsel vorzubereiten. Seien die empfangenden Fahrzeuge autonom oder nicht, wichtig wird die Qualität der übertragenen Information sein. Auch deshalb lohnt es sich, aus der bestehenden Infrastruktur – den Induktionsschleifen – das Beste herauszuholen.

Es liegt wohl auf der Hand, dass der Betreiber eines Strassennetzes, welcher für Regelung und Management verantwortlich ist, sich nicht ausschliesslich auf zugekaufte Daten verlassen kann (z.B. von Google, Tomtom) oder Daten, welche von Apparaturen erzeugt werden, welche sich seiner Aufsicht entziehen (z.B. kommunizierende Fahrzeuge, V2I). Der Betreiber wird immer eine eigene, verlässliche, qualitätsgesicherte Infrastruktur verwenden sollen, welche ihm eine Grundlast von Messdaten liefern kann.

Zugekaufte oder zugelieferte Daten können zur **Verbesserung der Qualität** oder zur **Verfeinerung der Messdaten** verwendet werden, wobei auch diese extern eingespeisten Daten einer **Qualitätsprüfung** unterzogen werden müssen – was aber nicht Gegenstand dieses Forschungsberichts sein soll.

1.3 Detektoren und ihre Rollen

Die Regelung oder Steuerung einer verkehrabhängig geregelten Kreuzung kann über eine Menge von Detektoren verfügen, welche ein sich näherndes Fahrzeug überfährt. Auf seiner Fahrt kann ein Fahrzeug die folgenden Detektoren mit zugeordneten Rollen überfahren, siehe dazu auch [Abb. 2](#) in der Zusammenfassung:

- Einen **Staudetektor** oder mehrere Staudetektoren, welche die Rückstaulänge im **Zufluss** zu einer Haltelinie messen können
- Einen **Anmeldedetektor**, welcher das Auto für die Regelung erfasst und es ihr anmeldet. Manchmal liegt der Anmeldedetektor so, dass er es einem sich bei Rot näherndem Fahrzeug ermöglicht, ohne anzuhalten die Kreuzung zu überqueren, da im richtigen Moment Grün gegeben werden kann.
- Einen **Verlängerungsdetektor**, welcher bei Grün darauf achtet, dass so viele Fahrzeuge wie möglich über die Kreuzung gelassen werden, ohne dass zu grosse Lücken zwischen den Fahrzeugen zu ungenutzten Zeiten führen.
- Einen Detektor vor der **Haltelinie**, welcher das Fahrzeug sicher erfasst, sollte es von den vorhergehenden Detektoren nicht erfasst worden sein oder sollten keine vorhergehenden Detektoren vorhanden sein. Velos werden häufig erst an der Haltelinie erfasst, da die Empfindlichkeit des Detektors an der Haltelinie darauf ausgerichtet ist.
- Einen Detektor nach der Haltelinie, auch **Rotfahrer**-Detektor genannt, welcher einfach Fahrzeuge erkennen kann, die bei Rot über die Kreuzung gefahren sind. Über diesen Detektor fährt der Verkehr am flüssigsten, was ihn traditionell zum Zählen des Verkehrs geeignet erscheinen lässt.
- Einen **Staudetektor** oder mehrere Staudetektoren im **Abfluss**, um Rückstau im Abfluss zu detektieren und die Grünzeiten entsprechend zu reduzieren.

1.4 Detektoren und Zählstellen

Detektoren sind rund um Schweizer Kreuzungen omnipräsent und in grosser Fülle vorhanden. Daneben gibt es Detektoren, welche ausschliesslich zum Zählen der Fahrzeuge und zum Ermitteln von Längenklassen gebaut worden sind. Meist bestehen sie aus zwei Induktionsschleifen. Sie werden VDE-Zählstellen genannt für «Verkehrs-Daten-Erfassung». Sie befinden sich häufig zwischen Kreuzungen, idealerweise dort, wo sich der Verkehr selten staut. Sie sind deshalb für die Regelung der Kreuzungen nicht von Interesse und häufig auch an separaten System angeschlossen.

Die Installation einer VDE-Zählstelle ist kostenintensiv und wird eigentlich nur für strategische Messungen durchgeführt. Die statistischen Bedürfnisse der Betreiber von städtischen Strassennetzen legen es aber nahe, mehr Zählstellen verwenden zu können als nur die VDE-Zählstellen. Viele Kantone und Städte verfügen zwischenzeitlich über Systeme, welche die rohen Detektorsignale zentral und zeitnah abrufen können, was für die VDE-Zählstellen schwieriger ist.

Deshalb nutzen aktuell viele Kantone und Städte die Daten von Lichtsignalanlagen bzw. der Sensoren zur Steuerung der LSA auch zur Verkehrsdatenerfassung, vornehmlich zum Zählen der Fahrzeuge und dadurch zur Ermittlung der Belastung. Das Vorgehen, die Auswertung und die Aussagen zum Verkehrsfluss werden aufgrund fehlender Grundlagen, mit Ausnahmen, individuell und auf Erfahrung basierend gemacht.

1.5 Antworten im Forschungsbericht

Der Forschungsbericht liefert Antworten auf die folgenden Fragen:

- Welche der eingangs erwähnten Detektoren und Sensoren eignen sich unter welchen Bedingungen überhaupt und am besten für die Verkehrsdatenerfassung an LSAs? Gibt es eine Abhängigkeit von der verwendeten Technologie (Induktionsschleifen, Video)?
- Wie ist die Qualität dieser Daten, verglichen mit klassischen, ausschliesslich für die Verkehrsdatenerfassung konzipierten Messstellen (VDE-Zählstellen)?

Deshalb beschränkt sich dieser Bericht nicht nur auf den Umgang mit Zählfehlern, welche aus der Beobachtung **einzelner** Detektoren entsteht, sondern versucht auch mit Hilfe der Beobachtung **umliegender** Detektoren, die Phänomene zu verstehen und die daraus folgenden Fehler im besten Fall automatisiert korrigieren zu können:

- Im **schlechtesten Fall** sollte wenigstens die **Zählgenauigkeit** aus der Beobachtung des Detektors selbst und der Beobachtung der umgebenden Detektoren bestimmt werden können.
- Im **besten Fall** soll das Detektorsignal so aufbereitet werden können, dass die **Zählgenauigkeit erhöht** und ein möglichst korrekter Zählwert bestimmt werden kann.
- Das ermöglicht dann die **Verwendung des Detektorsignals** auch für **weitere Berechnungen**.

Zur Verbesserung der Datenqualität müssen die Daten einer **Vorverarbeitung** unterzogen werden, wo sie möglicherweise korrigiert oder anderen Fahrzeugen zugeordnet werden.

Diese Vorverarbeitung nutzt topologische Information über umliegende Detektoren und ihre Messungen, was die einzelne Auswertung häufig nicht wissen kann. Wie üblich in der **Signalverarbeitung**, wird **Redundanz** zur **Erkennung** und dann auch zur **Korrektur** von **Fehlern** verwendet.

Eine Normierung der Berechnungsarten ist anzustreben. Als Resultat der Forschungsarbeit befindet sich im hinteren Teil des Berichts (Kapitel 8) eine [Empfehlung für die Umsetzung in die Praxis](#).

Die Erkenntnisse sind weitestgehend unabhängig von der Detektionstechnologie.

2 Wissenschaftliche Ausgangslage

Die weltweite Forschung konzentriert sich bisher mehr auf die Erfassung von Verkehr als auf die Erfassung von Einzelfahrzeugen. Es ist üblich, mit aggregierten Detektordaten (beispielsweise Zählwerten) zu arbeiten und nicht mit flankengenauen Rohdaten als Aufzeichnungen von Zustandswechselln (ob belegt oder nicht belegt). Das ist historisch-technologisch bedingt, denn Steuergeräte – an welchen die Detektoren üblicherweise angeschlossen sind – haben gerne eine Lebensdauer von 30 Jahren und länger. In den 1990er-Jahren und auch noch in den 2000er-Jahren war ein Aufzeichnen von Rohdaten über einen längeren Zeitraum oder gar das zeitnahe Übertragen dieser Daten an eine Zentrale noch sehr teuer und wurde deshalb nur selten ermöglicht. Häufig werden Detektordaten deshalb in konstanten Intervallen erhoben, wie es bei Zählstellen auf Schnellstrassen üblich ist. Meist wird ein Zählwert erhoben, häufig auch ein mittlerer Belegungsgrad des Detektors. Wo entsprechend ausgerüstet, kann auch eine Geschwindigkeit gemessen werden. Die Intervalle sind typischerweise 60 min, 15 min, 5 min, 3 min, 1 min, 30 s oder 15 s lang.

Intervalldaten ermöglichen nur begrenzt eine Aussage über die Zählgenauigkeit der Detektoren [8]. Sie müssen immer mit Referenzmessungen verglichen werden. Ebenso lassen sie keine Rückschlüsse über Einzelfahrzeuge zu, über einzelne Spurwechsel, detektierten Gegenverkehr, nicht überall gleich gezählte Velos usw.

Aus Mangel an Experimentiermöglichkeit hat sich die Wissenschaft weltweit noch nicht systematisch mit flankengenauen Detektormesswerten auseinander gesetzt. Es besteht also [Forschungsbedarf](#), wenn man Genaueres über Detektoren und ihre Zählgenauigkeit in Erfahrung bringen möchte.

2.1 Stand der Forschung

2.1.1 Intervalldaten

Aus Intervalldaten werden neben Zählstatistiken häufig Fundamentaldiagramme erstellt, anhand welchen der Verkehrsfluss beurteilt werden kann – obwohl eigentlich für kreuzungsfreie Schnellstrassen entwickelt, lassen sich auch gewisse Erkenntnisse für Strassen mit periodisch befohlenen Halten gewinnen [15]. Das Fundamentaldiagramm setzt Zählwert, Fahrzeugdichte und Geschwindigkeit in einen funktionalen Zusammenhang.

Mancher Ansatz wagt sich auch an die Schätzung einer Reisezeit oder auch einer Staulänge [3], [6], [10]. Es gibt viel Literatur darüber. Sie konzentriert sich hauptsächlich auf Schnellstrassen, aber auch Stadtstrassen werden beurteilt, dann häufig nur anhand der Zählwerte und der mittleren Belegungsdauern. Notgedrungen müssen sich die Erkenntnisse auf **mesoskopische** Betrachtungen beschränken, was Aussagen über die Qualität der Messungen anhand der Messdaten selber erschwert. Auch wird häufig die Lichtsignalanlage abstrahiert angenommen als eine Art zyklische Kapazitätsbeschränkung für die Fahrspuren. Das ist in vielen Fällen auch erlaubt, da weltweit die meisten Knotenpunkte nicht verkehrabhängig reagieren können, sondern mit über weite Strecken konstanten Umlaufzeiten und auch ähnlichen Grünzeitverteilungen gesteuert werden.

2.1.2 Rohdaten

International wird, wie schon erwähnt, nicht viel geforscht bezüglich der Analyse von flankengenauen Detektordaten, den so genannten Rohdaten. Unter «flankengenau» versteht man in der Verkehrstechnik üblicherweise eine Auflösung von Zehntelsekunden eines digitalen Signals, welches die Information «belegt» und «nicht belegt» trägt. In den USA sind seit den letzten Jahren ein paar Aktivitäten bezüglich flankengenaue Daten im Gang, welche sich «high resolution detector data» nennen, typische Beispiele sind [12] (Genauigkeit von Zählwerten), [19] (Erkennung von Rotlichtfahrern), [20] (Möglichkeiten mit Detektor-Rohdaten). Steuergeräte mit solchen Messmöglichkeiten sind aber noch in nur sehr kleiner

Zahl vorhanden. Am längsten dazu wird in Deutschland systematisch geforscht. Auch Österreich und die Niederlande verwenden flankengenaue Daten und ein paar weitere, meist europäische Länder, in welchen in den letzten Jahren OCIT-Systeme Einzug gehalten haben.

Im Zwischenbericht [26] wird eine etwas detailliertere Übersicht über die deutsche und die Schweizer Forschung auf diesem Gebiet gegeben. Beispielhaft zu erwähnen sind [5] (Ganglinienvergleiche), [17] (Detektionsfehler über Vergleiche erkennen), [22] (Funktionale Anforderungen an die Detektionsmittel), [18] (Qualitätskriterien), [23] (Vergleich der Detektionstechnologien).

2.1.3 Hinweise zu Detektionstechnologien im Strassenverkehr (Zitate)

Erwähnenswerte Erkenntnisse bezüglich Detektoren und ihrer Zuverlässigkeit sind aktuell in einer Publikation der FGSV aus dem Jahr 2019 zu finden [23]. Wir erlauben uns hier, ein paar Passagen daraus zu zitieren⁵.

aus Kapitel 2.3, Qualitätsaspekte

Die automatische Erfassung der vorliegenden Verkehrssituation mittels Detektoren liefert die notwendige Datenbasis für die **Beschreibung und Bewertung des Verkehrsablaufes**, auf deren Grundlage der Verkehrsregelungsprozess, also der Eingriff in das Verkehrsgeschehen, z.B. über direkte Beeinflussung oder Informationen, stattfindet. Von entscheidender Bedeutung ist hierbei, dass diese erhobene Datenbasis mittels ihrer **Aussagefähigkeit** und **-genauigkeit** in der Lage ist, das betrachtete Verkehrsgeschehen möglichst gut widerzuspiegeln. Voraussetzung für die Verwendbarkeit der Verkehrsdaten muss demnach deren eigene Qualität sein:

Die Qualität der Beeinflussung und der Information des Verkehrsteilnehmers ist in hohem Masse abhängig von der Qualität der erhobenen Verkehrsdaten.

Unter dem Begriff Qualität wird laut der international gültigen DIN EN ISO 9000 Reihe «Qualitätsmanagementsysteme» der Grad, in dem ein Satz inhärenter (dem System inwohnender) Merkmale Anforderungen erfüllt, verstanden. Ein Merkmal stellt in diesem Zusammenhang eine kennzeichnende Eigenschaft dar. Anforderungen wiederum sind Erfordernisse oder Erwartungen, die festgelegt, üblicherweise vorausgesetzt oder verpflichtend sind. Entsprechend müssen erhobene Verkehrsdaten, um als qualitativ hochwertig angesehen zu werden, gewissen **Anforderungen genügen**. Die qualitativen Anforderungen hängen dabei vom vorgesehenen **Anwendungszweck** ab⁶. So erfordern Entscheidungen in der Verkehrs-, Stadt- und Umweltplanung, für betriebliche Massnahmen und für das Strassenbestandsmanagement beispielsweise eine andere Anforderung an die Qualität, als Verkehrsdaten zur Online-Steuerung von Systemen zur Verkehrsbeeinflussung.

Da die Anforderungen mit der spezifischen Anwendung variieren, variiert auch die Qualität in Abhängigkeit des jeweiligen Anwendungsfeldes bzw. Einsatzbereiches.

Die Qualität von Verkehrsdaten, und darüber auch die an ein Verkehrsdatenerfassungssystem gestellten Anforderungen, leiten sich somit aus der konkreten Anwendung ab.

Eine globale Festlegung der erforderlichen Ausprägung eines Systems zur Sicherstellung eines gewissen minimalen Qualitätsstandards ist daher schwer umsetzbar. Gemeinhin werden allerdings folgende Qualitätskriterien im Sinne der Datenqualität vorausgesetzt:

- **Genauigkeit**
Grad der Übereinstimmung zwischen den Daten und einem die Realität widerspiegelnden Bezugsdatensatz

⁵ Die Passagen sind mit Erlaubnis der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesseling Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist

⁶ Anmerkung des Autors: so sind LSA-Detektoren primär für die Regelung des Knotenpunkts ausgelegt worden und müssen entsprechende Qualitätskriterien erfüllen; will man sie zum Zählen von Fahrzeugen verwenden, müssen sie andere Qualitätskriterien erfüllen

- **Vollständigkeit**
Grad der Abdeckung benötigter Kennwerte
- **Zuverlässigkeit**
Funktionsfähigkeit der Detektionstechnologie / des Messsystems unter variierenden Randbedingungen
- **Aktualität**
Grad der zeitlichen Verfügbarkeit, das heisst liegen die Daten zeitnah bzw. rechtzeitig für die betrachtete Anwendung vor
- **Zugänglichkeit / Verwendbarkeit**
Grad des nötigen Aufwands für Einsicht und Weiterverarbeitung der Daten.

⁷ Eng verbunden mit der Frage nach der Qualität der Verkehrsdaten ist die Frage nach der Qualität der Verkehrsdatenerfassung. Die Qualität der Datenerfassung bestimmt entscheidend die Qualität der vorliegenden Daten und somit auch deren Aussagekraft hinsichtlich der Beschreibung des vorliegenden Verkehrsablaufes. Nur wenn die vorhandene **Sensorik** in der Lage ist, selbst **qualitativ hochwertig** zu arbeiten, das heisst die gestellten Anforderungen hinsichtlich ihres Verwendungszweckes zu erfüllen, können qualitativ hochwertige Daten aus der Erfassung resultieren.⁸

aus Kapitel 3.3.2, Lichtsignalsteuerung in Strassennetzen

Verkehrskenngrössen für eine LSA-Netzsteuerung sind:

- Die Anzahl der Kfz je Messintervall q
- Der Detektorbelegungsgrad b [%]
- Die mittlere lokale Geschwindigkeit v und/oder die mittlere streckenbezogene Geschwindigkeit v_s
- Die richtungsabhängige Aufteilung der querschnittsbezogenen Verkehrsstärke q
- Rückstaulängen

Speziell für modellbasierte Verfahren gelten folgende Genauigkeitsanforderungen:

- $\pm 10\%$ -Abweichung bei der Zählung von Kfz, bezogen auf ein 90 s-Intervall
- $\pm 20\%$ -Abweichung bei der Erfassung des Belegungsgrades

Von grundsätzlicher Bedeutung ist es, dass eine sehr hohe Qualität der Stauererkennung (hohe Detektionsrate, niedrige Fehlalarmrate) durch die Verknüpfung von Kenngrössen gewährleistet werden kann.

Bezüglich der Lage der Messstellen gelten, vor allem für die verkehrabhängige Signalprogrammwahl, folgende Vorgaben:

- Messstellen sollten generell nicht in Bereichen mit häufigen Fahrstreifenwechseln liegen,
- Messstellen zur Erfassung der Verkehrsstärke müssen im Bereich frei fliessender Verkehrsströme ausserhalb der unmittelbaren LSA-Beeinflussung liegen,
- Messstellen zur Ermittlung des Belegungsgrades sollten im staugefährdeten Streckenabschnitt liegen, jedoch ausserhalb des Bereiches, in dem während der Sperrzeit normalerweise Fahrzeuge anhalten müssen.

⁷ Anmerkungen des Autors: hier nicht erwähnt, jedoch erwähnenswert, ist die Vergleichbarkeit räumlich oder zeitlich sich unterscheidender Messwerte; wenn der Anspruch besteht, den Zustand eines Verkehrssystem genügend beschreiben zu können, dann ist auch der Abdeckungsgrad durch Messungen ein Qualitätskriterium

⁸ Anmerkung des Autors: durch Redundanz der Sensorik kann man die Qualität des einzelnen Sensors eventuell ein bisschen verbessern; das wird in der vorliegenden Forschungsarbeit vorgeschlagen, nebst der Bestimmung der Qualität der einzelnen Sensoren

2.2 Forschungsbedarf

Viele Entscheide zur Verwendung von Detektoren zum Zählen werden zurzeit aus jahrelanger Erfahrung gefällt. Der zunehmende Verkehr, die besseren technischen Möglichkeiten und auch neue Detektionstechnologien ermöglichen nun aber einen Schritt der **Formalisierung des Wissens** und wohl auch eine Erweiterung der Erkenntnisse.

Induktionsschleifen als Detektoren sind in der Schweiz omnipräsent. Es gibt spezialisierte Detektoren für die Zählung von Verkehr. Aber die allermeisten Detektoren sind für die Regelung von Knotenpunkten gebaut worden und bewähren sich da auch.

Nur: entspricht das, was die Detektoren messen, auch dem Verkehrsablauf über sie? Insbesondere stellen wir uns in diesem Forschungsbericht die Frage, ob die Detektoren die richtige Anzahl Impulse messen und somit zum Zählen von Fahrzeugen verwendet werden dürfen. Es wäre ja verlockend, nicht nur die speziell zum Zählen konstruierten Detektoren dafür verwenden zu müssen, sondern von der Fülle der für regelungstechnische Zwecke verbauten Detektoren profitieren zu können.

Jeder Detektor, welcher zur Regelung eines Knotenpunktes verwendet wird, hat eine **Rolle**, die er wahrnehmen **muss**. Und solange er sie korrekt wahrnimmt, müssen seine Messungen nicht korrekt mit dem Verkehrsablauf übereinstimmen. Ein paar Beispiele, welche alle mindestens zu Zählfehlern führen:

- Ein Verlängerungsdetektor, welcher die «Dilemmazone» vor einer Ampel auf die Anwesenheit von Fahrzeugen überwacht, muss so lange einen mittleren Belegungsgrad über einer festgelegten Schwelle aufweisen, wie noch Verkehr auf die Ampel zurollt. Oder er darf keine Belegungslücke (Nettozeitlücke) über einer gewissen Dauer messen. Dadurch wird die Ampel so lange wie möglich auf Grün gehalten. Die Messungen eines Verlängerungsdetektors dürfen kurze Unterbrüche haben, solange dadurch nicht der mittlere Belegungsgrad beeinträchtigt wird oder eine zu grosse Belegungslücke entsteht.
 - Verlängerungsdetektoren dürfen deshalb schwingen, solange sie belegt sind.
- Ein Anmeldedetektor soll eine Ampel darüber informieren, dass sich ein Fahrzeug auf sie zubewegt, damit der Zufahrt auf diese Anforderung hin Grün erteilt werden kann.
 - Ein Anmeldedetektor darf nachschwingen oder prellen, solange er die Aufgabe des Anmeldens des ersten Fahrzeuges zuverlässig erfüllt.
- Wird ein Rotlichtdetektor (gleich nach der Haltelinie) bei Rot vom Gegenverkehr oder von abbiegendem Verkehr überfahren, oder gar von querenden Fussgängern ausgelöst, dann wird seine Messung der Steuerung meistens nach einer einstellbaren Zeit nach Rot-Beginn nicht mehr weitergeleitet, da unplausibel. Und zählt ein Rotlichtdetektor bei Grün zu viele Fahrzeuge, dann stört das auch nicht weiter, denn seine Aufgabe ist es, Fahrzeuge zu erkennen, welche bei Rot-Beginn oder bei Rot-Ende das Strassenverkehrsgesetz verletzen.
 - Rotlichtdetektoren dürfen sich verzählen.

Es gibt auch Situationen, wo die bestehende Regelung trotz ungenauen Arbeitens der Detektoren stabil arbeitet, aber weniger genau, als eigentlich erhofft:

- Wird ein Anmeldedetektor vom Gegenverkehr oder vom Parallelverkehr überfahren, beispielsweise ein Linksabbieger mit wenig Verkehr, dann wird dabei jedes Mal eine Grünphase angemeldet. Das führt zu Kapazitätseinbussen des Gegenverkehrs, aber nicht zu einer Fehlfunktion der Steuerung.

Häufig sind die LSA-Detektoren nur auf das korrekte Funktionieren bezüglich ihrer Rolle hin überprüft worden. Es ist deshalb wichtig, für jeden LSA-Detektor zu klären, ob er auch für andere Rollen verwendet werden kann, wie beispielsweise zum Zählen.

Der Zugang zu Detektor-Rohdaten ist weltweit nicht Standard. Der Schweiz [\[1\]](#), [\[4\]](#) und unseren Nachbarländern kommt dabei eine Vorreiterrolle zu, da wir seit den 1990er-Jahren an der Verfügbarkeit solcher Daten arbeiten und zugleich über eine sehr grosse Anzahl von Detektoren pro Knotenpunkt verfügen.

Weiter stellt sich grundsätzlich die Frage, ob mit LSA-Detektoren nur gezählt werden kann oder ob sogar weitere nützliche Grössen aus den Messungen abgeleitet werden können, wie:

- Belegungszeiten und Stauzustände
- Fahrzeugabstände (beispielsweise beim Anfahren)
- Geschwindigkeiten
- Reisezeiten

Solche Werte sind von grossem Nutzen für die Qualitätsanalyse, die Netzsteuerung oder auch lokal für einen intelligenten (evtl. selbstlernenden) Algorithmus zur Knotenregelung. Im Moment gibt es dazu in der Schweiz keine Norm.

Die in diesem Bericht vorgestellten Beispiele sind über weite Strecken in der Lage, beobachtete [Phänomene](#) nicht als Detektionsfehler abzutun, sondern sie **Überfahrten von Fahrzeugen** zuzuordnen.

Weiter kann man aus den Beispielen erkennen, dass es so gut wie keinen Detektor gibt, bei welchem nicht mindestens eines der Phänomene beobachtet werden kann, wenn auch manchmal nur sehr selten.

Es gibt also nicht den korrekt messenden und somit korrekt zählenden Detektor per se.

Es besteht folgender Forschungsbedarf:

- Wie erkennt man, für welche Rollen ein Detektor verwendet werden darf? Insbesondere interessieren wir uns für die (zusätzliche) Rolle des Zählens.
- Wie erkennt man, wie gut eine Rolle von einem Detektor wahrgenommen werden kann?
- Wie kann man die Ausführung der Rolle für den Detektor verbessern?
 - Durch Analyse seiner eigenen Messungen
 - Durch Analyse der Messungen umliegender Detektoren

Unweigerlich stellt sich dann die Frage, ob man mit einem Detektor, der korrekt zählt, nicht noch mehr machen könnte als nur korrekt zu zählen?

- Was kann man aus einer korrekten Messung eines einzelnen Detektors sonst noch erkennen? Lassen die sich aus abwechselnden Belegungszeiten und Belegungslücken Rückschlüsse über den Verkehrsfluss zu?
 - Kann man auf das Fahrverhalten der Fahrzeuge schliessen, vor allem auf das Anfahrverhalten?
 - Kann man Geschwindigkeiten schätzen?
 - Kann man Längenklassen schätzen?

Und was wäre, wenn man einen weiteren Detektor beiziehen würde?

- Kann man durch den Bezug eines zweiten, nahe liegenden Detektors an Genauigkeit gewinnen, beispielsweise für die Schätzung der Geschwindigkeit?
- Kann man die Messungen von weiter voneinander entfernte Detektoren miteinander korrelieren, um beispielsweise das Stauende zu beobachten?

Und schliesslich, wäre es nicht möglich, die Fahrzeuge einzeln zu verfolgen, wenn man die Messungen von mehr als zwei Detektoren miteinander korrelieren würde?

- Kann man Fahrzeuge verfolgen und wenn ja, wie weit?
- Auf einer Zufahrt? Dann könnte man Staulängen und Verlustzeiten angeben.
- Über einen Knotenpunkt?

Allgemein kann man folgendes vermuten:

Flankengenaue Detektor-Rohdaten ermöglichen uns einen Einblick in die Fahrzeugbewegungen zwischen, an und auf den Knoten und ein besseres Verständnis der Phänomene. Das führt

- zu besseren Statistiken,
- zu besseren Planungen und auch
- zu besseren Regelungen der Lichtsignale.

Der vorliegende Forschungsbericht versucht auf diese Fragen so viele Antworten wie möglich zu finden. Viel hat beantwortet werden können, ein paar Fragen haben sich als komplexer erwiesen als ursprünglich angenommen, und es sind neue Ideen für Verkehrskenngrößen entstanden.

Der daraus resultierende, weitere Forschungsbedarf wird weiter hinten in Abschnitt [7.2](#) beschrieben.

2.2.1 Besonderheit der Schweiz

Die Schweiz ist ein Land mit sehr vielen Schleifendetektoren auf Induktionsbasis, verglichen mit dem Ausland. Nur wenige weitere Länder verfügen über ähnlich viele Detektoren für die Verkehrsregelung an Knotenpunkten. Die Schweiz ist deshalb prädestiniert für Untersuchungen mit diesem Typ von Detektoren. In Deutschland und auch in Österreich ist die Detektordichte etwas geringer als in der Schweiz, und so sind in Deutschland bereits Untersuchungen durchgeführt worden, ob und wie man mit den LSA-Detektoren zählen kann (siehe [2.1.2](#)). In den Niederlanden stehen die Detektordaten meist nicht als flankengenaue Daten zur Verfügung, so dass nur Mengenbetrachtungen durchgeführt werden können.

Wir stehen an einem Punkt, wo wir – zumindest in der Schweiz – über eine solch grosse Anzahl von Detektoren mit guter Auflösung der Messungen verfügen, dass wir uns an diesen Schritt wagen können.

2.2.2 Rohdaten

In dieser Forschungsarbeit verfügen wir über Rohdaten oder, wenn Intervalldaten «mesoskopisch» genannt werden, über **mikroskopische** Daten; d.h. wir verfügen über alle Detektorflanken und Zustandswechsel der Signalgruppen in genügender zeitlicher Auflösung.

Weltweit gibt es wenige Systeme, welche den zentralisierten Zugriff auf Flanken von Detektoren und Zustandswechsel von Signalgruppen ermöglichen. In der Schweiz gibt es ausserdem so gut wie keine Knotenpunkte, die nicht verkehrsabhängig geregelt sind. Und kreuzungsfreie Schnellstrassen sind von untergeordneter Bedeutung bezüglich der Erfassung von Detektoren an Lichtsignalanlagen.

Der Forschungsbericht betritt deshalb über weiter Strecken Neuland, aber Neuland, welches auf die Schweiz zugeschnitten ist.

Es besteht also Forschungsbedarf, erst einmal für die Schweiz selber, aber sie wäre auch nützlich für das nahe Ausland wie Deutschland, Österreich, Niederlande. Länder mit weniger Detektoren oder keinem Zugriff auf flankengenaue Daten, wie Frankreich, Italien, aber auch die anglophone Welt, werden sich erst einmal weniger für solche Forschungen interessieren, da sie im Moment nicht angewendet werden könnten. Aber mit der «Digitalisierung» der Welt werden auch da in Zukunft immer mehr Daten zur Verfügung stehen.

3 Vorgehen und Methodik

Kurzfassung

Verschiedene LSA-Knoten sind untersucht worden und deren Daten analysiert. Nach der Definition der Voraussetzungen wurden für aufgetretene, aussergewöhnliche Phänomene Erklärungen gesucht und diese geordnet und bewertet. Daraus leitet sich die Empfehlung für die Umsetzung in die Praxis her.

Anspruch

Die Methodik, die vorgestellten Erkenntnisse und die Verfahren sollen unabhängig von der Technologie der Detektoren sein.

Ziel ist die Definition eines Vorgehens zum Erreichen der bestmöglichen Zählgenauigkeit.

Rein basierend auf Flankenmessungen der Detektoren und Zustandswechseln der Signalgruppen, können die nötigen Erkenntnisse zum Verständnis der Detektions-Phänomene gewonnen werden. Externe Kontrollmessungen sollen nur dann nötig sein, wenn keine oder nicht genügend Redundanz an Detektoren vorhanden ist.

Möglichst viele Fälle sollen deshalb **nur anhand der Daten nachweisbar** und erklärbar sein und Kategorien zugeordnet werden können.

- Fälle, die nicht anhand der Daten erklärt werden können, müssen auf der Strasse beobachtet werden.
- Erklärbare Fälle müssen zur Kontrolle ebenfalls auf der Strasse beobachtet werden.

Diese beiden Punkte gelten **nur im vorliegenden Forschungsbericht**. Für die Anwendung der Resultate in der Praxis darf aus Zeit- und Kostengründen nichts auf der Strasse beobachtet werden müssen.

Für diesen Bericht war auch ein dritter Fall wichtig, um ein möglichst vollständiges Bild der Phänomene zu erreichen:

- Beim Beobachten der Videoaufnahmen Seltsames erkennen – und dann in den Aufzeichnungen suchen und das Phänomen beschreiben.

3.1 Technisches

3.1.1 Systeme und Daten

Ausgangsdaten

Die Daten sind über die verschiedensten Systeme mit einer Auflösung von 1/10 s aufgezeichnet worden. Es sind Detektorflanken und Signalgruppenzustände aufgezeichnet worden. Die Detektorflanken stammten zum grossen Teil von Induktionsschleifen, in kleinem Mass auch von Videodetektoren:

- Kanton Zürich via OZS und VPD
- Kanton Solothurn via OCIT-I PD

Für die Forschung wurden Archiv-Aufzeichnungen verwendet, welche mittels Dateien im VPD-Format (komprimiert zum VPX-Format) [\[24\]](#) leicht transportabel und systemunabhängig sind.

Nicht berücksichtigt, aber berücksichtigbar in derselben Auflösung waren folgende Städte und Kantone:

- Kanton Basel-Stadt (VPD) – keine Feldbeobachtungen
- Stadt Bern (OCIT-C)

- Stadt Zürich via proprietärem dBus-Export und VPD

Im Rahmen einer gleichzeitig stattfindenden Masterarbeit an der TU München [21] sind auch Daten der Stadt Frankfurt am Main in Deutschland betrachtet worden, allerdings ohne vergleichende Videoaufnahmen:

- Stadt Frankfurt via Export aus VTnet (Gevas Software, München) und VPD

Zieldaten

Die so gesammelten Daten im VPD-Format werden pro Tag und Knoten in einer VPX-Datei abgelegt. Die VPX-Dateien werden zu einem so genannten VPX-Archiv zusammengefasst und können von dem Programm VS-VPDB verwaltet und auch wieder exportiert werden. VS-VPDB ist auch für den Import der proprietären Formate verantwortlich.

Das VPD-Format sowie das Programm VS-VPDB sind Entwicklungen der Adaptive Traffic Control AG auf Basis des binären Formats von OCIT-I PD. Die Verwendung des VPD-Formats in Programmen ist lizenzfrei und wird auf Anfrage gewährt.

Auswertung der Daten

Im vorliegenden Bericht wird VS-pCoq zur Auswertung und Visualisierung der Daten verwendet. VS-pCoq ist ebenfalls ein Produkt der Adaptive Traffic Control AG.

3.1.2 Video-Aufnahmen

Die Videoaufnahmen sind mit handelsüblichen «ActionCams» gemacht worden, welche an Masten aufgehängt worden sind. Sie haben jeweils rund zwei Stunden Film aufgezeichnet. Die Positionen der Kameras sind vorher bezüglich Datenschutz und Persönlichkeitsschutz mit den entsprechenden Amtsstellen abgesprochen worden.

Für die Wahl der Standorte ist es wichtig, dass möglichst alle Detektoren von den Kameras eingesehen werden können. Die nächste Abbildung zeigt die Kamerastandorte und die Blickwinkel für den Knoten [032](#) in Zollikon.

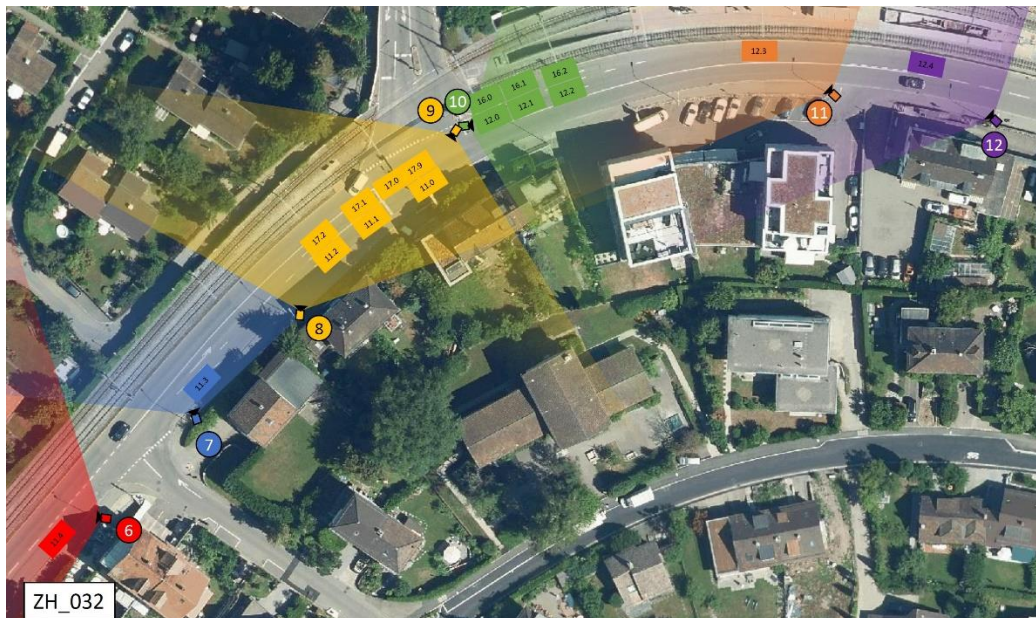


Abb. 28 Kameraplan für Knoten [032](#) in Zollikon⁹

⁹ Luftbild von map.geo.admin.ch

3.2 Praktisches

Hier wird beschrieben, mit welcher Methodik in der Forschungsarbeit vorgegangen worden ist. Daraus leitet sich die [Empfehlung für die Umsetzung in die Praxis](#) her, welcher am Schluss dieses Berichtes entwickelt wird.

Vor jedem Verwenden von Messdaten müssen die Detektoren folgende Prüfungen bestehen, damit sie verwendet werden können:

- **Plausibilität:** kann der Detektor überhaupt verwendet werden?
- **Störung:** ist der Detektor zurzeit gestört, d.h. kann er zurzeit nicht verwendet werden?
- **Fehlerhaftes Ansprechen oder Aussetzen:** gibt es systematische Messfehler, die zumindest teilweise korrigiert werden können?

3.2.1 Plausibilisierung von Einzeldetektoren

Es werden Schleifendetektoren auf Induktionsbasis und Sensoren auf Videobasis verwendet. Die Sensoren auf Videobasis erzeugen äquivalente Ein- und Aus-Signale wie die Schleifendetektoren auf Induktionsbasis; weitere Messgrößen für Einzelfahrzeuge standen nicht zur Verfügung (wie Farbe, Profil oder Ähnliches, was eine Fahrzeug-Identifikation ermöglichen könnte).

Einzeldetektoren werden plausibilisiert durch

- **Statistische Analysen** der Signale über Belegungszeiten, Brutto- und Nettozeitlücken und ihre Entwicklungen
- **Mikroskopische** (flankengenaue) **Vergleiche** der Signale mit Detektoren auf benachbarten Fahrspuren, flussaufwärts und flussabwärts unter Berücksichtigung verschiedener geometrischer Bauformen
- **Statistische Vergleiche** der Zählwerte mit Detektoren flussaufwärts und flussabwärts

Auf statistische Vergleiche mit Messungen aus der Vergangenheit wird hier verzichtet, da solche Vergleiche mit aggregierten Daten schon genügend in der Literatur behandelt worden sind, wo sie auch für kurzfristige wie langfristige Prognosen des Verkehrs verwendet werden.

Als Referenz werden stichprobenartige Zählungen von Hand bzw. anhand von Videoaufnahmen durchgeführt.

Als Resultat werden Zählwerte mit Konfidenzwerten errechnet, welche angeben, wie hoch die Wahrscheinlichkeit liegt, dass der Wert stimmt bzw. in festzulegenden Fehlergrenzen liegt.

Die statistischen Vergleiche werden für die Überwachung der Zählgenauigkeit der Detektoren verwendet und evtl. zur Bestimmung des Konfidenzwertes, nicht aber zur Korrektur eines aktuellen Zählwerts. Werden dazu kurzfristige Zählwerte verwendet (in der Grösse von Minuten), muss die Intervalllänge den Umläufen der Lichtsignalanlage des folgenden Knotenpunkts angepasst werden, damit keine Sampling-Effekte auftreten. Eine unterschiedliche Anzahl Grünphasen in verschiedenen Intervallen führt zu Sprüngen in den Anzahl Fahrzeugen, welche während eines konstanten Intervalls gezählt werden. Ausserdem müssen die Intervallgrenzen der Fahrzeit der Fahrzeuge zwischen den Detektoren Rechnung tragen, damit dasselbe Fahrzeug auf unterschiedlichen Detektoren sich in demselben Intervall wiederfindet.

3.2.2 Messlücken

Ist der Konfidenzwert unter einer festgelegten Grenze, so kann der Detektor kurzfristig nicht zum Zählen verwendet werden. Befindet sich kein Ersatzdetektor in der Nähe, dann kann ein Ersatzwert errechnet werden. Je kürzer die Messlücke ist, umso besser ist der Ersatzwert. Die verwendeten statistischen Methoden sind in [\[8\]](#) ersichtlich.

Das Ersetzen von fehlenden Werten ermöglicht es, lückenlose Statistiken zu erzeugen, immer unter Mitführung der Information der Konfidenz der so errechneten höher verdichteten Werte (DTV, DWV, usw.).

3.2.3 Zusätzliche Messgrößen durch Doppeldetektoren

Doppeldetektoren können die Geschwindigkeit messen und dadurch auch eine Fahrzeuglänge schätzen, was zu einer Einteilung in Fahrzeugkategorien führen kann. Ob und wie Fahrzeugklassen erkannt werden können, ist mit Beobachtungen vor Ort überprüft worden. Ausserdem eignen sich Doppeldetektoren gut zur Plausibilisierung eines Einzeldetektors, da sie eng beieinander liegen.

3.3 Einführendes Beispiel

Es geht um eine Aussage, wie gut Detektoren Fahrzeuge zählen können. Dazu können ihre Zählwerte untereinander verglichen werden. Da die Zählwerte aufeinander folgender Detektoren so gut wie nie gleich sind, kann aus den Zählwerten nur begrenzt ein Rückschluss über die Güte gezogen werden. Es können zumindest schlechte Detektoren verworfen werden. Siehe dazu [Abb. 31](#) und Folgende.

Wir betrachten die Ostzufahrt des Knotens 032 in Zollikon vor den Toren der Stadt Zürich.

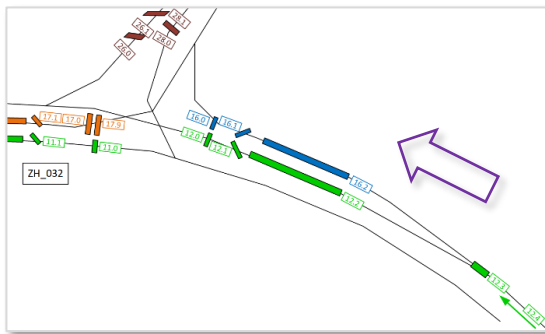


Abb. 29 Lageplan zur Verfolgung von Fahrzeugen am Knoten [032](#) (E)

Die nächste Abbildung zeigt einen typischen Mitschnitt eines morgendlichen Kolonnenverkehrs. Alle Detektoren liegen vor der Haltelinie, nur die Detektoren «.0» liegen kurz danach. Die Impulse des Detektors 12.0 lassen auf das Fahrverhalten der Kolonnenfahrzeuge schliessen, ob sie z.B. sehr eng aufeinander fahren oder auch wie schnell sie fahren. Das wird später eingehend betrachtet werden.

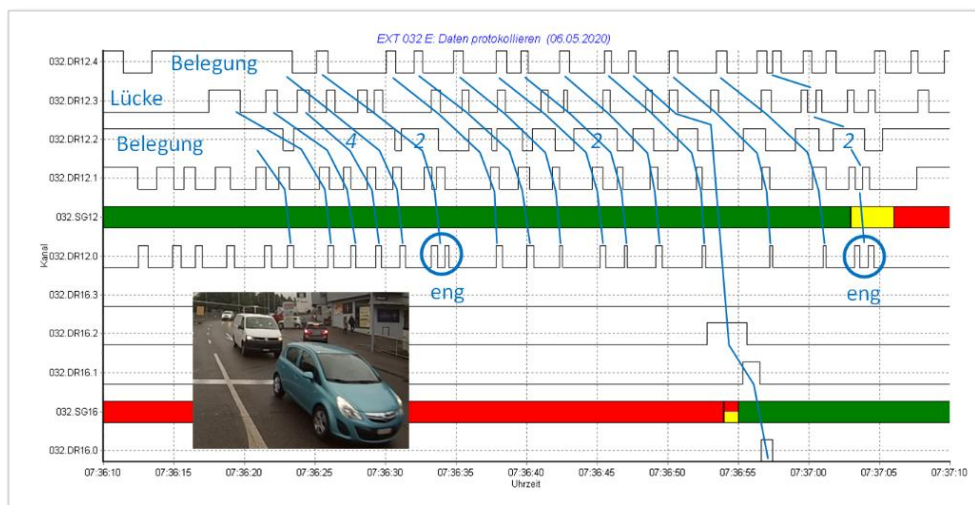


Abb. 30 Aufzeichnungen zur Verfolgung von Fahrzeugen am Knoten [032](#) (E)

Verlängerungsdetektor 12.2

Zum Verfolgen und somit auch Zählen von Fahrzeugen eignen sich einzig Verlängerungsdetektoren nicht. DR12.2 ist ein solcher Verlängerungsdetektor. Bei genügend Abstand zwischen den Fahrzeugen erkennt er aufeinander folgende Fahrzeuge. Jedoch unter einem minimalem Abstand oder unter einer minimalen Geschwindigkeit ist das nicht mehr möglich.

Bei lockerem Verkehr kann auch ein Verlängerungsdetektor erkennen, dass ein Fahrzeug die Spur gewechselt hat, siehe das Fahrzeug auf der Linksabbiegerspur um 07:36:55.

Kurze Detektoren 12.1, 12.2, 12.3 und 12.4

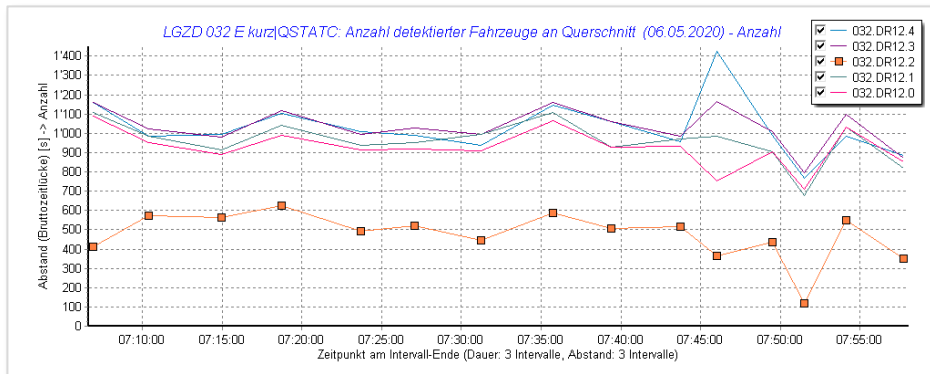


Abb. 31 Zählwerte pro 3 Umläufe in der Zufahrt 12 am Knoten 032 (E)

Es wäre zu erwarten, dass die Detektoren vor und nach der Haltelinie (12.1 und 12.0) am genauesten zählen. [Abb. 31](#) zeigt die stündlichen Zählwerte der Detektoren in der betrachteten Zufahrt 12. Der Verlängerungsdetektor 12.2 zählt natürlich viel zu wenig Verkehr. Er dient in der Abbildung nur als Halterung für Marken der Intervall-Enden¹⁰.

Bis 07:45 zählen Detektoren 12.4 und 12.3 etwa gleich viel Verkehr. Detektoren 12.1 und 12.0 zählen weniger Verkehr. Es fehlen die Rechtsabbieger auf Spur 16. Detektor 12.0 zählt weniger Verkehr als Detektor 12.1.

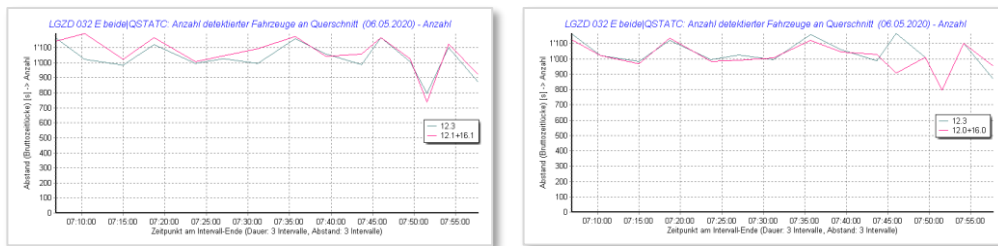


Abb. 32 Zählwerte pro 3 Umläufe in den Zufahrten 12 und 16 am Knoten 032 (E)

[Abb. 32](#) zeigt im Vergleich zu Detektor 16.3 die Summe der Detektoren «.1» und «.0». Wir erkennen, dass die Detektoren «.1» zusammen am meisten Verkehr zählen. Sollte dieses Maximum nicht auf ein Prellen zurückzuführen sein, dann kann hier erkannt werden, dass die Detektoren gerade vor der Haltelinie (in Fahrtrichtung) am genauesten zählen.

Gründe dafür sind,

- dass sie so gut wie nie in langsam fahrendem, nah aufschliessendem Verkehr liegen und deshalb aufeinander folgende Fahrzeuge gut voneinander unterscheiden könnten und
- dass sie von kurzer Bauart sind, dass also die Wahrscheinlichkeit einer nicht erkannten Lücke zwischen Fahrzeugen gering ist.

¹⁰ Um sogenannte Abtasteffekte zu vermeiden, wenn die Länge der Zählintervalle kein Vielfaches der Umlaufzeit der Lichtsignalanlage ist, bietet sich eine Mittelung über variable «Intervalle» an, deren Grenzen an das Grün-Ende einer zugeordneten Signalgruppe gekoppelt sind. Das ist in Abschnitt [3.2.1](#) bereits erwähnt worden

Zu ihrem Nachteil gereicht, dass sie meist sehr empfindlich sind und Anhänger oder gar Zugmaschinen von Sattelschleppern als einzelne Impulse wahrnehmen. Ebenso Velos werden meistens nur von diesem Detektor erkannt.

Wir werden im Laufe dieses Forschungsberichts sehen, dass nicht immer die Detektoren gerade vor der Haltelinie am genauesten zählen, sondern manchmal auch die Detektoren nach der Haltelinie. In seltenen Fällen zählen auch andere Detektoren sehr genau. Die Wahl des genauesten Detektors ist somit zu formalisieren. Das geschieht im Kapitel [8](#).

Die Detektoren 12.4 und 12.3 in der Einfahrt sind etwas länger als die Haltelinien-Detektoren und verpassen somit ab und zu eine Lücke zwischen zwei Fahrzeugen, wenn sie langsam überfahren werden.

Detektoren können verschieden empfindlich eingestellt werden. Sie können Zweiradfahrer erfassen oder nicht. Sie können hochrädige Fahrzeuge erfassen oder nicht. Lastwagen sind häufig hochrädig. Sie können schwere Personenwagen mit Lastwagen verwechseln. Und sie können von Fahrzeugen umfahren oder fälschlicherweise überfahren werden, auch wenn sie ganz präzise zählen können.

Die Detektoren, die am genauesten zählen, müssen also von weiteren Detektoren umgeben werden, um die gerade geschilderten Effekte erkennen und evtl. korrigieren zu können. Dadurch haben auch die anderen Detektoren ihre Funktion.

Detektoren, die sich aus erkennbaren Gründen verzählen, können trotzdem zur Verbesserung der Zählwerte anderer Detektoren herangezogen werden.

Es bleiben folgende Punkte zu überprüfen:

- Die Detektoren 12.4 und 12.3 in der Zufahrt zählen weniger Verkehr als die Detektoren 12.1 und 12.0 vor und nach der Haltelinie. Grund ist der periodische Rückstau auf ihnen und die Zählgenauigkeit auf den Detektoren, siehe Anhang [VI](#).
- Detektor 12.1 zählt mehr Verkehr als Detektor 12.0. Grund ist die Sensibilität der beiden Detektoren. Das wird vor allem in Anhang [III.6](#) genau betrachtet.
- Zwischen 07:45 und 07:55 kommt das System durcheinander. Grund ist die Forchbahn, welche die Detektoren stört. Siehe dazu den Anhang [VII.1.2](#) und die [Abb. 235](#).

3.4 Vorbereitung

Vor den Versuchen sind die Daten möglicher Knotenpunkte analysiert worden, und zwar im Kanton Zürich, im Kanton Solothurn, im Kanton Basel-Stadt und in der Stadt Bern. Auch eine ältere Analyse aus der Stadt Zürich ist beigezogen worden. Die Analyse diente der Vorbereitung der (Kontroll-) Messungen.

In den Vorbereitungen hat sich gezeigt, dass es so gut wie keine Detektor gibt, bei welchem nicht mindestens eines der später beschriebenen Phänomene beobachtet werden kann, wenn auch manchmal nur sehr selten. Deshalb soll sich dieser Bericht nicht auf den Umgang mit Zählfehlern beschränken, welche aus der Beobachtung **einzelner** Detektoren entsteht, sondern den Anspruch stellen, mit Hilfe der Beobachtung **umliegender** Detektoren die Phänomene verstehen und sie im besten Fall automatisiert korrigieren zu können:

Plausibilität

Die Plausibilität von Detektoraufzeichnungen kann von Auge gut nachvollzogen werden. Nur plausible Detektoren sollen weiter betrachtet werden. Gleichzeitig können Regeln zur Beschreibung der Plausibilität erkannt werden.

Störung

Als Störung wird eine Verfälschung der Messdaten bezeichnet, die nicht korrigiert werden kann, jedoch erkannt. Gestörte Detektoren können deshalb – zumindest temporär – nicht verwendet werden. Es können Regeln zur Beschreibung von Störungen erkannt werden. Störungen können wiederholt oder spontan auftreten und mit unterschiedlicher Dauer.

Übersprechen, Prellen, Längs- und Quervergleiche

Aus den Detektionssequenzen können recht einfach unplausible Impulse erkannt werden und einem Phänomen zugeordnet, welches in den anschliessenden Kontrollmessungen überprüft werden soll.

Vorhersehbare Phänomene sind kürzere Abbiegespuren, wo ein Teil des auf dem gemeinsamen, stromaufwärts liegenden Verkehrs das nächste Mal auf dem Detektor in der Abbiegespur erkannt wird. Parallele Spuren erzeugen natürlicherweise Übersprechen, da ab und zu ein Fahrzeug seine Spur nicht genau einhält.

Verfolgung von Fahrzeugen

Von Auge können Fahrzeuge gut im Signalzeitenplan mit Detektoren verfolgt werden. Vor allem bei wenig Verkehr können gut Phänomene erkannt werden. Bei viel Verkehr wird es schwierig, und man wird auf die Hilfe von Algorithmen angewiesen sein.

Gegenverkehr und nicht erklärbare Störungen

Übersprechen durch Gegenverkehr ist schlecht erkennbar. Nur wenn sich Detektoren des Gegenverkehrs in der Nähe befinden, kann man zwischen Gegenverkehr oder sonstigen, nicht erklärbaren Störungen unterscheiden

Erkennbarkeit von Velos unter Motorfahrzeugen

Velos mit eigenen Spuren und Detektoren können einfacher erkannt werden als Velos im normalen Verkehr. Nicht alle Detektoren sind empfindlich genug eingestellt, Velos zu erkennen. Auch eine Lage in der Spurmitte verhindert häufig die Erkennung von Velos.

Technische Einflüsse

Manche Messwerte fehlen bei manchen Detektoren, beispielsweise eine bestimmte Belegungsdauer oder Belegungslücke. Solche Effekte dürfen nicht überinterpretiert werden, sondern müssen manchmal der Detektionstechnologie zugeschrieben werden, vor allem, da wir mit einer Auflösung von 1/10 s arbeiten. Das ist um Faktoren genauer als die eigentliche Impulslänge oder Lücke.

3.5 Versuch 1 in Zollikon, ZH

Bestimmung und Erhöhung der Genauigkeit von Zählungen pro Fahrspur

Die Genauigkeit ist je nach Detektor unterschiedlich. Sie kann durch Vergleich mit umliegenden Detektoren relativ gut bestimmt werden. Es ist auch möglich, sie zu erhöhen. Dazu eignen sich vor allem die Haltelinien-nahen Detektoren. Am besten ist es, wenn zwei Detektoren vorhanden sind, meist einer vor und einer hinter der Haltelinie. Auch zwei Detektoren nach der Haltelinie eignen sich gut.

Allerdings muss auch an der Haltelinie mit Übersprechen durch parallelen Verkehr oder mit Ansprechen durch den Gegenverkehr gerechnet werden. Diese «Phänomene» werden im Anhang III exemplarisch vorgestellt und sind in einer zusammenfassenden [Phänomene](#) im Anhang I auf Seite [117](#) einander gegenübergestellt unter Berücksichtigung von Verwechslungsmöglichkeiten.

Erkennung von Störungen

Das ist häufig auch recht einfach möglich. Allerdings ist es dann meist nicht möglich, die Störungen zu korrigieren und doch noch Zählwerte der Detektoren zu erhalten. Nur wenn der Detektor kurzzeitig ein Prellen zeigt, welches auf einen Anhänger oder einen Lastwagen zurückzuführen ist, kann eine Korrektur vorgenommen werden. Während allgemeiner Störungen können die Daten der Detektoren nicht verwendet werden. Die zugehörige Theorie und ein paar Beispiele werden in Kapitel [4.2](#) gezeigt.

Erkennung von Fahrzeugklassen auf Doppeldetektoren

Grob ist es möglich, fein ist es schwierig. Die zugehörige Theorie und ein paar Beispiele werden in Kapitel [4.3](#) gezeigt.

Folgende Kategorien kann man mit genügender Genauigkeit voneinander unterscheiden:

- Lastwagen,
- Sonstige Motorfahrzeuge,
- Motorräder und Velos, allerdings nur in speziellen Konstellationen.

Berechnung von Geschwindigkeiten

Die Geschwindigkeit kann auf Doppeldetektoren berechnet werden. Auf Einzeldetektoren kann sie nur geschätzt werden, da zur Berechnung der Geschwindigkeit die Fahrzeuglänge bekannt sein muss. Die zugehörige Theorie und ein paar Beispiele werden in Kapitel [4.3](#) gezeigt.

Verfolgung von Fahrzeugen

Fahrzeuge können gut über mehrere Detektoren verfolgt werden. Dazu ist es nötig, dass die Signale der Detektoren von Störungen und Prellen befreit sind.

- Haltelinien-nahe Detektoren erkennen die Fahrzeuge am besten.
- Verlängerungsdetektoren erkennen sie am schlechtesten. Sie können nur zur Unterscheidung von Fahrzeugen verwendet werden, wenn der Verkehr mit einer minimalen Geschwindigkeit über sie fließt.
- Detektoren in der Einfahrt lassen sich meist dazu verwenden. Bei Stau zeigen die eine Tendenz zum Zählen von zu wenigen Fahrzeugen, da sie die Fahrzeuge nicht mehr voneinander unterscheiden können. Der Effekt ist jedoch gering.

Fahrzeuge, welche Abbiegespuren befahren, können häufig gut aus dem Hauptstrom heraus erkannt werden. In seltenen Fällen ist es schwierig zu erkennen, welches Fahrzeug genau auf die Abbiegespur gefahren ist. Solches wäre nötig, um Quell-Ziel-Beziehungen zu bestimmen.

Motorräder und Velos können schlecht verfolgt werden. Häufig fahren sie an den Detektoren vorbei oder enthalten zu wenig Metall, um detektiert zu werden. Am besten werden sie vor der Haltelinie detektiert, denn diese Detektoren sind entsprechend empfindlich eingestellt.

Erkennung von rechtswidrigem Verhalten

Ab und zu erkennt man rechtswidriges Verhalten der Verkehrsteilnehmer, meist dank der Videoaufnahmen. Es handelt sich vor allem um folgende Verstöße:

- Rotfahrer
- Überholende Motorräder auf einer Abbiegespur Spur
- Umfahren des Lichtsignals auf einer anderen Spur
- Befahren des Fussgängerstreifens oder des Trottoirs durch ein Velo

Die Rotfahrer können zuverlässig erkannt werden. Überholende Motorräder können sporadisch erkannt werden, wenn sie auf der Abbiegespur Fehlimpulse hinterlassen oder sich vor die Fahrzeugkolonne hinter die Haltelinie stellen.

3.6 Versuch 2 in Solothurn und Zuchwil, SO

Hier sind die Messungen von Zollikon überprüft und ergänzt worden:

- In Zuchwil sind neben Induktionsschleifen auch **Videodetektoren** untersucht worden.
- In Solothurn sind zusätzlich zu den Fahrzeugdetektoren auch reine **Velodetektoren** untersucht worden.

Unterschiede zwischen Videodetektoren und Induktionsschleifen

Es gibt Unterschiede – und es gibt auch keine:

- Beide Typen von Detektoren können schwingen, auch auf dem Verlängerungsdetektor.
- Bei keinem der beiden Typen sind Fehleinkopplungen wie in Zollikon festgestellt worden.
- Die Erkennung der Länge und dadurch der Fahrzeugklasse ist auch hier nicht möglich, vielleicht auch dadurch, dass die Doppeldetektoren an der Haltelinie aus einem Videodetektor (vor) und einer Induktionsschleife (nach) bestehen. Somit kann die Abhängigkeit vom magnetischen Echo nicht eliminiert werden und die Probleme, welche für Zollikon beschrieben worden sind, bestehen auch hier weiter, trotz teilweise anderer Technologie.

Verwendung von Velodetektoren

Zwei Arten von Velodetektoren sind untersucht worden:

- Detektor auf Velostreifen auf der Höhe des Verlängerungsdetektors für die Motorfahrzeuge
- Detektor kurz vor der Haltelinie, «Matratze» genannt, die Fahrzeuge halten vor dem Detektor an einer eigenen Haltelinie an.

Die Detektoren auf den Velostreifen sprechen häufig auch bei vorbeifahrenden Motorfahrzeugen an, zuverlässig bei der Überfahrt von Velos. Sie erkennen jedes Velo einzeln. Velos werden in folgenden Fällen korrekt erkannt:

- Bei stehender Fahrzeugkolonne
- Bei Abwesenheit von anderen Fahrzeugen.

Es ist wichtig, den Kontext anderer Fahrzeuge via die Redundanz der Detektoren zu kennen, um die Detektionen richtig zuzuordnen zu können, vor allem bei fahrender Fahrzeugkolonne. Die Detektoren vor der Haltelinie erkennen ebenfalls zuverlässig Velos, können aber mehrere wartende Velos nicht voneinander unterscheiden. Autos, die zu weit vorne anhalten, werden ebenfalls erkannt. Auch hier ist der Kontext der anderen Fahrzeug- und Velodetektoren wichtig für die Interpretation der Messungen.

Erhöhung der Genauigkeit von Zählungen pro Fahrspur

Verglichen mit der Vielzahl von Fällen in Zollikon gibt es hier eigentlich nur folgende Fälle:

- Prellen wegen Lastwagen, Anhängern, Reflexionen
- Velos und Motorräder mit ähnlichem Detektionsverhalten wie in Zollikon

Andere Effekte konnten nicht nachgewiesen werden. Die Zählgenauigkeit ist somit recht hoch, wenn der Detektor korrekt funktioniert, sowohl für [SOLO_16](#) als auch für [ZUCH_10](#).

Erkennung von Fahrzeugklassen auf Doppeldetektoren

Die Erkennung von Autos, Lieferwagen und Lastwagen zeigt ähnliche Effekte wie in Zollikon und ist ungenau.

Wie in Zollikon treten hier auch Probleme auf. So gilt weiterhin die Vermutung, dass man mit genügender Genauigkeit nur folgende Kategorien voneinander unterscheiden kann:

- Lastwagen,
- Sonstige Motorfahrzeuge,
- Motorräder und Velos.

Als zusätzliche Methode der Ermittlung eines Schwerverkehr-Anteils wird hier die Beobachtung des Anfahrverhaltens nach Rot vorgestellt mit der Beobachtung der Bruttozeitlücken, siehe dazu Abschnitt [4.4](#).

Erkennung von Velos und Motorrädern

Durch die Anordnung und Kalibrierung der Detektoren bei [SOLO_16](#) ist es möglich, vor der Velo-Haltelinie Velos zu detektieren und nach der Haltelinie nicht. Die sich so ergebende Differenz hat eine Zählgenauigkeit von 85 % oder höher für Velos bzw. einen Fehler von 15 % oder geringer. Der Fehler kann durch Vorverarbeitung des Signals nochmals etwa halbiert werden (siehe dazu Abschnitt [4.2](#)). Allerdings gibt es eine hohe «Dunkelziffer» von Velos, die auf dem Trottoir fahren.

Motorräder werden etwa zur Hälfte und ausschliesslich auf dem Detektor vor der Motorfahrzeug-Haltelinie erkannt. So lässt sich ihre Anzahl in etwa abschätzen, der Fehler bleibt aber in der Grössenordnung zwischen 15 % und 40 %.

Diese Erkenntnisse sind nur durch Kontrollbeobachtungen an 2 Fahrspuren von je einer guten halben Stunde erhärtet worden, was etwas kurz ist für tiefgründigere Aussagen.

Berechnung von Geschwindigkeiten

Die Geschwindigkeit kann auf Doppeldetektoren berechnet werden, hier zusammengesetzt aus Videodetektoren und Induktionsschleifen.

Erkennung von rechtswidrigem Verhalten

Abgesehen von optisch erkennbaren kreativen Velo-Trajektorien ist kein rechtswidriges Verhalten vorgekommen.

4 Ergebnisse: Signalverarbeitung

Ziel dieser Forschungsarbeit und der zugehörigen Versuche ist und war es, die Genauigkeit von LSA-Detektoren zum Zählen von Fahrzeugen zu bestimmen. Dabei war es von vornherein klar, dass die gemessenen Belegungs-Signale von Detektoren nur annähernd die physische Belegung des Detektors zur gewünschten Fahrbeziehung wiedergeben.

Ein weiteres Ziel ist es, ungenaue Belegungs-Signale der Detektoren zu erkennen und wenn möglich zu korrigieren mit dem Ziel, die Genauigkeit des Zählens so hoch zu treiben wie möglich.

Es ist nicht Aufgabe dieses Forschungsberichts, Algorithmen im Detail zu entwickeln, um Zählfehler zu korrigieren oder die weiteren Möglichkeiten der Datenverarbeitung im Detail vorzugeben. Es sollen jedoch die nötigen Grundlagen geschaffen werden, dass solche Algorithmen entwickelt werden könnten.

Diese Grundlagen werden hier vorgestellt. Für eine bessere Lesbarkeit sind die Beispiele ins nachfolgenden Kapitel [1](#) ausgelagert.

4.1 Fehlerkorrigierende Codes

Wie in der Kommunikationstechnik standardmässig angewendet, werden empfangene Signale einer Vorverarbeitung zugeführt. Sie wird häufig auch als Decodierung bezeichnet, da die Signale so codiert werden, dass es einfacher ist, Fehler zu erkennen und zu korrigieren.

Ein sehr einfaches Beispiel einer solchen Codierung ist die Bildung einer Checksumme über einen Zeitraum der Werte eines eintreffenden Signals.

- Im einfachsten Fall kann die Checksumme zur Überprüfung verwendet, ob der Inhalt korrekt angekommen ist. Ist er nicht korrekt, wird er verworfen.
- Im besten Fall kann man anhand der Checksumme darauf schliessen, was an Werten falsch übermittelt worden ist, und die Fehler korrigieren.

Das Verfahren unterliegt Einschränkungen:

- Die Checksumme wird nach einer Rechenregel erzeugt. Enthält ein Stück Information mehrere Fehler, so kann es der Zufall wollen, dass trotzdem die richtige Checksumme erzeugt wird.
- Ebenso kann die Menge der Fehler in einem Stück Information die Möglichkeit der Korrektur anhand der Checksumme vermindern, da der Fehler nicht mehr eindeutig zugewiesen werden kann, oder gar verunmöglichen.

Die Erkennungs- und Korrekturleistung von Codes wird mit der so genannten Hamming-Distanz gemessen. Je grösser die Hamming-Distanz, umso stärker kann die Information verfälscht sein und immer noch korrekt erkannt werden. Je redundanter die Information ist, umso grösser ist die Hamming-Distanz.

Wir wenden diesen Ansatz analog auf unsere Problemstellung an:

Je mehr Redundanz unsere Messungen aufweisen, umso wahrscheinlicher ist es, dass die Information korrekt aus den Messungen herausgelesen werden kann.

Verfahren zur Erkennung von Ähnlichkeit gibt es schon lange in der digitalen Übertragungstechnik, wo mit Störungen der übertragenen Signale umgegangen werden muss beim Versuch, das originale Signal so gut wie möglich herauszufinden. Störungen können sich als aufmoduliertes Rauschen äussern, als Übersprechen anderer Signale, als zu schwache empfangene Signale, usw.

Was wir hier nicht können, ist das Signal zu codieren, um es störungsfester zu machen. Wir müssen aus den empfangenen Signalen einzig durch Redundanz und topologischem Wissen die originalen Signale rekonstruieren.

4.2 Einzeldetektor

4.2.1 Störungen

Als Störung wird eine Verfälschung der Messdaten bezeichnet, die nicht korrigiert werden kann, jedoch erkannt. Gestörte Detektoren können deshalb – zumindest temporär – nicht verwendet werden.

Optisch erkennt man eine Störung am einfachsten, wenn das Detektionsmuster in den Aufzeichnungen keinen Sinn ergibt. Dieses Kriterium ist leider nicht dazu geeignet, automatisiert zu werden. Deshalb müssen wir uns statistischer Hilfsmittel bedienen.

Störungen können mittels Bruttozeitlücke oder Nettozeitlücke festgestellt werden.

4.2.2 Technische Einflüsse

Messresultate geben nicht nur die gemessenen Grössen wieder (also das Fahrzeug und seine Überfahrt), sondern hängen auch von der Technologie ab, mit welcher die Daten aufbereitet worden sind. Meist äussern sich solche technischen Einflüsse im Fehlen oder im gehäuften Auftreten gewisser Werte.

Vor allem fehlende Werte können auf Abtastraten zurückgehen. Gehäuftetes Auftreten kann durch [Übersprechen](#) ausgelöst werden.

4.2.3 Signalanalyse

Einzeldetektoren zeigen Prellen und sonstige unregelmässige Schwingungen im konstanten Signalverlauf als unerwünschte Störungen. Einzeldetektoren erkennen auch regelmässig Anhänger oder Führerkabinen von Lastwagen als Einzelsignale. Wenn nur die Anzahl Fahrzeuge ohne Erkennung von Anhängern oder Schätzung einer Klassierung gezählt werden soll, sind diese Mehrfachdetektionen störend und müssen unterdrückt werden. Dies kann in einer Vorverarbeitung des Rohsignals geschehen.

Siehe dazu in der Einführung das Kapitel [Signalanalyse am Einzeldetektor](#) auf Seite 13.

Die Ergebnisse zur Erhöhung der Zählgenauigkeit werden in den Abschnitten [5.1.1](#) und [5.2.1](#) vorgestellt.

4.3 Doppeldetektor

Folgen zwei Detektoren in kurzem Abstand aufeinander, dann können die beiden zusammen als Doppeldetektor behandelt werden. Üblicherweise werden Doppeldetektoren dediziert zur exakten Zählung, zur Bestimmung der Fahrzeugklasse und zur Messung der Geschwindigkeit an geeigneter Stelle in die Fahrbahn eingelassen, wie bei den VDE-Zählstellen. Im Umfeld von LSA-Detektoren sind die Doppeldetektoren häufig «ad hoc» zu finden, d.h. sie sind nicht als solche erstellt worden, sondern es sind Detektoren, die nahe beieinander liegen, z.B. kurz vor und kurz nach der Haltelinie.

Zuerst müssen die Eingangssignale auf Störungen überprüft werden. Dies geschieht, wie im vorhergehenden Abschnitt [4.2](#) beschrieben. Anschliessend können die vorverarbeiteten Signale gemäss [Abb. 5](#) verwendet werden, siehe dazu in der Einführung das Kapitel [Signalanalyse am Doppeldetektor](#) auf Seite 14.

4.3.1 Geschwindigkeit

In Ergänzung zu den Erläuterungen in der Einführung mit [Abb. 9](#) gehen wir hier noch kurz auf die Details der Erfassung der Geschwindigkeit ein.

Jede Überfahrt über die beiden Detektoren führt zu einer Messung der Geschwindigkeit. Einzeldetektionen von Zweirädern oder Lastwagen können nicht verwendet werden. Auch bei Stau auf dem 2. Detektor kann keine Geschwindigkeit gemessen werden.

Die Geschwindigkeit berechnet sich nach der Formel: $v = \frac{s_{\text{äq}}}{t_f}$.

Dabei ist $s_{\text{äq}}$ eine Äquivalenz-Distanz und nicht die wirkliche Distanz zwischen den beiden Detektoren. Die Äquivalenz-Distanz wird vom Messverhalten der beiden Detektoren beeinflusst. Sie kann durch eine Probefahrt gemessen werden oder über Mittelwert- oder Perzentil-Betrachtungen aus den Messwerten beobachtet werden.

Die Resultate sind im Abschnitt [6.3](#) ab dem Zwischentitel «[Geschwindigkeit in Zufahrt 111.12 \(Zollikon\)](#)» gezeigt.

4.3.2 Fahrzeugklassen

In der Einführung ist der Versuch, Fahrzeugklassen zu erkennen, nicht erwähnt worden. Es ist schwierig, aus den Signalen der beiden, häufig nicht aufeinander abgestimmten Detektoren Rückschlüsse auf die Fahrzeuglänge zu ziehen allein aus der recht genau ermittelbaren Geschwindigkeit (siehe vorhergehenden Abschnitt) und den zeitlichen Abständen der steigenden und fallenden Flanken der beiden Detektoren.

Klassenschwellwerte k_1 und k_2

Ziel ist es, drei Fahrzeugklassen erkennen zu können: Autos, Lieferwagen und Lastwagen. Dazu werden zwei Klassenschwellwerte benötigt, k_1 und k_2

- b_1 und b_2 werden in 3 Impulslängen klassiert. Dazu wird eine Referenz-Impulslänge über die letzten n Impulse von fahrendem Verkehr gebildet, welche die Schwellwerte k_1 und k_2 als Klassenschwellen für Velos, Motorräder und Autos nachführt.

Verhältnisse f_1 , f_2 und b

Folgende 3 Verhältnisse werden zur weiteren Betrachtung berechnet:

- Verhältnis der 1. Belegungszeit zum zeitlichen Abstand der fallenden Flanken: $f_1 = \frac{b_1}{t_f}$
- Verhältnis der 2. Belegungszeit zum zeitlichen Abstand der fallenden Flanken: $f_2 = \frac{b_2}{t_f}$
- Verhältnis der Belegungszeiten: $b = \frac{b_1}{b_2}$

f_2 eignet sich am besten für die Erkennung verschiedener Fahrzeugklassen (Auto, Lieferwagen, Lastwagen).

Bei manchen Doppeldetektoren muss dabei b_1 zur Ergänzung verwendet werden bzw. f_1 , vor allem dann, wenn der 2. Detektoren Lastwagen wegen des Abstands der Ladefläche zur Fahrbahn nicht erkennen kann oder auch Autos den Lieferwagen zuordnet.

Die Resultate sind im Abschnitt [6.3](#) gezeigt.

Schwierigkeiten

Bei Induktionsschleifen misst man häufig nicht wirklich die Fahrzeuglänge, sondern man erfährt mehr über die Menge Metall oder über den Abstand des Fahrzeugbodens von der Fahrbahn. Bei Videodetektoren sind solche Effekte weniger ausgeprägt: der Blickwinkel spielt dort eine Rolle, der jedoch konstant ist; und Kontrast-Unterschiede zwischen verschiedenen Fahrzeugtypen mögen einen Einfluss haben.

In den Versuchsgebieten gab es jedoch keinen Standort mit ausschliesslich Videodetektoren: mindestens einer der Doppeldetektoren war immer eine Induktionsschleife.

Auf den Induktionsschleifen gibt es am Zollikerberg massige Mercedes-Kleinbusse oder auch vielleicht etwas gepanzerte Mercedes-Limousinen, die magnetisch wie etwas zwischen Lieferwagen und Lastwagen aussehen. Oder auch SUV erzeugen häufig lange Belegungen. Auf der anderen Seite sieht das Signal einer Induktionsschleife für einen hochbeinigen Jeep manchmal fast wie ein Motorrad aus und ein Baustellen-Kipplastwagen mit entsprechend grossem Radumfang wie ein Lieferwagen.

Und jeder Detektor ist etwas anders eingestellt. Der 1. Detektor ist meist sehr empfindlich eingestellt, damit auch Zweiräder erkannt werden können. Der 2. Detektor ist eher unempfindlich eingestellt, so dass er zum Teil Lastwagen gar nicht erkennt.

Im Fall solcher Detektionslücken des 2. Detektors muss man versuchen, aus der Länge des Impulses des ersten Detektors Rückschlüsse zu ziehen. Das ist aber nur bei fahrendem Verkehr möglich.

4.4 Anfahrverhalten

Es gilt abzuklären, ob das Anfahrverhalten von wartenden Autoschlangen Rückschlüsse über die Zusammensetzung der Fahrzeugtypen zulässt, vor allem die Schätzung des Lastwagen-Anteils. Eine rote Ampel ist so gut wie ein Detektor – dieser Satz gilt vor allem in der Welt der kommunizierenden Fahrzeuge, aber man sieht ihn auch hier bestätigt.

Dazu wird jede Fahrzeugkolonne bezüglich Bruttozeitlücken ausgemessen, sobald sie sich bei Grün in Bewegung setzt. Nachteil ist, dass man den Verkehr ohne Halt nicht erfasst. Vorteil ist, dass man beim Anfahren Messungen machen kann, die sonst nicht möglich wären.

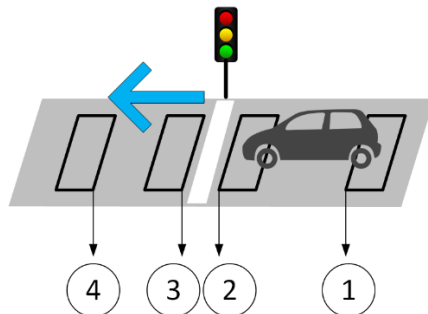


Abb. 33 Detektoren für Messung des Anfahrverhaltens

Es gibt vier Detektorlagen, welche man für das Messen des Anfahrverhaltens verwenden kann:

1. In der Zufahrt zum Lichtsignal mit einer maximalen Distanz von 5 m vor der Haltelinie. So ist sichergestellt, dass das vorderste Fahrzeug, das vor dem Lichtsignal bei Rot wartet, noch auf dem Detektor steht.
2. Gerade vor der Haltelinie
3. Gerade nach der Haltelinie
4. Ein Stück entfernt nach der Haltelinie

Für die Fälle 3 und 4 achtet man auf die steigende Detektorflanke. Für das erste Fahrzeug misst man die Dauer vom Grün-Beginn bis zur ersten steigenden Flanke des Detektors und subtrahiert die angenommene Fahrzeit von der Halteposition bis zum Detektor. Dies entspricht dann der Bruttozeitlücke zu einem fiktiven nullten Fahrzeug. So kann man auf die eigentlich Reaktionszeit des ersten Fahrzeugs schließen. Für einen Fall 3 kann diese zu subtrahierende Dauer fast 0 sein, für den Fall 4 muss man einen Wert annehmen bzw. über Vergleichsmessungen mit anderen Fällen oder durch Angleichung der Verteilungsfunktionen (siehe «[Eichen der ersten gemessenen Zeit](#)» weiter unten) bestimmen.

Für die Fälle 1 und 2 muss für das erste Fahrzeug auf die fallende Detektorflanke geachtet werden. Je nach Lage von Fall 1 kann man auf der Dauer von Grün-Beginn bis zur ersten fallenden Flanke direkt die Reaktionszeit des ersten Fahrzeugs bestimmen. Für den Fall 2 muss man von der gemessenen Dauer eine angenommene Fahrzeit über den Detektor subtrahieren.

Entweder bleibt man dann bei der Messung der Bruttozeitlücken zwischen den fallenden Flanken oder man stellt um auf die steigenden Flanken, muss dann aber zwischen der ersten fallenden Flanke und der folgenden steigenden Flanke die so gemessene Nettozeitlücke in eine Bruttozeitlücke umrechnen, auch wieder unter Annahme einer konstanten Fahrzeit.

Es versteht sich auch hier von selbst, dass die Eingangssignale zuerst auf Störungen überprüft werden müssen. Dies geschieht, wie im Abschnitt [4.2](#) beschrieben. Anschliessend können die vorverarbeiteten Signale zur Messung der Bruttozeitlücken gemäss [Abb. 33](#) verwendet werden.

Eichen der ersten gemessenen Zeit

Die nächsten Abbildungen zeigen die Verteilungen von gemessenen Reaktionszeiten, für das erste Fahrzeug von Grün-Beginn bis zur steigenden Flanke auf dem Detektor hinter der Haltelinie (Fall 4), für die folgenden Fahrzeuge zwischen den steigenden Flanken.

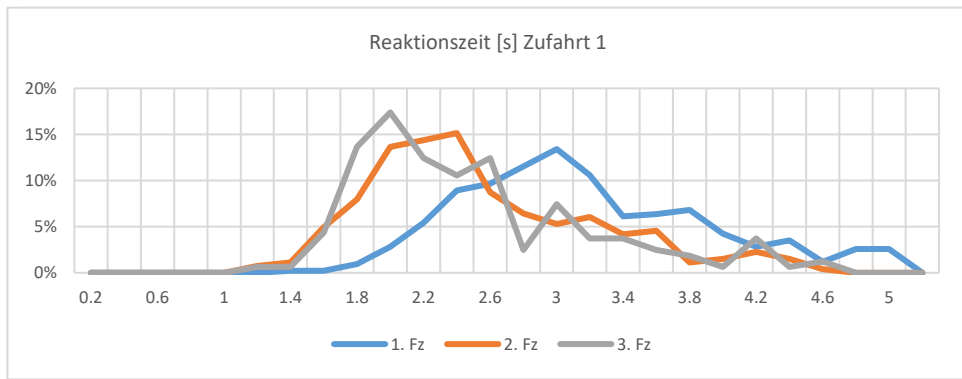


Abb. 34 Reaktionszeiten in der Zufahrt von Osten ([ZUCH 10](#))

Die Eichung geschieht dadurch, dass die Kurve der Reaktionszeit des 1. Fahrzeuges den Kurven des 2. und des 3. Fahrzeugs angeglichen wird. Ein bewährter Ansatz ist, dass das Maximum der Verteilungsfunktion der Werte des 1. Fahrzeuges in die Mitte der beiden anderen Maxima zu liegen kommt.

Verteilung der Anfahr-Abstände

Nach der Bestimmung des Offsets wird zur Kontrolle die Verteilung der Bruttozeitlücken einmal für alle Fahrzeuge berechnet und einmal ohne das erste Fahrzeug, welches bei Grün losfährt. Die beiden Kurven sollten in etwa deckungsgleich sein, wenn man davon ausgeht, dass die «Schrecksekunde» des ersten Fahrzeugs nach dem Wechsel der Ampel auf Grün in etwa der Reaktionszeit der folgenden Fahrzeuge nach dem Anfahren des vorherfahrenden Fahrzeugs entspricht.

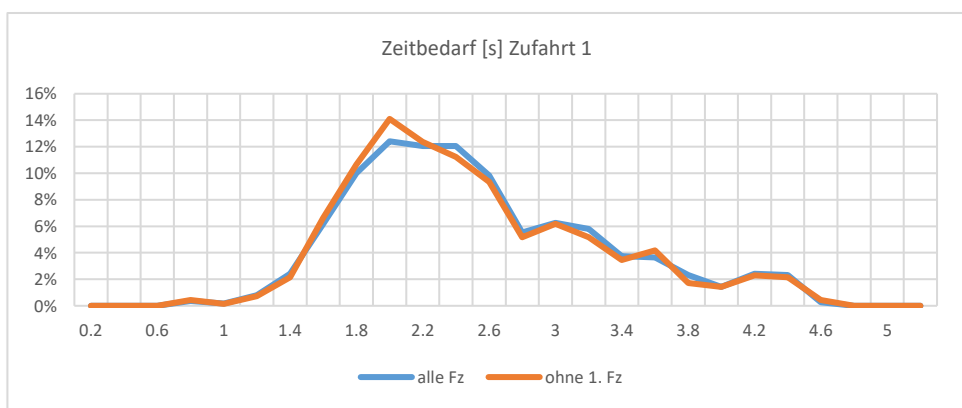


Abb. 35 Verteilung aller Bruttozeitlücken bzw. des Zeitbedarfswerts

Man sieht hier deutlich, dass das Maximum der Verteilungsfunktion ohne das erste Fahrzeug breiter ist und von etwa 2.0 bis 2.6 geht. Das lässt auch einen höheren Anteil von Schwerverkehr schliessen, vor allem an erster Position vor dem roten Lichtsignal.

Im Abschnitt [6.7](#) werden Beispiele und Resultate mit der Messung des Anfahrverhaltens gezeigt.

4.5 Kolonnenverhalten

Manchmal befinden sich eine Reihe von Rückstau-Detektoren in einer Zufahrt. Diese Detektoren kann man dazu verwenden, das Fahrverhalten einer sich stauenden Kolonne zu beobachten und Rückschlüsse bezüglich der der Koordinationsgüte zu ziehen.

Die nächste Abbildung zeigt so etwas wie eine «übliche Koordination»: die meisten Fahrzeuge schwimmen in der Grünen Welle, nur das letzte Fahrzeug oder die letzten Fahrzeuge schaffen es nicht mehr und müssen auf das nächste Grün warten¹¹.

- Grüne Pfeile zeigen gut koordinierten Verkehr – exemplarisch die ersten und die letzten Fahrzeuge eines Pulks.
- Rote Pfeile zeigen Fahrzeuge, die anhalten müssen und auf das nächste Grün warten.
- Gelbe Pfeile zeigen bremsende Fahrzeuge, weil sich der Pulk vor der Ampel erst abbauen muss, bevor sie diesen Fahrzeuge folgen können.

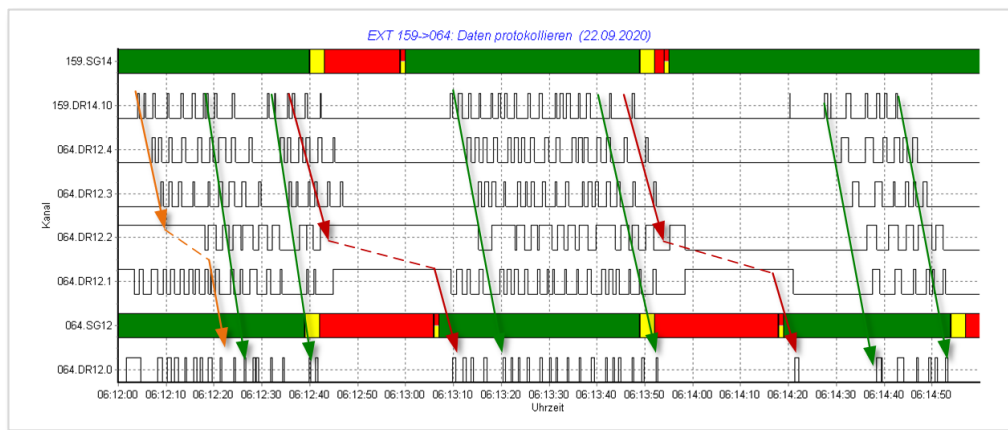


Abb. 36 Kolonnenverhalten bei üblicher Koordination

Die nächste Abbildung zeigt Fälle, wo die Koordination auseinander gebrochen ist. Man sieht deutlich, wie die obere und die untere Signalgruppe nicht mehr aufeinander abgestimmt wirken. Entsprechend schaffen es auch nur die wenigsten Fahrzeuge, die zweite Signalgruppe ohne abzubremsen zu überqueren.

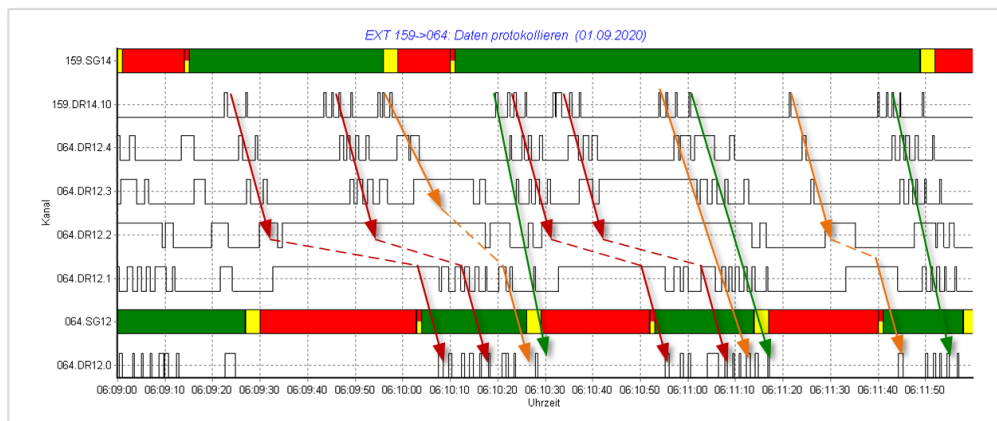


Abb. 37 Kolonnenverhalten bei unterbrochener Koordination

Die Identifikation von Fahrzeuggruppen, die Erkennung von Dauerbelegungen und die Berücksichtigung der Grünzeiten führt zu einem mesoskopischen Modell, in welchem nicht mehr jeder Fahrzeug einzeln verfolgt werden muss. Das ermöglicht es, Koordinationsbrüche zu erkennen und ihre Auswirkung auf die Qualität des Verkehrsflusses zu errechnen.

Ein verwandtes Thema ist die [Verfolgung von Fahrzeugen](#) im Anhang [VI](#).

¹¹ Die koordinierte Strecke befindet sich in Wetzikon ZH

5 Ergebnisse: Zählgenauigkeit

5.1 Zählgenauigkeit in Zufahrt SOLO_16 1 (West)

Die nächste Abbildung zeigt die Zählungen von vier zum Zählen geeigneten Detektoren:

- D1.3 (Schema siehe rechts von [Abb. 38](#)) ist ein Anmeldedetektor. Er liegt in einem Bereich, in dem er zyklisch überstaut wird und dann ab und zu aufeinander folgende Motorfahrzeuge nicht voneinander unterscheiden kann. Er übersieht auch manchmal ganz einfach ein Motorfahrzeug.
Er zählt am wenigsten Verkehr.
- D1.1 liegt vor der Haltelinie für den Motorfahrzeugverkehr. Seine Geometrie ermöglicht eine hohe Zählgenauigkeit, denn er unterscheidet aufeinander folgende Motorfahrzeuge sehr gut.
Er zählt so gut wie alle Motorfahrzeuge.
- D1.5 zählt Motorfahrzeuge etwa gleich gut wie D1.1, aber zusätzlich zählt er auch die Velos.
Er zählt am meisten Verkehr.
- RL1 zählt Motorfahrzeuge ebenfalls etwa gleich gut wie D1.1, sieht jedoch nicht alle Motorräder oder auch Kleinfahrzeuge.

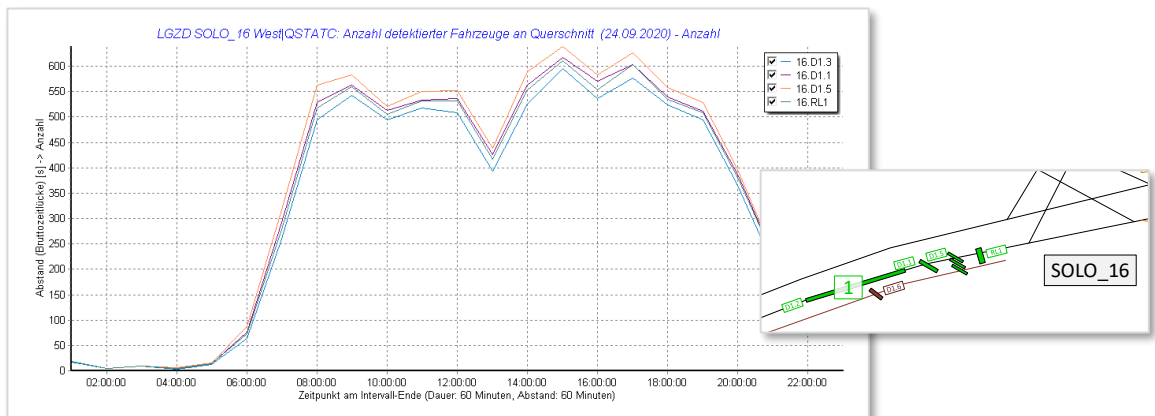


Abb. 38 Vergleich der Zählwerte in Zufahrt [SOLO_16 1](#)

Tabellarisch kann man folgendes festhalten bezüglich Zählgenauigkeit der hier betrachteten Detektoren:

Detektor	Motorfahrzeuge	Velos	Motorräder	Abweichung zu D1.1
D1.3	fast alle	nein	selten	-5 %
D1.1	ja	nein	ja	
D1.5	ja	ja	ja	4 %
RL1	fast alle	nein	nicht alle	-1 %

Tab. 39 Zähl-Eigenschaften der Detektoren in Zufahrt [SOLO_16 1](#)

Wir stellen fest, dass die Zählwerte von D1.1 und RL1 um etwa 1 % voneinander abweichen.

- Man darf sie in einem Toleranzbereich von ± 1 % als äquivalent einstufen.
- In einem Toleranzbereich von ± 5 % sind alle erwähnten Detektoren der Zufahrt äquivalent.

Zählt man die Fahrzeuge ohne Korrektur von prellenden oder fehlenden Impulsen, so erreicht man die folgende Güte, überprüft mit Handzählungen (24.09.2020, 15:36 bis 16:13):

Detektor	Motorfahrzeuge	Velos	Motorräder	Total	Abweichung zur Handzählung
von Hand	333	13	7	353	
D1.3	315				6 %
D1.1	339				< 1 % (-40 %)
D1.5	349				+1 % (+15 %)
RL1	334				< 1 %

Tab. 40 Zählgenauigkeit der Detektoren in Zufahrt [SOLO 16 1](#)

Folgendes Resultat kann man beobachten:

- **RL1** zählt die Motorfahrzeuge mit einem Fehler, der kleiner als 1 % ist bzw. mit einer Genauigkeit von über 99 %.
- **D1.5** zählt die Summe von Motorfahrzeugen und Velos mit einem Fehler von 1 % bzw. einer Genauigkeit von 99 %.
 - Die Differenz von RL1 und D1.5 ist 15 anstelle von 13 Velos. Wahrscheinlich sind 2 Motorräder mit gezählt worden. 15 anstelle von 13 entspricht einem Fehler von etwa 15 % bzw. einer Genauigkeit von 85 %.
 - Allerdings muss man feststellen, dass etwa noch einmal 50 % so viel Velos unterwegs sind, jedoch auf dem Trottoir, und dadurch nicht gezählt werden.
- Die Motorräder werden auf Detektor **D1.1** mit gezählt. Er zählt die Summe von Motorfahrzeugen und Motorrädern mit einem Fehler von < 1 % bzw. einer Genauigkeit von > 99 %.
 - Die Differenz von RL1 und D1.1 ist 5 anstelle von 7 Motorrädern. Das entspricht einem Fehler von etwa -40 % bzw. einer Genauigkeit von etwa 60%. Das ist nicht brauchbar.
- Der Vollständigkeit halber ist **D1.3** auch erwähnt. Bei Stau kann er manche Fahrzeuge nicht voneinander unterscheiden, was zu 6 % weniger gezähltem Verkehr führt.

5.1.1 Erhöhung der Zählgenauigkeit

Detektor	Motorfahrzeuge	Velos	Motorräder	Total	Abweichung zur Handzählung	
von Hand	333	13	7	353		
D1.3	315					6%
D1.1	339	332			< 1% (-40%)	< 1% (Verlust)
D1.5	349	347			+1% (+15%)	< 1% (+7%)
RL1	334	333			< 1%	exakt

Tab. 41 Erhöhte Zählgenauigkeit der Detektoren in Zufahrt [SOLO 16 1](#)

Die Tabelle zeigt verdoppelte Zellen für die Kolonnen «Motorfahrzeuge» und «Abweichung zur Handzählung». Die linken Tabellenfelder zeigen die ursprünglichen Werte aus [Tab. 40](#), die rechten Tabellenfelder die Werte nach Erhöhung der Zählgenauigkeit. Folgendes Resultat kann man beobachten:

- **RL1** zählt die Motorfahrzeuge nun exakt.
- **D1.5** zählt die Summe von Motorfahrzeugen und Velos mit einem Fehler von 1 % bzw. einer Genauigkeit von 99%.
 - Die Differenz von RL1 und D1.5 ist nun 14 anstelle von 13 Velos. Das entspricht einem Fehler von etwa 7 % bzw. einer Genauigkeit von 93%.
- Die Motorräder werden auf Detektor **D1.1** ihrer Abstände wegen als Anhänger erkannt und dadurch herausgefiltert. Der Detektor zählt somit nur noch die Motorfahrzeuge mit einem Fehler von < 1 % bzw. einer Genauigkeit von > 99 %.

Grundlage zur Erhöhung der Zählgenauigkeit ist die Ausfilterung von Prellungen, Störungen und Anhängern aus den rohen Detektorsignalen, bevor sie zur Zählung verwendet

werden. Die Filterung basiert auf einem Grenzwert von kurzen Nettozeitlücken, welche nicht zu aufeinander folgenden Fahrzeugen gehören können.

Die Vorverarbeitung von Rohsignalen von Einzeldetektoren ist in Kapitel [4.2.3](#) beschrieben.

Die erreichbare Genauigkeit durch Kombination von nicht vorverarbeiteten und vorverarbeiteten Signalen ist in der Einführung in [Tab. 3](#) gezeigt.

Die nächste Abbildung zeigt die Verteilungsfunktionen der Nettozeitlücken der relevanten Detektoren D1.1, D1.5 und RL1.

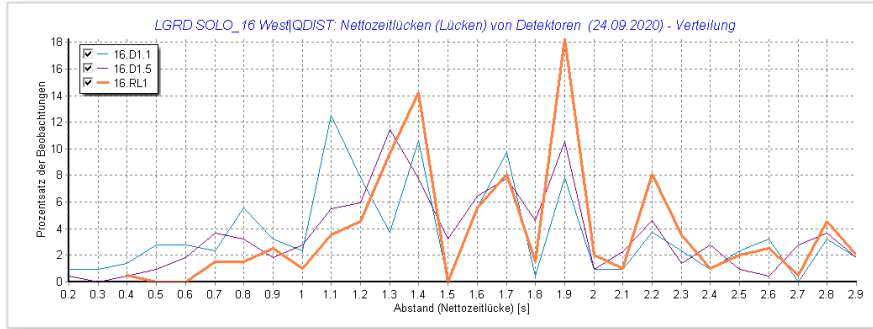


Abb. 42 Verteilungsfunktionen der Nettozeitlücken in Zufahrt [SOLO 16 1](#)

Die Grenze ist anhand der Kurve von RL1 zwischen 0.5 und 0.6 s gesetzt worden. Bei den anderen Kurven ist es weniger klar, wo die Verteilung der kurzen Nettozeitlücken aufhört und die Verteilung der normalen, langen Nettozeitlücken beginnt.

5.1.2 Gesamtbetrachtung der Zählgenauigkeit

Folgendes Detektionsverhalten kann festgestellt werden:

- Nur Detektor D1.5 detektiert Velos (V).
- Alle Detektoren detektieren Motorfahrzeuge (MFZ) und auch Motorräder (MR), Motorräder aber häufig unzuverlässig

Die Vorverarbeitung der Messungen gemäss [Signalanalyse am Einzeldetektor](#) bringt folgende Veränderungen mit sich:

- Keiner der Detektoren detektiert mehr Motorräder.

Das ist auf ihr Fahrverhalten zurückzuführen, und zwar insbesondere auf den Abstand in einer anfahrenden Kolonne, welcher dem eines Anhängers gleicht.

Detektor	Erkannte Fahrzeugklassen		Abweichung zu Handzählung	
	unkorrigiert	korrigiert	unkorrigiert	korrigiert
D1.3	MFZ und MR	MFZ	-7.4 %	-5.4 %
D1.1	MFZ und MR	MFZ	-0.3 %	-0.3 %
D1.5	MFZ, MR und V	MFZ und V	-1.1 %	0.3 %
RL1	MFZ und MR	MFZ	-1.8 %	0 %

Tab. 43 Zähl-Eigenschaften der Detektoren in Zufahrt [SOLO 16 1](#)

Velos und Motorräder

In [Tab. 43](#) sieht man, dass der korrigierte Detektor RL1 die Motorfahrzeuge richtig zählt.

- D1.5 zählt neben den Motorfahrzeugen auch die **Velos**. Differenzbildung führt zur experimentell gemessenen Fehlerrate von **-7 %**.
- Unkorrigiert zählt D1.1 mit der höchsten Genauigkeit die Summe von Motorfahrzeugen und **Motorrädern**. Die Differenzbildung mit der Anzahl Motorfahrzeuge führt hier zu einer gemessenen Fehlerrate von **-17 %**.

5.2 Zählgenauigkeit in Zufahrt SOLO_16 3 (Ost)

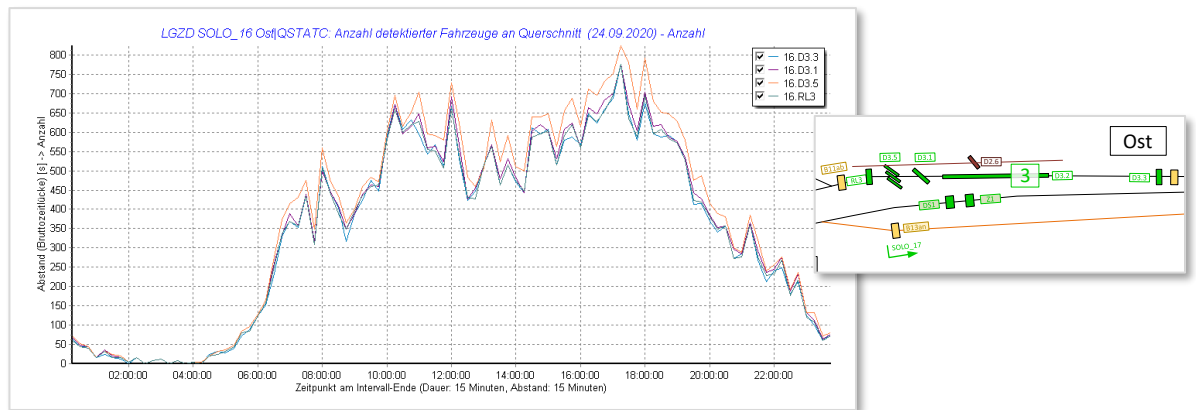


Abb. 44 Vergleich der Zählwerte in Zufahrt [SOLO_16 3](#)

Die folgende Tabelle zeigt, dass auch hier der Rotlichtdetektor RL3 weniger Verkehr zählt als der Haltelinien-detektor D3.1. Detektor 3.5, welcher auch die Velos zählen kann, zählt hier 7 % mehr Verkehr als D3.1, was einerseits auf einen grösseren Veloanteil zurückzuführen ist, erhöht um die Velos, welche in die Nordwegfahrt abbiegen, eine Veloroute, aber andererseits auch durch eine festgestellte Tendenz zum Prellen.

Detektor	Abweichung zu D3.1
D3.3	-3 %
D3.5	7 %
RL3	-2 %

Tab. 45 Zähl-Eigenschaften der Detektoren in der Zufahrt [SOLO_16 3](#)

Zählt man die Fahrzeuge ohne Korrektur von prellenden oder fehlenden Impulsen, so erreicht man die folgende Güte, überprüft mit Handzählungen (24.09.2020, 15:41 bis 16:18):

Detektor	Motorfahrzeuge	Velos	Motorräder	Total	Abweichung zur Handzählung
von Hand	364	40	9	411	
D3.3	367				+1 %
D3.1	372				< 1 % (-12 %)
D3.5	402				< 1 % (5 %)
RL3	367				+1 %

Tab. 46 Zählgenauigkeit der Detektoren in Zufahrt [SOLO_16 3](#)

Folgendes Resultat kann man beobachten:

- **RL3** und **D3.3** zählen beide die Motorfahrzeuge mit einem Fehler von etwa +1 %, d.h. einer Genauigkeit von etwa 99 %.
- **D3.5** zählt die Summe von Motorfahrzeugen und Velos mit einem Fehler von < 1 %, d.h. einer Genauigkeit von > 99 %.
 - Die Differenz von RL3 und D3.5 ist 38 anstelle von 40 Velos. Das entspricht einem Fehler von etwa 5 % bzw. einer Genauigkeit von 95 %.
 - Allerdings muss man feststellen, dass etwa noch einmal 20 % so viel Velos unterwegs sind, jedoch auf dem Trottoir, auch in die Gegenrichtung, und dadurch nicht gezählt werden.
- Die Motorräder werden auf Detektor **D3.1** mit gezählt. Er zählt die Summe von Motorfahrzeugen und Motorrädern mit einem Fehler von etwa -1 % bzw. einer Genauigkeit von 99 %.
 - Die Differenz von RL3 und D3.1 ist 5 anstelle von 9 Motorrädern. Das entspricht einem Fehler von etwa -45 % bzw. einer Genauigkeit von 55 %. Das ist nicht brauchbar.

5.2.1 Erhöhung der Zählgenauigkeit

Detektor	Motorfahrzeuge	Velos	Motorräder	Total	Abweichung zur Handzählung	
von Hand	364	40	9	411		
D3.3	367	364			+1 %	exakt
D3.1	372	363			< 1 % (-12 %)	< 1 % (Verlust)
D3.5	402	396			< 1 % (5 %)	2 % (-20%)
RL3	367	365			+1 %	< 1 %

Tab. 47 Erhöhte Zählgenauigkeit der Detektoren in Zufahrt SOLO 16 3

- Wie schon in Zufahrt 1 verliert der Detektor «.1» (hier **D3.1**) die Eigenschaft, Motorräder zu zählen, wenn man die Rohsignale gegen Prellungen, Störungen und Anhänger filtert.
- Ebenso verliert hier der Detektor **D3.5** seine Eigenschaft, Velos zu zählen, wenn man sein Rohsignal filtert. In Zufahrt erhöhte sich dadurch seine Zählgenauigkeit um 1, was jedoch in den statistischen Schwankungen liegt.

Fazit: Detektoren, welche Motorräder und/oder Velos zählen, dürfen nicht bezüglich Prellungen, Störungen und Anhänger gefiltert werden, da die Signale von Velos und Motorrädern häufig solchen Mustern folgen. Dies rührt von kleineren Abständen (Motorrädern) oder von parallelem Fahren (Velos).

- **D3.3** erhöht hier durch die Filterung seine Genauigkeit auf «exakt»,
- **RL3** liegt mit einem zu viel gezählten Fahrzeug fast in derselben Genauigkeitsklasse.

Die nächste Abbildung zeigt die Verteilungsfunktionen der Nettozeitlücken aller Detektoren.

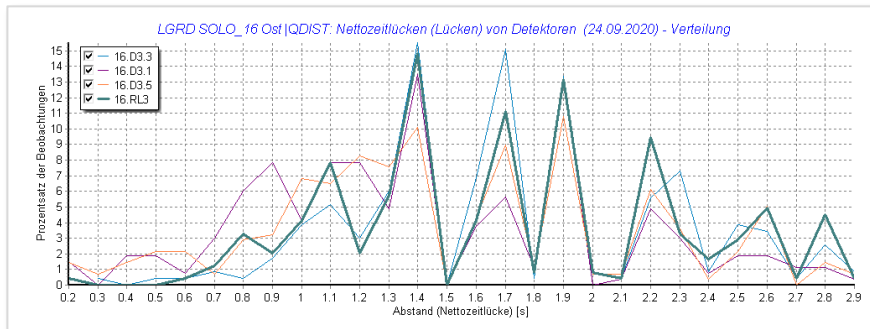
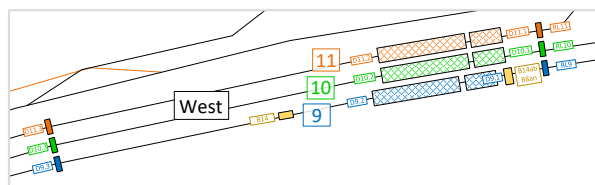


Abb. 48 Verteilungsfunktionen der Nettozeitlücken in Zufahrt SOLO 16 3

Die Grenzen sind für jeden Detektor einzeln ermittelt worden und liegen zwischen 0.4 und 0.7 s.

5.3 Zählgenauigkeit in Zufahrt ZUCH_10 West

Detektor	Zufahrt			Abweichung zu .1		
	9	10	11	9	10	11
.3	1 %	0 %	1 %			
RL	0 %	0 %	2 %			



Tab. 49 Zähl-Eigenschaften der Detektoren in der Zufahrt von ZUCH 10 West

Die Zählgenauigkeit ist äusserst hoch. Ausser in der mittleren Spur 10 hat der Haltelinien-detektor, als Referenz verwendet, die Tendenz zu leicht weniger Zählwerten.

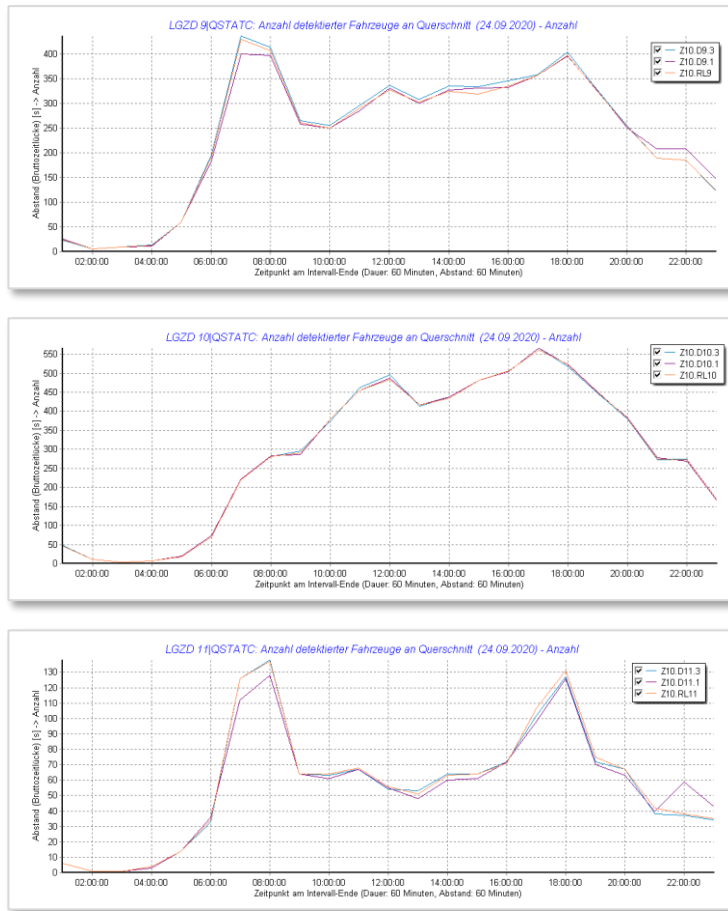
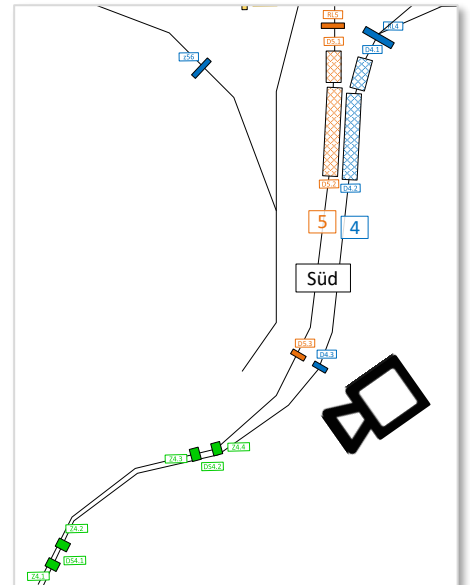


Abb. 50 Vergleich der Zählwerte in der Zufahrt von ZUCH 10 West

5.4 Zufahrten von Norden und Süden

Detektor	Zufahrt		Abweichung zu .1	
	12	4	5	4 und 5
Z12.1 Z4.1	12 %			0 %
Z12.2 Z4.2	5 %			-1 %
Z12	DS4.1	13 %		4 %
	Z4.3			-5 %
	Z4.4			-8 %
	DS4.2			40 %
.3		-18 %	39 %	
RL	8 %	3 %	1 %	



Tab. 51 Zähl-Eigenschaften der Detektoren in den Zufahrten von ZUCH 10 Nord und Süd

Die Gründe für die prozentualen Abweichungen bezüglich des Haltelinien-Detektors werden im Anschluss beleuchtet werden.

5.4.1 Süden

Z4.1 und Z4.2 bilden zusammen eine Doppelschleife, deren ODER-verknüpftes Resultat auch unter DS4.1 abgefragt werden kann.

Auch Z4.3 und Z4.4 bilden zusammen eine Doppelschleife, deren ODER-verknüpftes Resultat auch unter DS4.2 abgefragt werden kann.

Die Idee ist, dass man einerseits mit den beiden Schleifen zählen kann, da sie kurz genug sind, aufeinander folgende Fahrzeuge voneinander zu unterscheiden. Andererseits kann man sie als Staudetektor verwenden, wenn man die Signale der beiden Schleifen ODER-verknüpft und somit eine lange Schleife erzeugt. Dabei ist es wichtig, dass das Fahrzeug zwischen den Schleifen nicht in ein Detektions-Loch fällt und trotz Halts oder langsamen Fahrens keine der beiden Schleifen anspricht. Dafür muss der Abstand der Schleifen sorgfältig gewählt werden und auch die Empfindlichkeit der beiden Auswerteeinheiten der Detektoren.

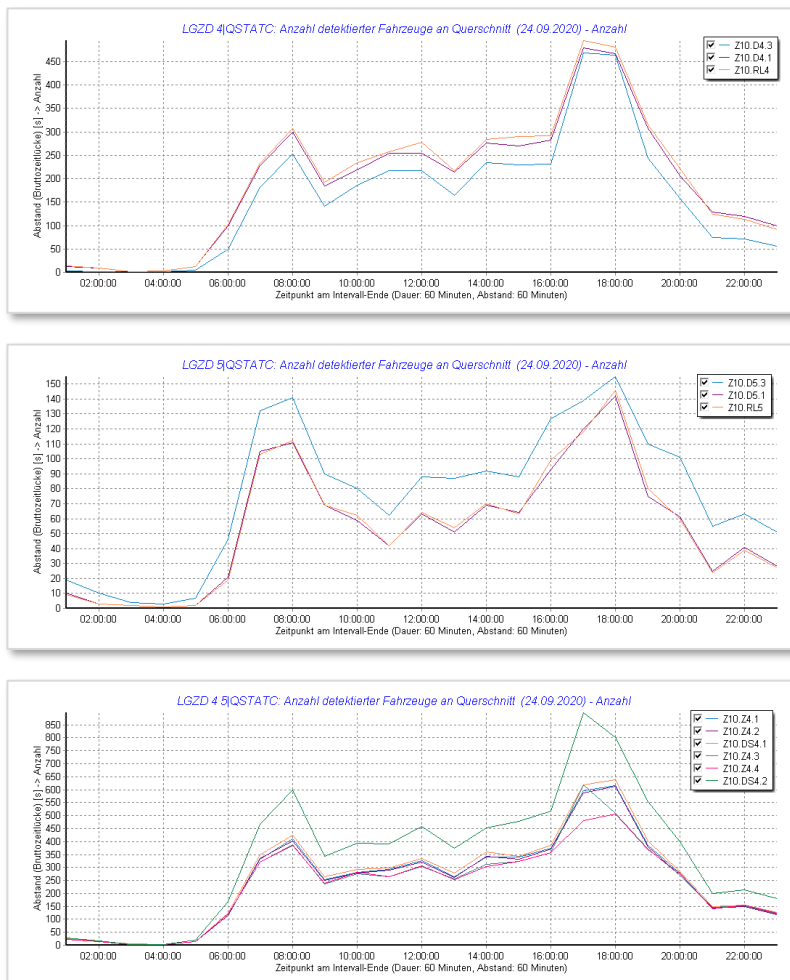


Abb. 52 Vergleich der Zählwerte in der Zufahrt von [ZUCH 10](#) Süd

Das erste Schleifenpaar Z4.1 und Z4.2 ist gut eingestellt, was in [Tab. 51](#) ersichtlich wird durch die kleinen Zählunterschiede bezüglich der an der Haltelinie gemessenen Fahrzeuge (0 %, -1 %, 4 %). Nur DS4.1 zählt manchmal Fahrzeuge doppelt, da sie zwischen den beiden Detektoren in eine Detektionslücke fallen.

Das zweite Schleifenpaar Z4.3 und Z4.4 ist nicht gut eingestellt. DS4.2 sieht häufig die Fahrzeuge doppelt, was zu etwa 40 % Fahrzeugen führt.

Das sieht man deutlich in der nächsten Abbildung an den eingekreisten Stellen.

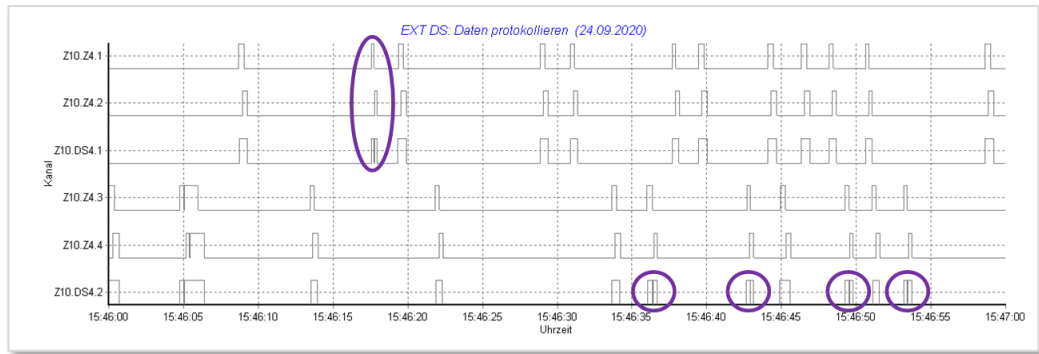


Abb. 53 Staudetektoren in der Zufahrt von ZUCH 10 Süd

Die nächste Abbildung zeigt unerkannte Fahrzeuge:

- Z4.4 sieht ein Fahrzeug nicht, welches Z4.3 gesehen hat.
- Weder D4.3 noch D5.3 erkennt ein Fahrzeug, welches gerade über die Staudetektoren gefahren ist.

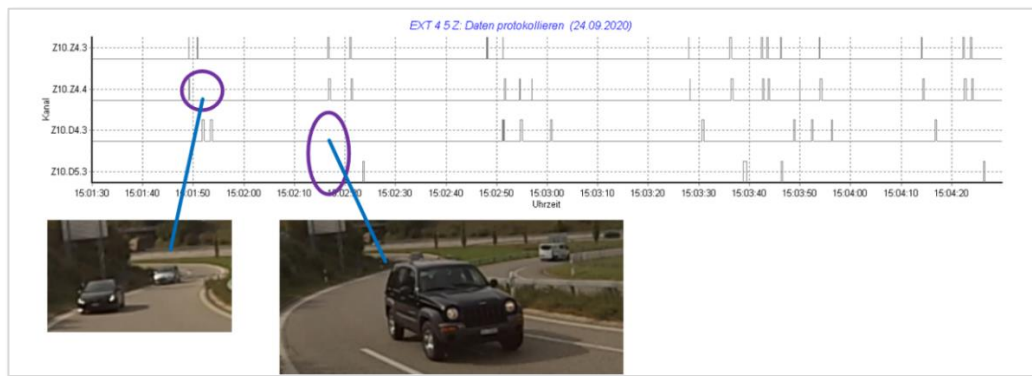


Abb. 54 Unterkannte Fahrzeuge

Auch Schwingen bei Dauerbelegung kann auftreten, in der nächsten Abbildung von Detektor Z4.3. Das wirkt sich natürlich auch auf Detektor DS4.2 aus. Die Tendenz zum Schwingen sieht man gut in der Verteilungsfunktion für kurze Nettozeitlücken.



Abb. 55 Schwingen von Z4.3 bei Dauerbelegung

5.4.2 Norden

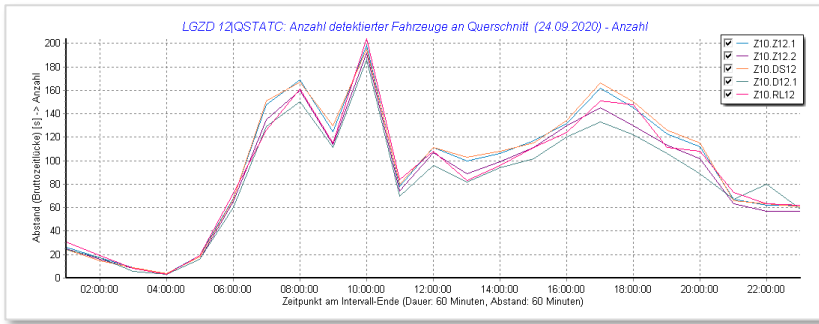


Abb. 56 Vergleich der Zählwerte in der Zufahrt von ZUCH 10 Nord

Der Rotlichtdetektor RL13 verschluckt manchmal
Folgefahrzeuge von Lastwagen:

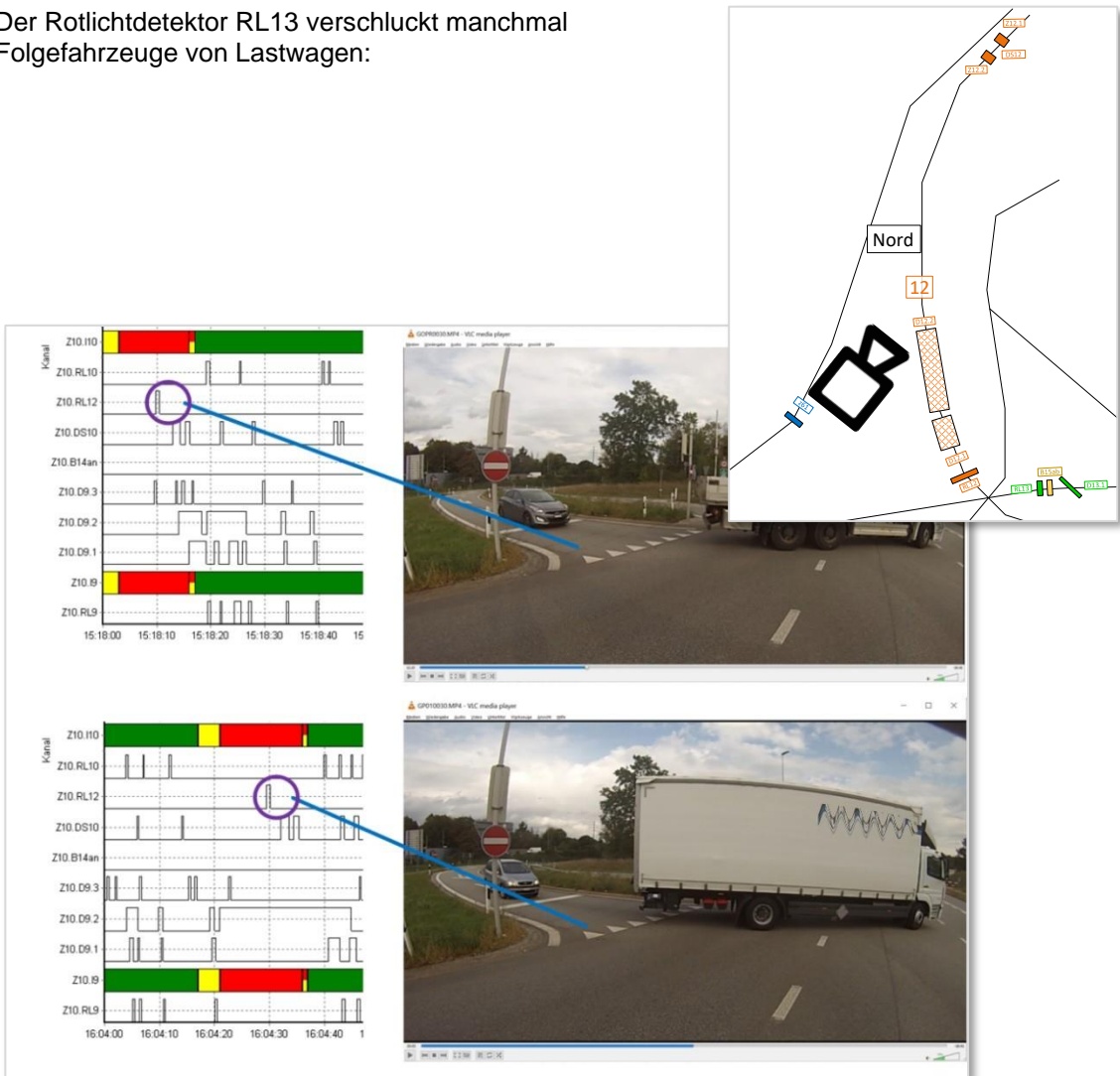


Abb. 57 RL13 verschluckt Folgefahrzeuge von Lastwagen

Bei Lastwagen hingegen detektiert er häufig das Zugfahrzeug separat.

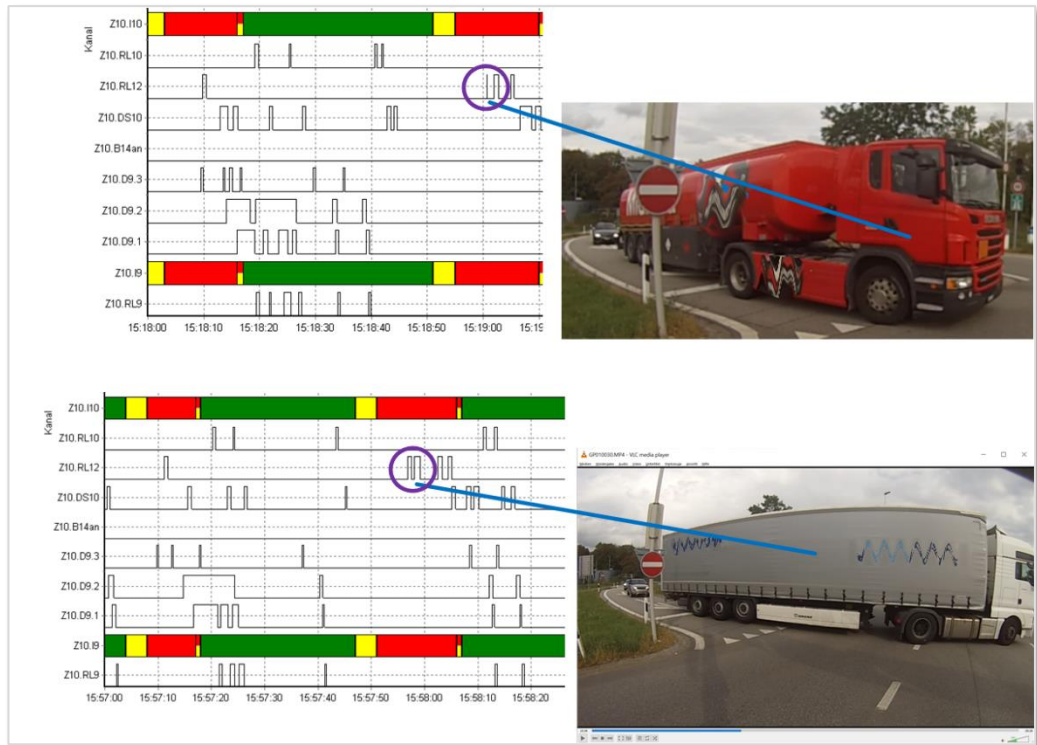


Abb. 58 RL13 detektiert Zugfahrzeuge

Sogar Kleinlastwagen mit Anhänger werden manchmal doppelt detektiert, allerdings ist in der nächsten Abbildung unerwarteterweise der Impuls des Kleinlastwagens viel kürzer als derjenige des Anhängers. Anschliessend verschluckt er den Impuls des Autos, welches einem Lastwagen gefolgt ist.

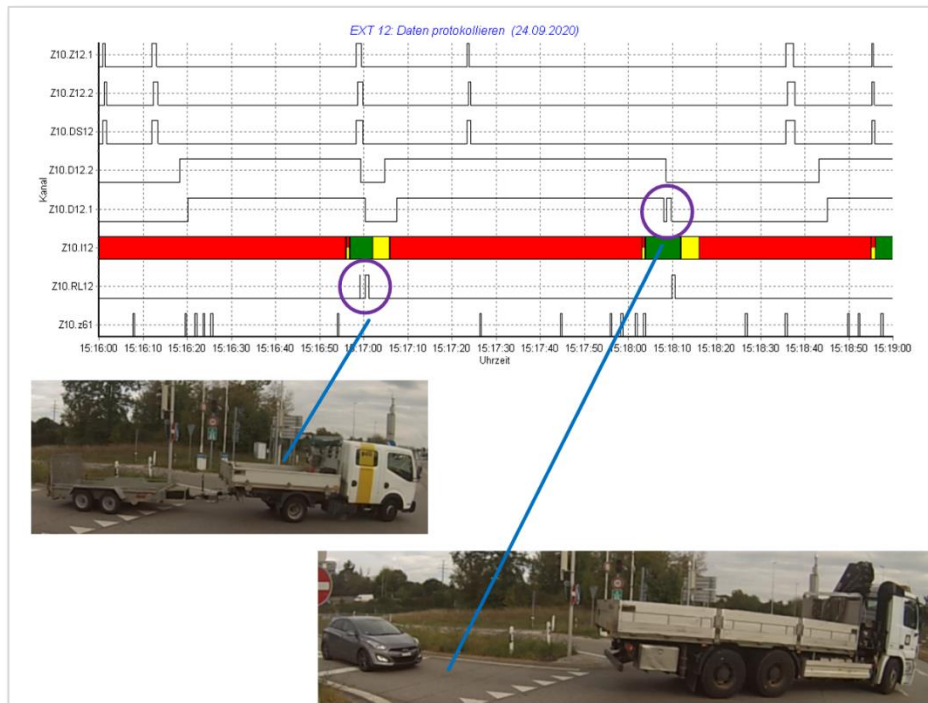
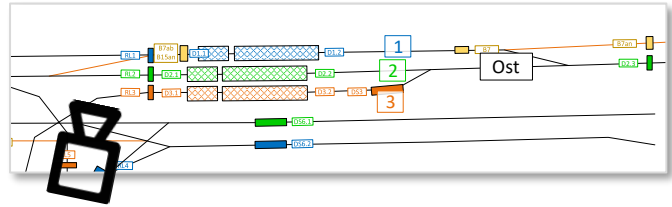


Abb. 59 RL13 detektiert Anhänger und vergisst Folgefahrzeug

5.5 Zufahrt von Osten

Detektor	Zufahrt		
	1	2	3
.3			-4 %
RL	0 %	2 %	1 %



Tab. 60 Zähl-Eigenschaften der Detektoren in der Zufahrt von ZUCH 10 Ost

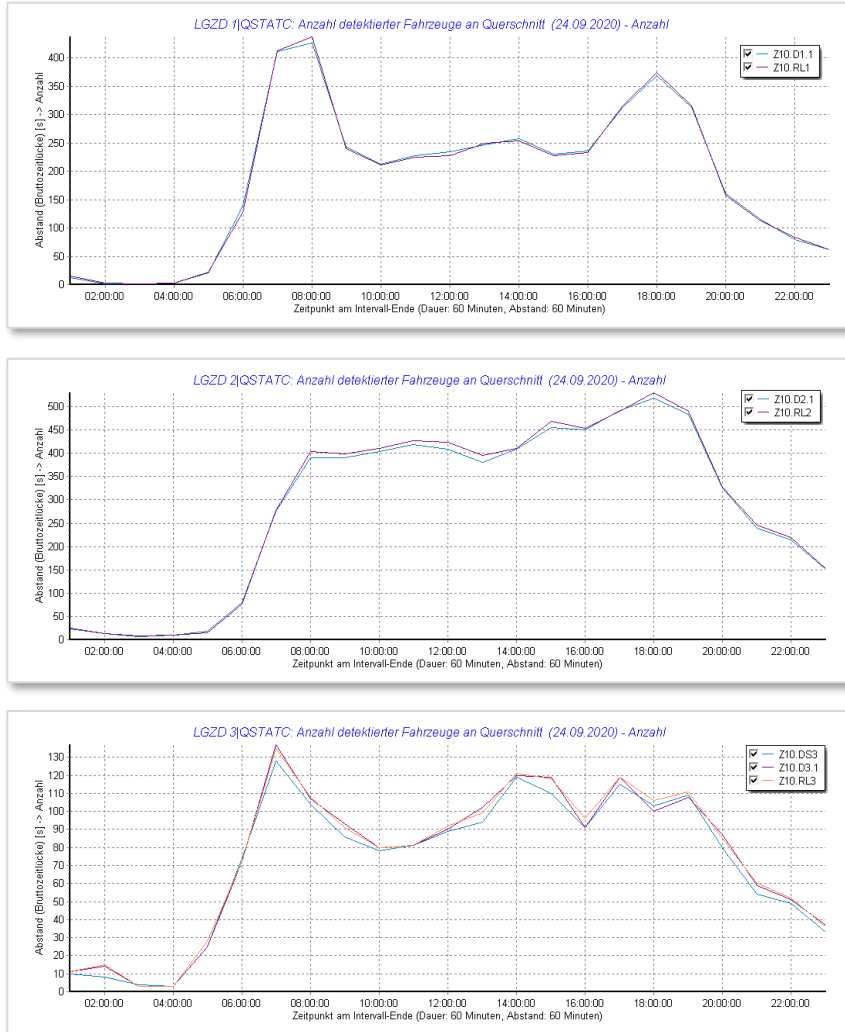


Abb. 61 Vergleich der Zählwerte in der Zufahrt von ZUCH 10 Ost

Auch hier kommt es beim Verlängerungsdetektor manchmal zu «optischen Prellern» bei gewissen Fahrzeugen, im Beispiel bei D1.2.

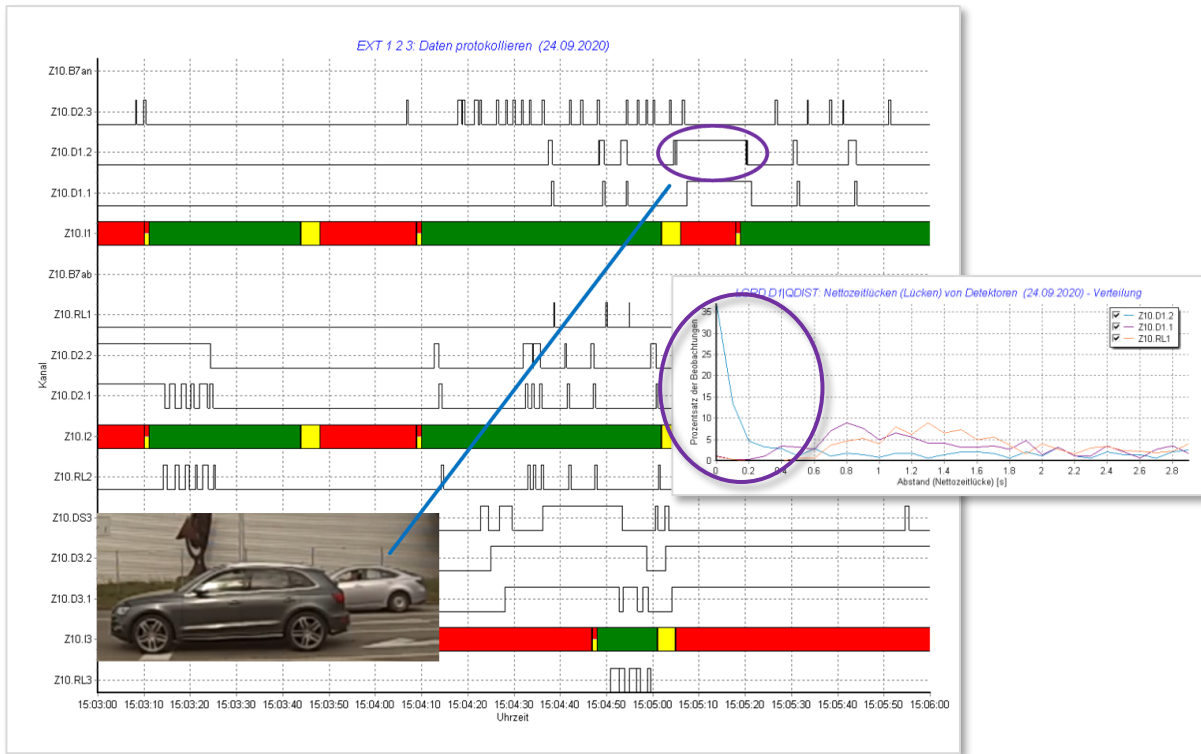


Abb. 62 Prellender Verlängerungs-Videodetektor

In der nächsten Abbildung führt die Fahrerkabine eines Lastwagens zu einem Preller auf dem Verlängerungs-Videodetektor.

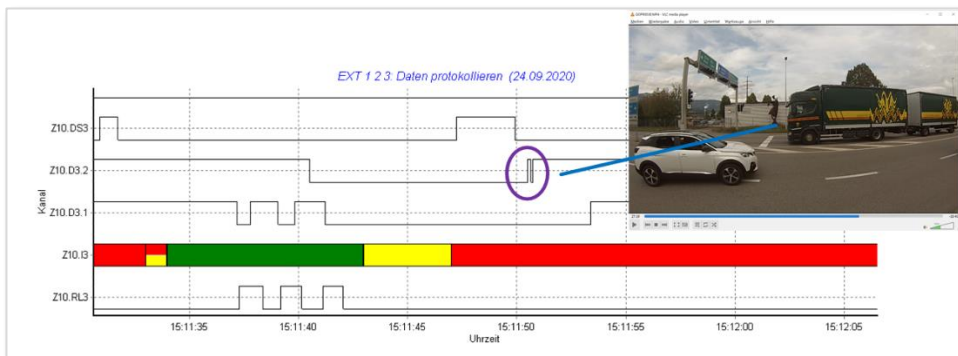


Abb. 63 Fahrerkabine auf Verlängerungs-Videodetektor

Auch der Schleifendetektor D2.3 prellt manchmal, hier bei der Überfahrt eines Sattelschleppers – wobei das Prellen eher ein Zählen der Achsen und Drehgestelle ist.

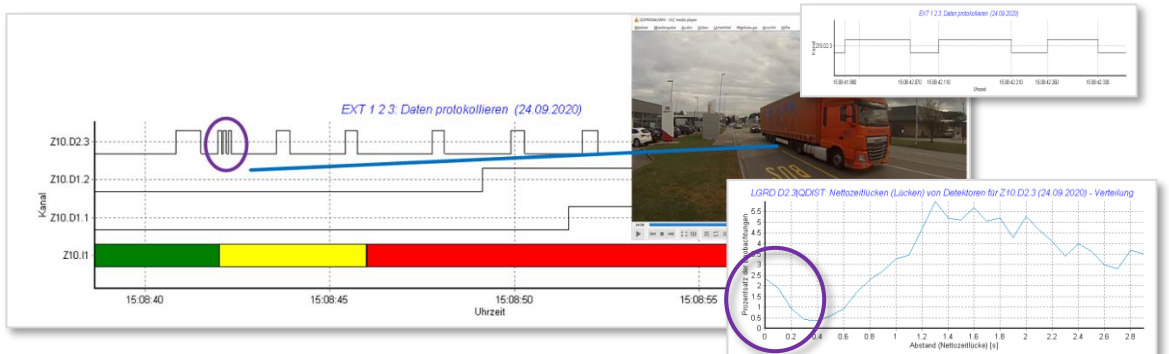


Abb. 64 Dreifaches Echo eines Sattelschleppers auf Schleifendetektor

Auch Anhängerzüge können zu mehreren Echos führen, hier auf dem Rotlichtdetektor RL3.

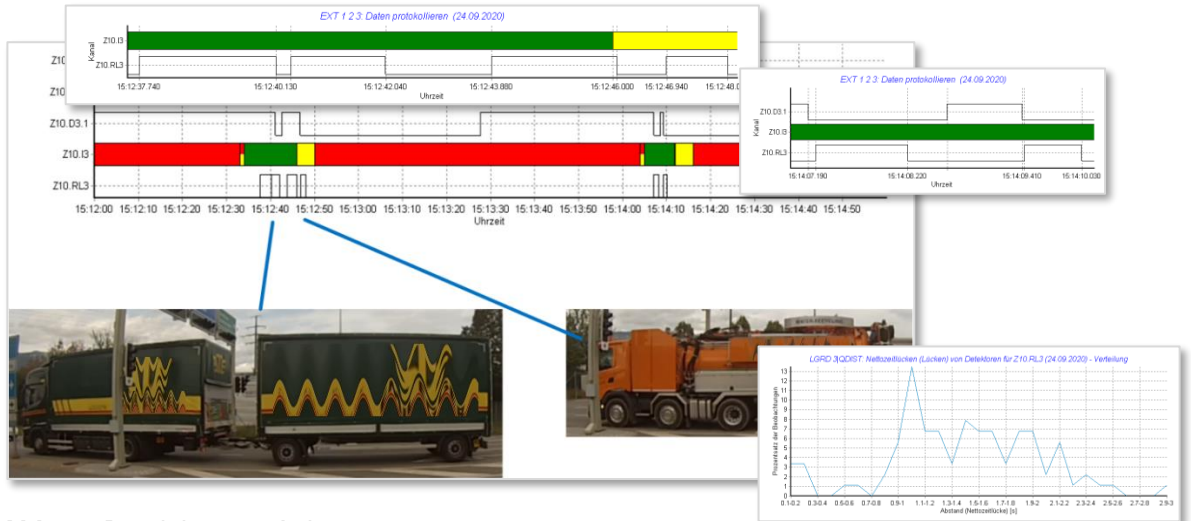


Abb. 65 Detektion von Anhängern

Der 2. Anhängerzug erzeugt eine Lücke von 0.94 s. Im nächsten Grün fahren 2 Fahrzeuge mit einer Lücke von 1.19 s. Das ist sehr knapp, und die Fälle sind entsprechend schwierig voneinander zu unterscheiden.

5.6 Brückenstück

	Zufahrt	Abweichung zu .1	
Detektor		6	13
RL		0 %	1 %

Tab. 66 Zähl-Eigenschaften der Induktionsschleifen an den Brückenenden

Die Induktionsschleifen um die Haltelinie («RL» und «.1») zählen beide sehr korrekt (Fehler maximal 1 %, d.h. Genauigkeit minimal 99 %). Die Präsenzdetektoren auf Videobasis in der Mitte der Brücke, «.2», sind zu lang, um einzelne Fahrzeuge korrekt erkennen zu können. Das wären sie auch als Induktionsschleifen. Bei Dunkelheit erkennen sie manchmal sogar zu viele Fahrzeuge, was auf die Scheinwerfer zurückzuführen ist.

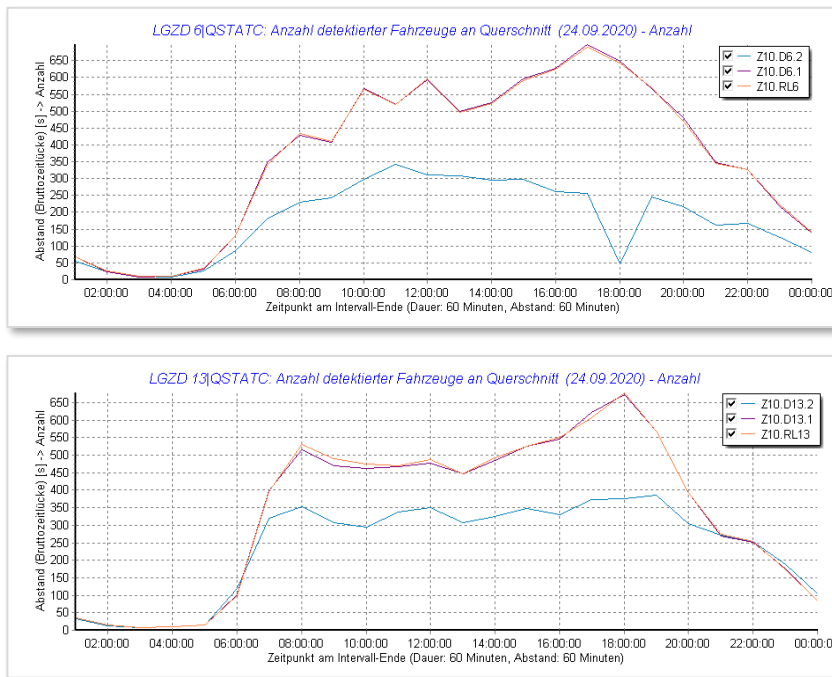


Abb. 67 Vergleich der Zählwerte auf der Brücke und an den Brückenenden

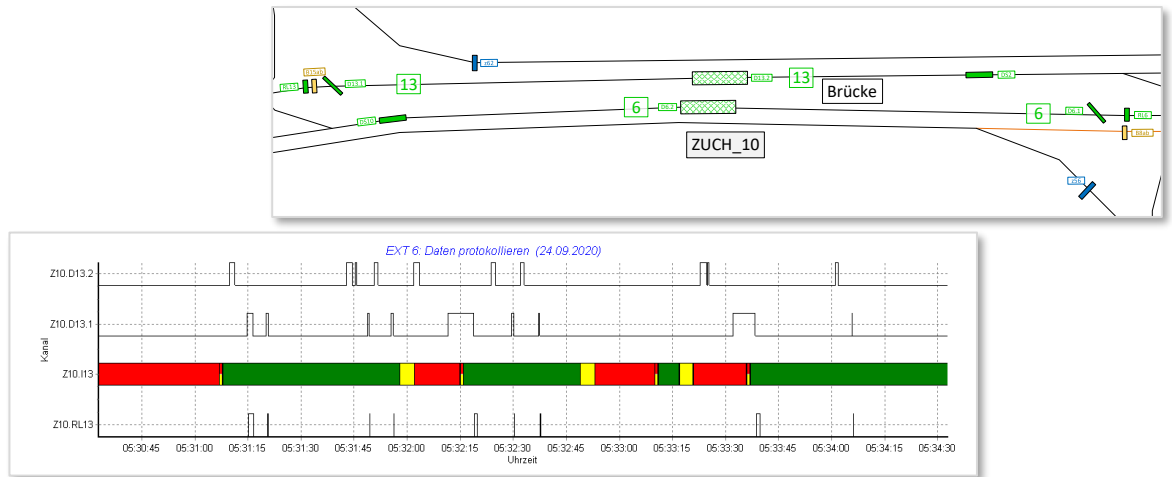


Abb. 68 Detektionssequenzen in Zufahrt 3

5.7 Vergleich mit einer Verkehrszählstelle

Kurz vor dem Detektor 110.DR11.4 in Fahrtrichtung Zollikon liegt die Zählstelle VDE 1288 (siehe Abb. 136). Sie ist in der Lage, Einzelfahrzeuge aufzuzeichnen. Deshalb können wir sie mit den Aufzeichnungen von Detektor 110.DR11.4 vergleichen. (Durch die Vertauschung zweier Anschlüsse wird der Detektor in den folgenden Abbildungen und Tabellen fälschlicherweise als 110.DR11.3 geführt.)

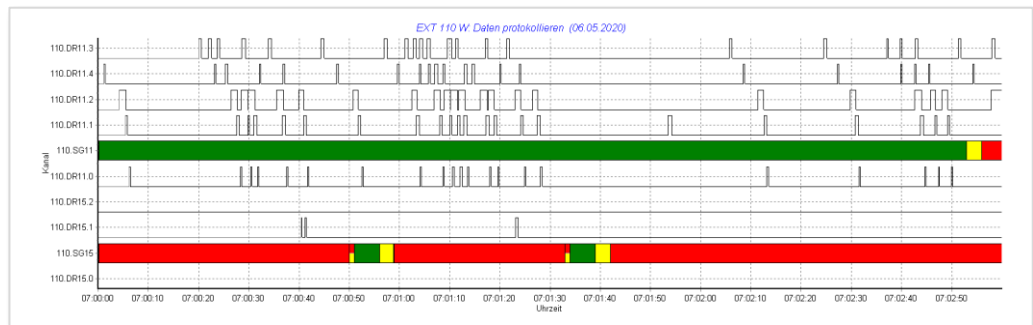


Abb. 69 Fahrzeugverfolgung in Zufahrt 110.11, 6.5.2020 07:00 bis 07:03

LSA-Detektor				VDE					
Uhrzeit	ms	Belegung	Abstand	Zeit	Klasse	Länge	v	Lücke	Abstand
07:00:20	700	0.7		07:02:02	PW	470	45	21.7	
07:00:22	700	0.6	2.0	07:02:04	PW	460	44	1.6	2
07:00:24	300	0.6	1.6	07:02:06	PW	420	44	1.3	2
07:00:29	300	0.7	5.0	07:02:10	PW	500	43	4.6	4
07:00:34	500	0.5	5.2	07:02:16	PW	450	48	5	6
07:00:45	100	0.6	10.6	07:02:26	PW	420	47	10.3	10
07:00:57	600	0.5	12.5	07:02:39	PW	460	57	12.4	13
07:01:01	700	0.5	4.1	07:02:43	PW	460	49	3.7	4
07:01:03	500	0.6	1.8	07:02:45	PW	430	49	1.5	2
07:01:04	800	0.7	1.3	07:02:46	PW	490	45	0.9	1
07:01:06	200	0.6	1.4	07:02:48	PW	440	43	1	2
07:01:10	400	0.7	4.2	07:02:52	PW	480	45	3.7	4
07:01:11	800	0.6	1.4	07:02:53	PW	430	48	1.2	1

LSA-Detektor				VDE						
Uhrzeit	ms	Belegung	Abstand	Zeit	Klasse	Länge	v	Lücke	Abstand	
07:01:17	600	0.5	5.8	07:02:59	PW	470	50	5.6	6	
07:01:21	900	0.5	4.3	07:03:04	PW	420	56	4.1	5	
				07:03:28	MR	220	48	24.5	24	
07:02:06	300	0.6	44.4	07:03:48	PW	500	52	19.3	20	
07:02:25	200	0.6	18.9	07:04:07	PW	500	54	18.6	19	

Tab. 70 LSA-Detektor 11.4 und VDE-Zählstelle 1288, 6.5.2020 07:00:20 bis 07:02:25

LSA-Detektor und VDE-Zählstelle haben unterschiedliche Zeitbasen. Es muss ein konstanter Offset von der Zeit der VDE-Zählstelle subtrahiert werden.

Man sieht gut, dass das Motorrad von der VDE-Zählstelle zuverlässig erkannt worden ist, welches vom LSA-Detektor nur vom Detektor vor der Haltelinie 11.1 um 07:01:53 erkannt wird.

Velos werden von der VDE-Zählstelle nicht erkannt, jedoch vom LSA-Detektor an der Haltelinie. In der nächsten Abbildung fahren 3 Velos durch die Zufahrt in der Folge PW – PW – Velo – PW – PW – Velo – PW usw. an der Haltelinie. Die VDE-Zählstelle hält offenbar einen Smart für ein Motorrad.

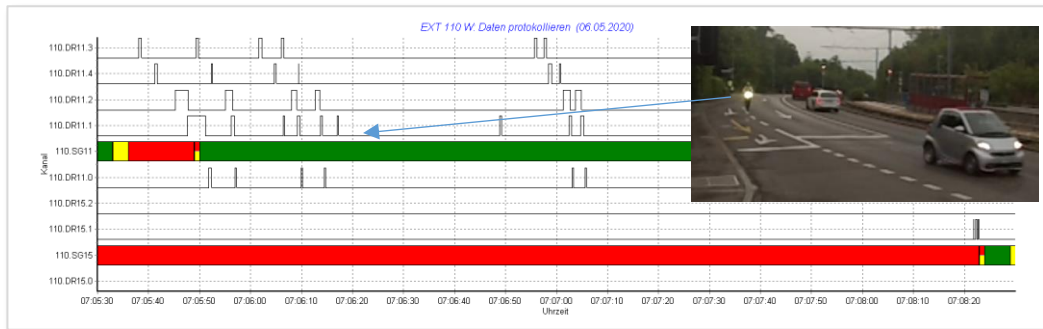


Abb. 71 Fahrzeugverfolgung in Zufahrt 110.11, 6.5.2020 07:06 bis 07:09

LSA-Detektor				VDE						
Uhrzeit	ms	Belegung	Abstand	Zeit	Klasse	Länge	v	Lücke	Abstand	
07:05:38	700	0.6	19.3	07:07:20	PW	420	52	19.4	19	
07:05:49	800	0.5	11.1	07:07:31	PW	480	46	10.7	11	
07:06:02	300	0.5	12.5	07:07:44	PW	490	48	12.2	13	
07:06:06	500	0.5	4.2	07:07:48	MR	340	42	3.7	4	
07:06:56	300	0.6	49.8	07:08:38	PW	470	51	25.5	50	

Tab. 72 LSA-Detektor 11.4 und VDE-Zählstelle 1288, 6.5.2020 07:05:30 bis 07:06:56

Im weiteren Verlauf stimmen die Detektionen gut überein. 11.4 alias 11.3 hat die üblichen Probleme beim Unterscheiden mehrerer Fahrzeuge bei Stau, siehe Anhang VI. Unter Zuhilfenahme der Haltelinien-nahen Detektoren 11.1 und 11.0 kann auch hier ein korrekter Zählwert erreicht werden, allerdings ohne die genaue Zuordnung zu Fahrzeugklassen.

Da die LSA-Detektoren Velos und Motorräder erkennen können, sie aber nicht zuverlässig voneinander unterscheiden, und die VDE-Zählstellen nur Motorräder zählen, kann durch Differenzbildung die Anzahl Velos berechnet werden – wenn eine VDE-Zählstelle und eine Zufahrt mit LSA-Detektoren nahe beisammen sind.

6 Ergebnisse: Beispiele der Signalverarbeitung

6.1 Störung

6.1.1 Ungewöhnliches, aber korrektes Verhalten

Zuerst ein Beispiel korrekten Verhaltens von Detektor 085.D4.20 eines Knotens in Bern. Es entstammt einer Untersuchung in Bern und einer darauf basierenden Publikation [8]:

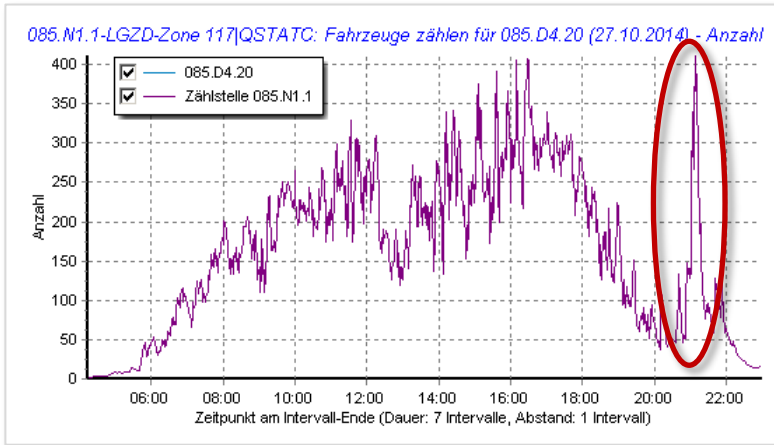


Abb. 73 Korrekte Intervall¹²-Zählwerte eines Detektors mit spontanem Spitzenverkehr

Etwa um 21:00 schwillt der Verkehr unmotiviert erscheinend an. Ein Blick auf die Verteilung der Bruttozeitlücken zeigt aber, dass das Detektionsmuster nicht Ungewöhnliches zeigt:

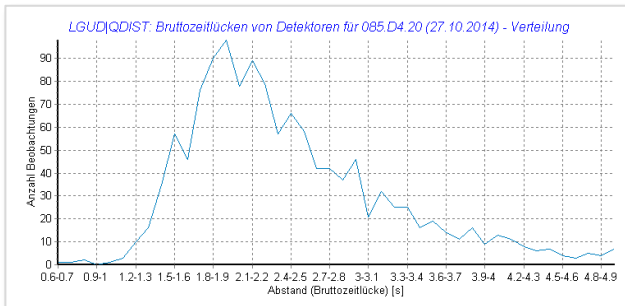


Abb. 74 Korrekte Verteilung von Bruttozeitlücken eines Detektors

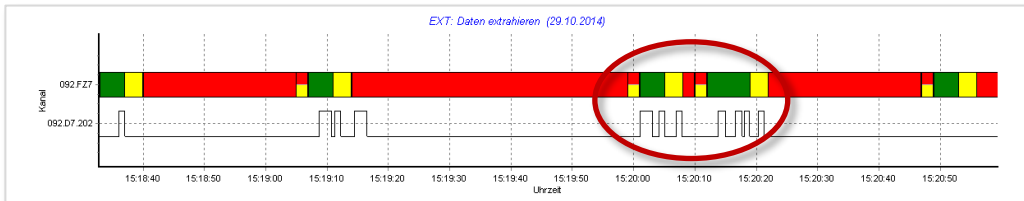


Abb. 75 Flanken eines Detektors und Zustandswechsel einer Signalgruppe

¹² Die Abbildung zeigt Zählwerte in Intervallen, die sich zur Netzwerkregelung eignen:

- die Intervalle sollen möglichst kurz gewählt sein, damit die Regelung schnell ansprechen kann,
- die Kurve soll möglichst ruhig sein, damit kein häufiges Hin- und Herschalten der Regelung erzeugt wird.

Das wird dadurch erreicht, dass gleitende Intervalle gebildet werden, deren Länge von den Umläufen bzw. von den Grün-Enden einer zugeordneten Signalgruppe gegeben werden. Wie in der Legende der Abbildung erwähnt, wird pro Intervall-Ende über die letzten 7 Intervalle gemittelt.

Die vertikale Achse, welche mit «Anzahl» angeschrieben ist, zeigt die Fahrzeuge pro Stunde. Dabei wird das Fahrzeugvolumen jeweils auf die Einheit «Fahrzeuge pro Stunde» umgerechnet.

Die Zählungen sind Plausibel – es treten sehr kurze Grünphasen auf mit sehr wachen Autofahrern, die auch noch ein bisschen bei Rot über den Detektor fahren. Das führt zu einer ungewöhnlich hohen Belastung pro Umlauf, die aber korrekt ist.

6.1.2 Fehlerhafte, kurze Impulse

Nun ein Beispiel inkorrekten Verhaltens von Detektor 082.D15.201. Die Mittelung der Verkehrsmenge geschieht über 7 Umläufe.

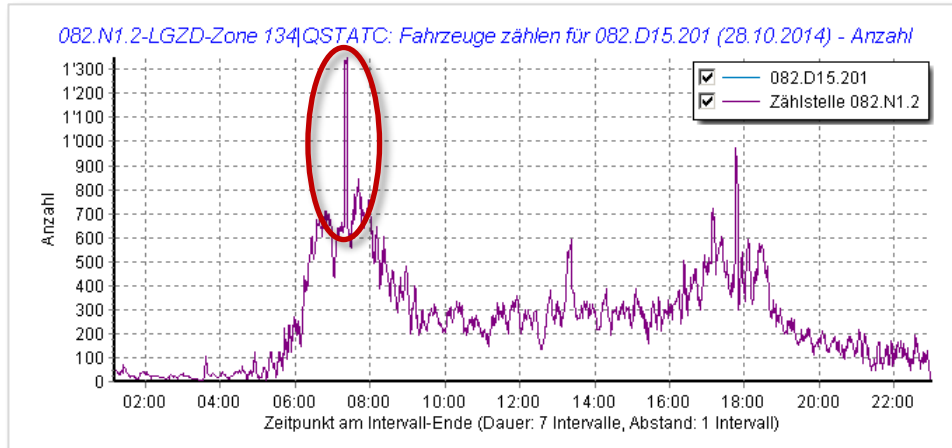


Abb. 76 Fehlerhafte Zählwerte eines Detektors mit spontanem Spitzenverkehr

Etwa um 07:20 wird eine grosse Verkehrsmenge gezählt. Im Folgenden wird das Detektorprotokoll des Zeitraums um 07:18 gezeigt:

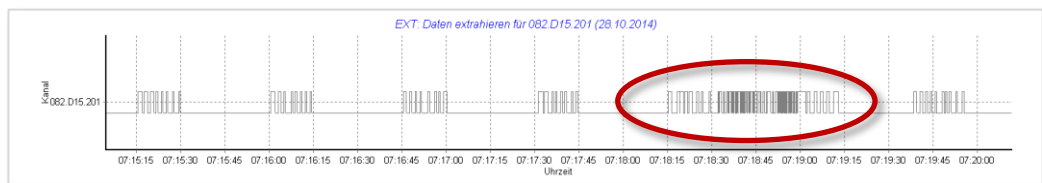


Abb. 77 Spontanes Schwingen eines Detektors

Man sieht deutlich im besagten Zeitbereich die sehr engen Detektorimpulse. Die Auswertung der Verteilung der Bruttozeitlücken sieht nun wie folgt aus:

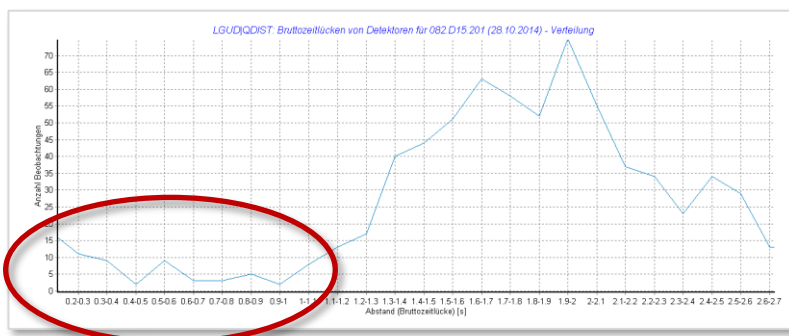


Abb. 78 Bruttozeitlücken bei spontanem Schwingen eines Detektors

Im Gegensatz zum korrekten Verhalten von Detektor 085.D4.20 sieht man hier, dass viele Bruttozeitlücken von unter 1 s auftreten. Das ist physikalisch auf der Strasse nicht möglich. Normalerweise folgen sich die Fahrzeuge nicht enger als mit rund 1.5s Abstand.

6.1.3 Fehlerhafte, lange Belegungszeiten

Detektor 092.D6.281 in Bern liegt auf einem Stück Schnellstrasse bzw. auf der Zufahrt zu einem unterirdischen Kreisel. Vor allem in den Randstunden und nachts zeigt er sehr hohe Belegungswerte:

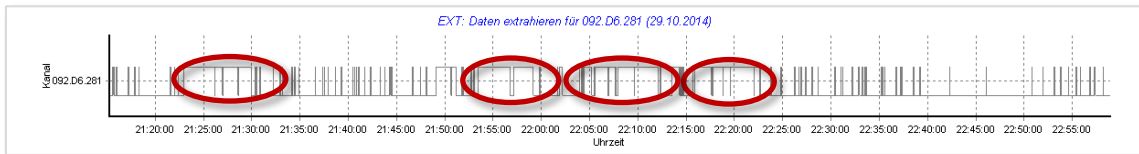


Abb. 79 Detektorprotokoll von 092.D6.281

Die nächste Abbildung zeigt folgendes: um 08:21:18 wird auf 092.D6.281 eine lange Belegung gestartet (blaues Oval), welche offenbar mehrere Fahrzeuge umfasst, was man auf Detektor 092.D6.301 sehen kann (dort 6 Fahrzeuge).

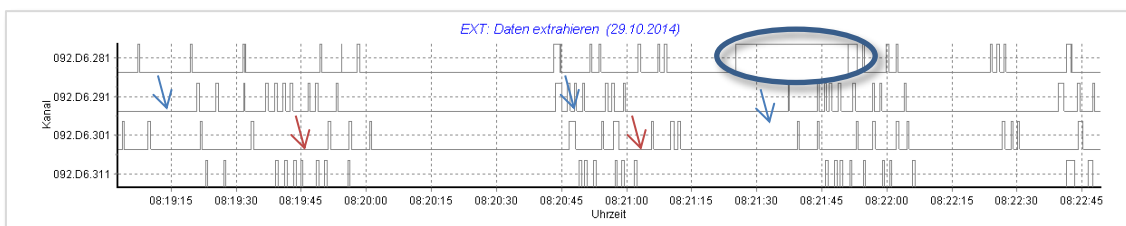


Abb. 80 Impulsfolge mit spontaner Dauerbelegung

Es muss davon ausgegangen werden, dass der Detektor schlecht eingestellt war und in den gezeigten Fällen im Zustand «ein» hängen geblieben ist, bis ein weiteres Fahrzeug ihn davon weg bringt.

Stau baut sich allmählich auf. Belegungszeiten können nicht von normal kurz auf ganz lang springen, da die Belegungszeit umgekehrt proportional zur Überfahrgeschwindigkeit ist. Wird ein sprunghafter Anstieg der Belegungszeit erkannt, dann muss die folgende Belegungszeit ignoriert werden.

Zur Erkennung dieses Effekts ist ein Algorithmus nach [4] zu verwenden. In den Untersuchungen zum vorliegenden Bericht ist der beschriebene Effekt nicht aufgetreten. In Bern tritt er inzwischen nach einer verbesserten Einstellung der Auswerteeinheit des Detektors nicht mehr auf.

6.1.4 Langfristiges Schwingen

Als Beispiel dient der Knoten 217 aus Basel-Stadt und das temporäre Verhalten einiger seiner Detektoren.

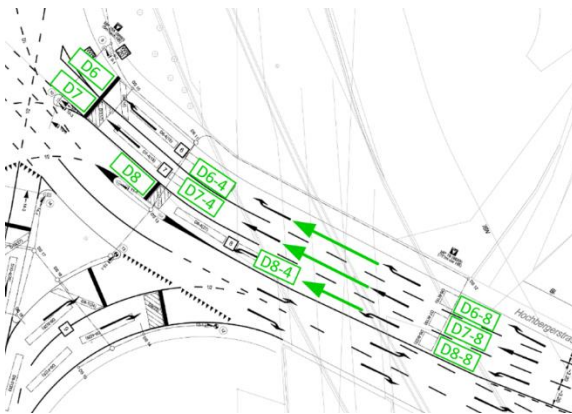


Abb. 81 Ostzufahrt des Knotens BS_217

Die nächsten 2 Abbildungen zeigen die Verteilungsfunktionen korrekt funktionierender Detektoren.

Normalverhalten: Belegungsdauer

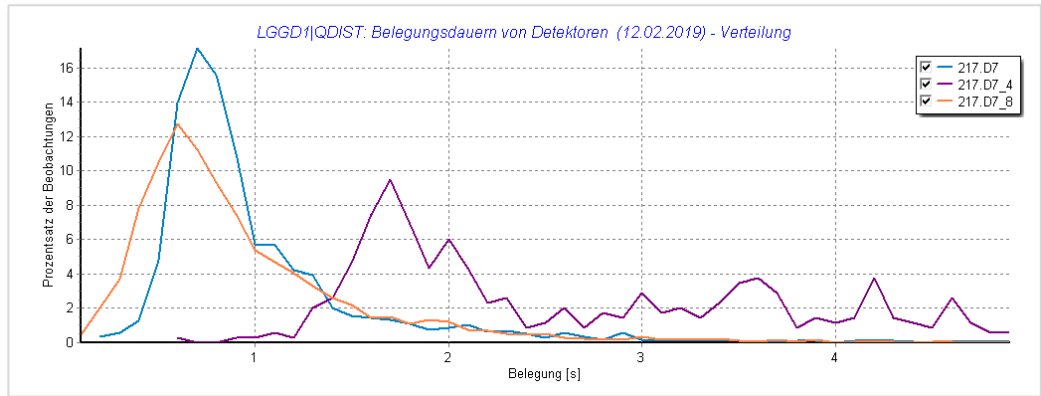


Abb. 82 Normale Verteilungen der Belegungsauern für Detektoren

Die Abbildung zeigt die Messungen der Belegungsauern der drei Detektoren der mittleren Spur aus dem Lageplan in [Abb. 81](#). Die Abbildung zeigt die Verteilungsfunktion für Belegungszeiten mit einer Auflösung von 0.1 s. Die vertikale Achse zeigt die Häufigkeit an. Die minimale Belegungszeit hängt von der Bauart und Einstellung des Detektors ab. Man sieht deutlich die Poisson-Verteilung der Auftretenswahrscheinlichkeiten. Je nach Bauart, vor allem je nach Länge eines Detektors befindet sich der Maximalwert an einer anderen Stelle.

Normalverhalten: Bruttozeitlücke

Die nächste Abbildung zeigt die Messung der Bruttozeitlücken, also Belegungsauer plus Zeitlücke bis zum nächsten Fahrzeug. Selbstredend spielt auch hier die Bauform des Detektors eine Rolle, wo sich das Maximum der beobachteten Werte befindet.

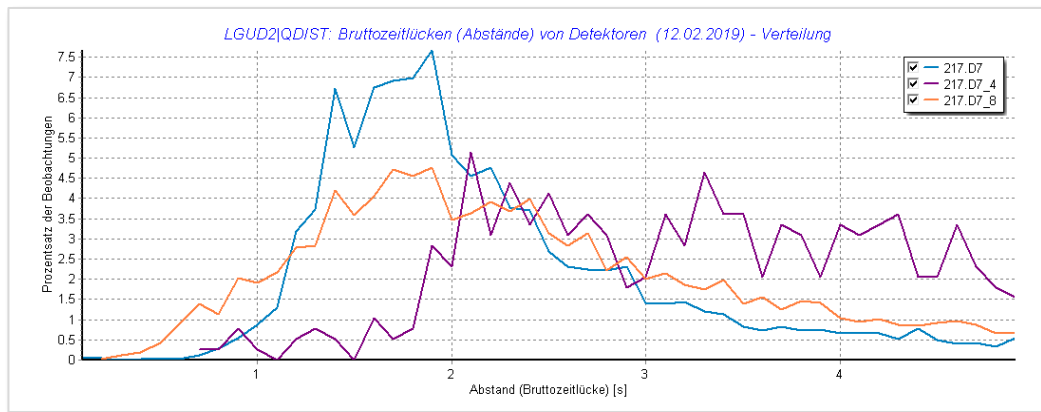


Abb. 83 Normale Verteilungen der Bruttozeitlücken für Detektoren

Abnormes Verhalten: Belegungsdauer

Dieselben Detektoren sind in der Folge im November desselben Jahres ausgewertet worden.

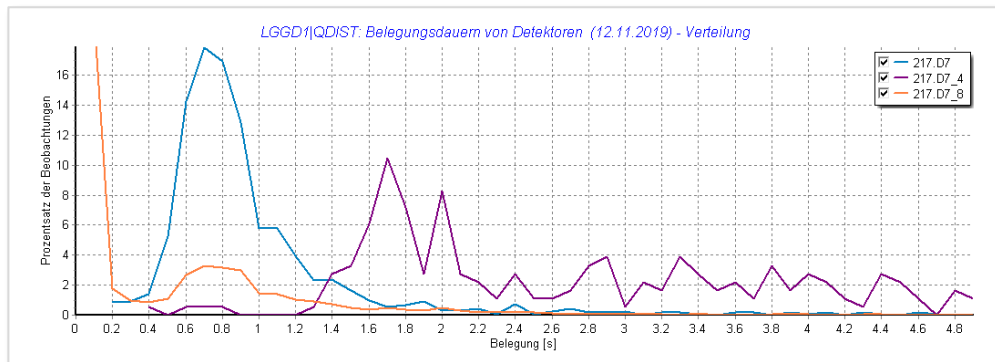


Abb. 84 Abnormale Verteilungen der Belegungsdauern für Detektoren

Man sieht deutlich die **Unähnlichkeit der beiden Kurven** von 217.D7_8 (im Vergleich mit [Abb. 82](#)). Dieser Detektor schwingt also.

Um die Grenze zwischen Belegungszeit durch Schwingen und korrekter Belegungszeit zu finden, macht man sich die Eigenschaft zu Nutze, dass die Verteilung der Belegungszeiten einer Poisson-Verteilung folgen. In [Abb. 78](#) ist dies für die Bruttozeitlücken bereits sichtbar gemacht worden.

Abnormes Verhalten: Bruttozeitlücke

Das Schwingen kann man auch an der Verteilungsfunktion der Bruttozeitlücken erkennen:

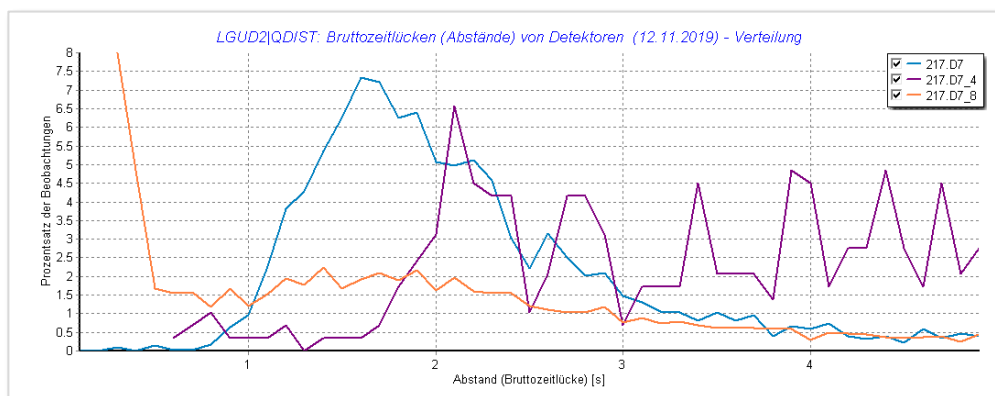


Abb. 85 Abnormale Verteilungen der Bruttozeitlücken für Detektoren

Vergleich der Anmelddetektoren

Zur weiteren Vertiefung sollen die drei Anmelddetektoren miteinander verglichen werden. Ein oberflächlicher Blick auf die Detektoraufzeichnungen lässt bereits vermuten, dass nur der oberste Detektor, 217.D6_8 korrekt funktioniert.

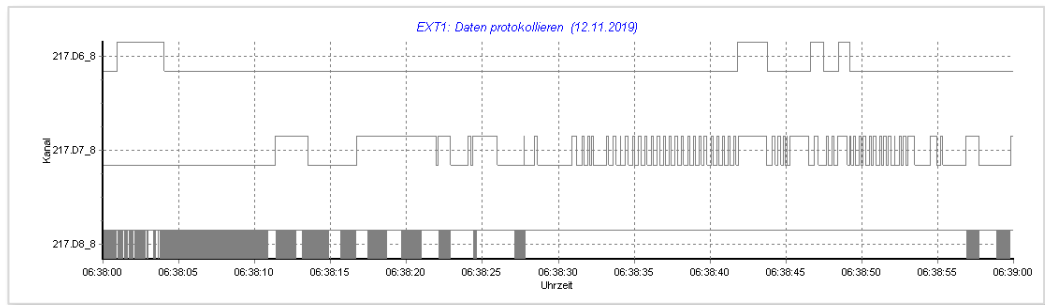


Abb. 86 Schwingende Detektoren in der Ostzufahrt von BS_217

- D6-8 zeigt ein normales Verhalten
- D7-8 schwingt aber zeitweise
- D8-8 schwingt häufig

Entsprechendes sieht man auch in der Verteilung der Belegungszeiten der Detektoren:

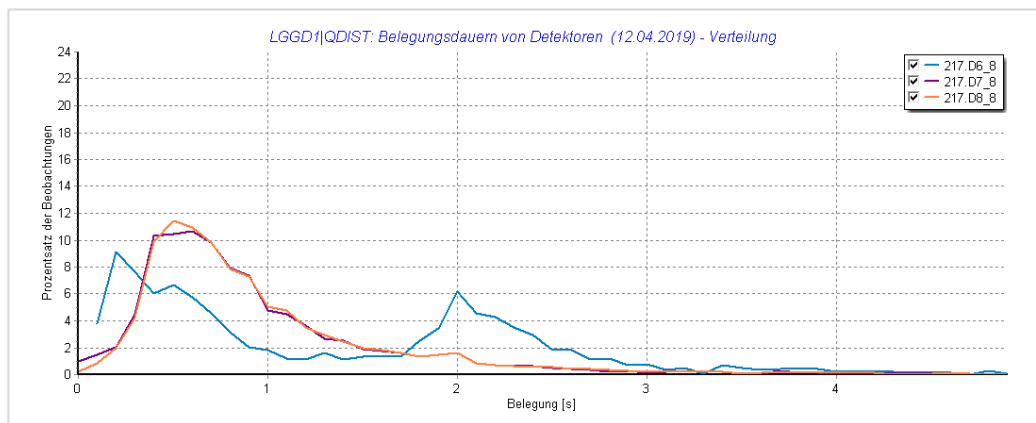


Abb. 87 Normale Verteilungen der Belegungsauern für Detektoren 217.D*_8

217.D7_8 und 217.D8_8 folgen an einem Referenztag einer fast identischen Verteilungsfunktion mit einem Maximum zwischen 0,5 und 0,7 s. 217.D6_8 zeigt zwei Maxima, eines bei rund 0,3 s und eines bei 2 s. Auf das zweite Maximum wird im Abschnitt [4.2.2](#) eingegangen.

Die Belegungszeit entspricht immer auch einer Geschwindigkeit. Die häufigste Belegungszeit lässt auf die Länge des Detektors schließen bzw. auf die Detektionslänge, welche durch die eingestellte Empfindlichkeit des Detektors gegeben wird. Sie wird bei der am häufigsten gefahrenen Geschwindigkeit gemessen, was normalerweise unter der ausgeschilderten Höchstgeschwindigkeit liegt. Es hat sich gezeigt, dass 36 km/h (10 m/s) ein üblicher Wert ist. Für 217.D7_8 und 217.D8_8 nehmen wir den Wert der Belegungszeit von 0,6 s. Als Fahrzeuglänge nehmen wir 5 m an.

Hätte der Detektor keine Ausdehnung, dann wäre die Überfahrzeit eines solchen Fahrzeuges 0,5 s. Im Fall von 0,6 ist die Detektionslänge also 1 m.

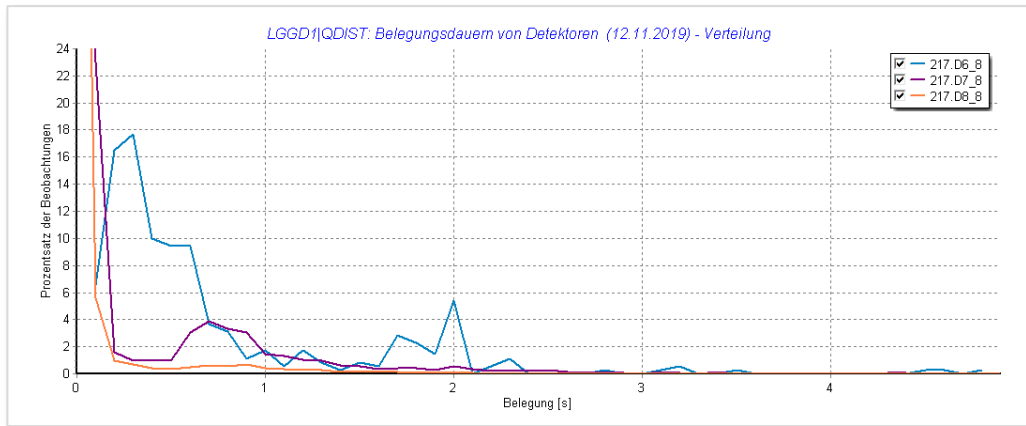


Abb. 88 Abnormale Verteilungen der Belegungsdauern für Detektoren

Zum betrachteten Tag in [Abb. 86](#) sieht die Verteilungskurve ganz anders aus.

- 217.D6_8 zeigt die üblichen 2 Maxima, wobei das untere Maximum dominant ist.
- 217.D7_8 zeigt ein Nebenmaximum zwischen den üblichen 0.5 und 0.7 s. Das absolute Maximum liegt aber bei einer kurzen Belegungsdauer von 0.1 s. Hier scheinen neben dem Schwingen auch korrekte Messungen vorzukommen.
- 217.D8_8 zeigt keine Ähnlichkeit mit der normalen Verteilung. Das Maximum liegt bei 0.1 s.

Entwicklung der Verteilung

217.D7_8 scheint zeitweise korrekt zu messen, da das Nebenmaximum an der richtigen Stelle liegt. Darum werfen wir einen Blick auf die Entwicklung der Verteilung: pro Stunde wird eine Verteilungsfunktion berechnet und «senkrecht aufgestellt», so dass die Verteilungsfunktionen Hügelzüge bilden.

Rot sind die höchsten Werte eingezeichnet. Man sieht, dass sie zwischen 0.5 und 0.7 s Belegungszeit liegen:

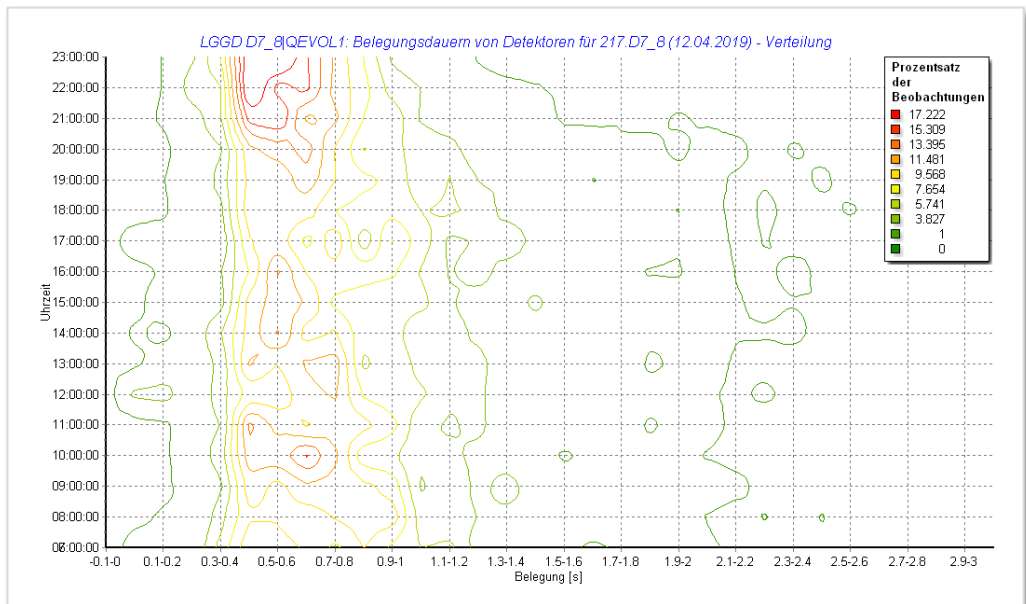


Abb. 89 Normale Entwicklung der Verteilungen der Belegungsdauern

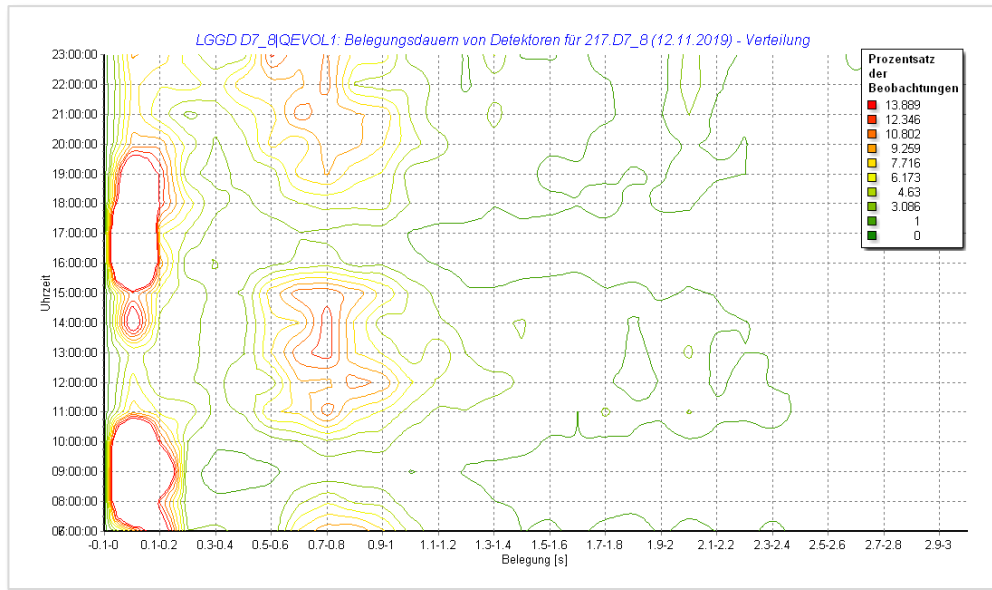


Abb. 90 Abnormale Entwicklung der Verteilungen der Belegungsdauern

Auch hier sind man zu gewissen Zeiten die Hügelkette zwischen 0.5 und 0.7 s. Dazwischen jedoch – morgens bis etwa 10 Uhr und dann wieder von 16 Uhr bis 19 Uhr dominieren die kurzen Belegungszeiten. Dieser Detektor schwingt also nur temporär.

Die Ursache des Schwingens für Schleifendetektoren ist meistens eine schlechte Kalibrierung oder eine spontane Nachkalibrierung, welche eine Weile in einem Zwischenzustand stehen bleibt.

Schlechte Kalibrierung führt zum Ausfall der Messungen des Detektors. Sporadisches Nachkalibrieren ist im vorhergehenden Kapitel beschrieben worden.

Vergleich der Verlängerungsdetektoren

Verlängerungsdetektoren weisen längere Belegungszeiten auf und sind schon bei mässig viel Verkehr nicht mehr in der Lage, alle Fahrzeuge voneinander zu unterscheiden.

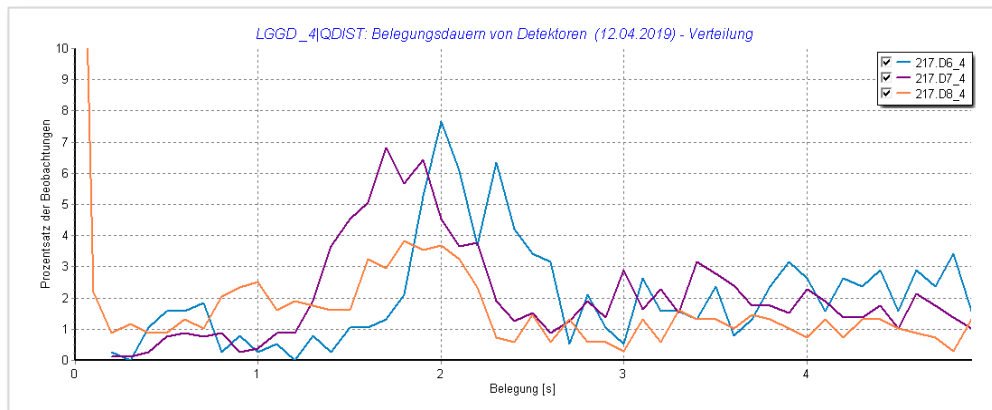


Abb. 91 Verteilungen der Belegungsdauern für die Verlängerungs-Detektoren

- 217.D6_4 und 217.D7_4 weisen normale Verteilungen auf mit einem Maximum zwischen 1.6 und 2.0 s
- 217.D8_4 hat ein Schwingungs-Problem, weist daneben aber trotzdem das erwartete (Neben-) Maximum auf.

Vergleich der Halteliniendetektoren

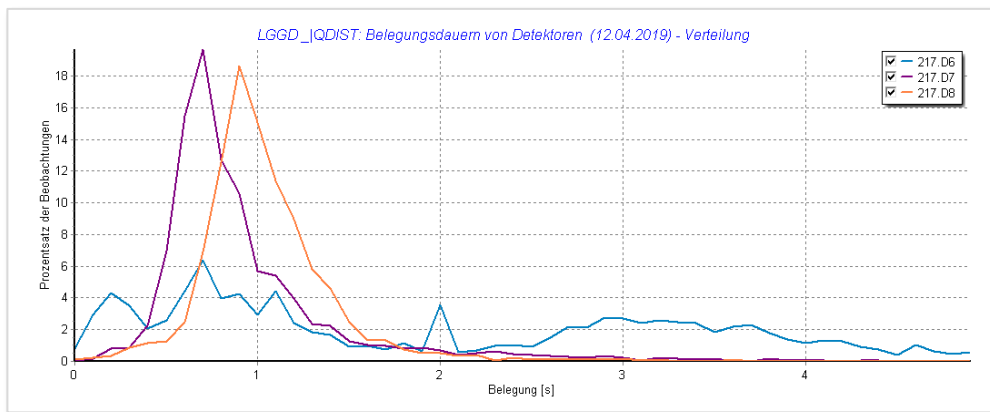


Abb. 92 Verteilungen der Belegungsdauern für die Haltelinien-Detektoren

Die Haltelinien-Detektoren sollten eine ähnliche Verteilungsfunktion wie die Anmelde-Detektoren aufweisen (siehe die nächste Abbildung):

- 217.D7 scheint baugleich zu sein mit 217.D7_8
- 217.D8 scheint etwas länger zu sein als sein Anmeldedetektor 217.D8_8
- 217.D6 zeigt dieselben Phänomene wie sein Anmeldedetektor 217.D6_8, nämlich viele kurze Belegungszeiten und viele Belegungszeiten um 2 s. Beide sind auf Übersprechen zurückzuführen, siehe Abschnitt [6.2](#).

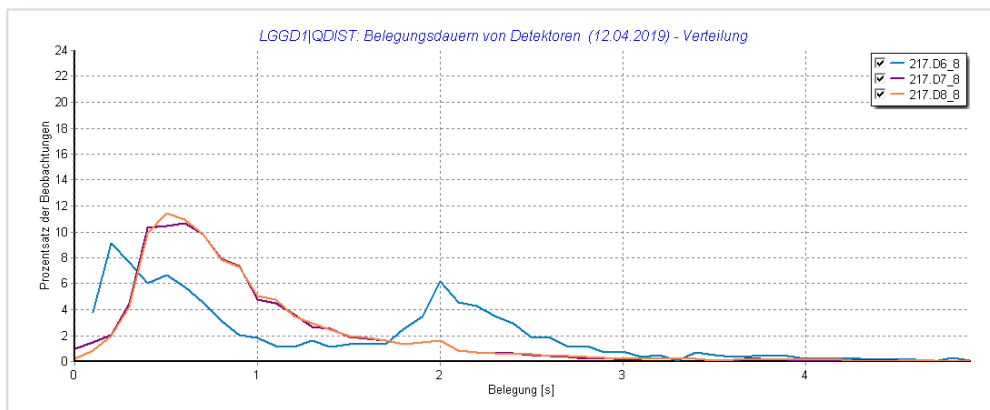


Abb. 93 Verteilungen der Belegungsdauern für die Anmelde-Detektoren

6.2 Übersprechen

In [Abb. 87](#) bemerkt man ein Nebenmaximum des Detektors 217.D6_8 bei 2 s – sowie einen Absatz bei etwa 0.6 s. Die dortige Abbildung hat eine Auflösung von 0.1 s. Die nun folgende Abbildung hat eine Auflösung von 0.01 s, der Auflösung des Systems.

- Der erste, linke Hügel bei 0.25 s geht auf Übersprechen zurück, wie in [Abb. 98](#) gezeigt.
- Der folgende Hügel bei 0.6 s gibt den frei fließenden Verkehr wieder.
- Der rechte Hügel zwischen 1.8 s und 2.8 s zeigt den langsamen Kolonnenverkehr. Im Abschnitt um [Abb. 87](#) hatten wir anhand der vermuteten Empfindlichkeit des Detektors angenommen, dass der Detektor 1 m lang ist und die überfahrenden Fahrzeuge 2 m lang sind. Ein Wert von rund 2 s entspricht demnach einer Geschwindigkeit von 3 m / 2 s, also 1.5 m/s bzw. rund 5 km/h. Der «zweite Hügel» lässt also auf häufigen langsamen Kolonnenverkehr schließen.

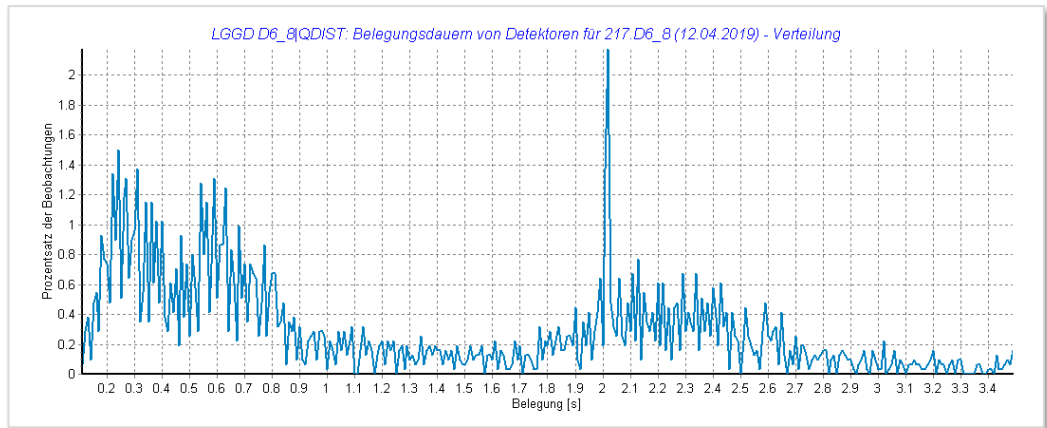


Abb. 94 Hoch auflösende Verteilung der Belegungsdauern für Detektor 217.D6_8

Man sieht deutlich, dass gewisse Messwerte nicht vorkommen. Und man sieht auch deutlich das Nebenmaximum. Es liegt bei 2.03 s. In dieser Auslösung ist das Nebenmaximum sogar das absolute Maximum.

Fehlende Werte gehen auf Abtast-Effekte zurück und haben keine physikalischen Gründe. Gehäufte Werte, wie das (Neben-)Maximum bei 2.03 s haben ebenfalls technische Gründe und gehen auf den Aufbau der Auswerteeinheit des Detektors zurück. Oder sie gehen auf Übersprechen zurück und wie das von der Auswerteeinheit interpretiert wird.

Die nächste Abbildung zeigt eine Sequenz der gemessenen Belegungszeiten, und zwar dort, wo der häufigste Wert vier Mal hintereinander gemessen wird:

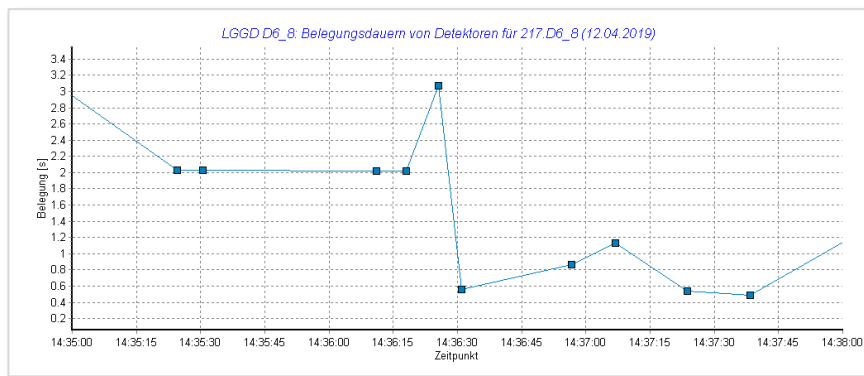


Abb. 95 Belegungs-Sequenz für Detektor 217.D6_8

Die zugehörige Aufzeichnung von Detektoren derselben Spur, zugehöriger Signalgruppe und zuunterst Detektor der Nebenspur ist hier abgebildet:

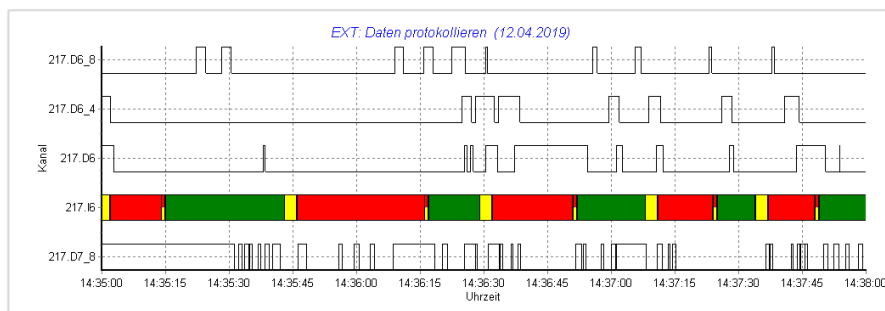


Abb. 96 Signalplanschreiber für Detektor 217.D6_8 rund ums Übersprechen
Jede Messung des Maximalwerts ist auf ein Übersprechen zurückzuführen.

Ein weiteres Beispiel

In der nächsten Abbildung sind

- grün Detektionssequenzen auf der Zufahrt 217.7 (mittlere Spur) unterlegt.
- Auch korrekte Detektionen auf einem der beiden anderen Anmelde-detektoren in den umgebenden Spuren (links und rechts) sind grün unterlegt.
- Orange unterlegt und mit Pfeilen versehen sind übersprechende Signale – sie sprechen immer von einem grün unterlegten Detektor in Pfeilrichtung auf einen orange unterlegten Detektor über.

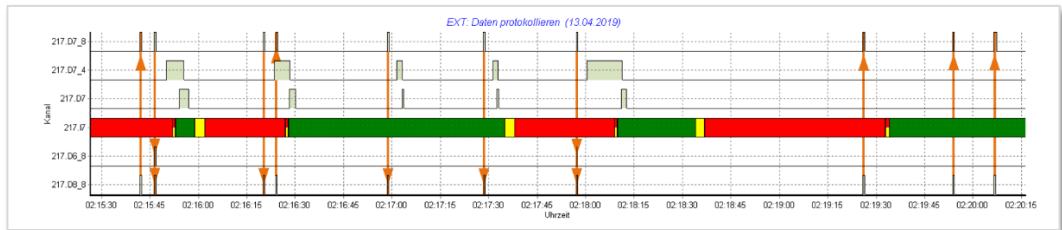


Abb. 97 Übersprechen um die Fahrspur 217.7 (mittlere Spur)

Wir erkennen ein häufiges Übersprechen in die eine oder in die andere Richtung. Ein Impuls kann sogar auf zwei weitere Detektoren übersprechen bzw. ein Fahrzeug wird von allen drei Anmelde-detektoren erkannt.

Es ist abzuklären, in wieweit solche übersprechenden Detektionen erkannt werden können:

- Die Falschmessungen sind häufig synchron oder in einem ähnlichen Toleranzgebiet wie die richtige Messung.
- Die Falschmessungen sind ohne Detektionssequenz auf den folgenden Detektoren.

Noch ein Beispiel

Die Belegungsdauern von 217.D6_8 haben ihr Maximum bei 0.3 s (siehe [Abb. 87](#)). Das würde mit derselben Berechnungsmethode zu einer negativen Detektionslänge führen. Das kann man sich nur schwer vorstellen. Und so stellen wir uns lieber vor, dass die Fahrzeuglängen zu kurz detektiert werden, da der Detektor unempfindlich eingestellt ist. Der gleiche Detektor von 1 m Länge würde also ein Fahrzeug von 5 m Länge nur als ein 2 m langes Fahrzeug detektieren.

Das ist aber gleichzeitig eine Warnung:

- Der Detektor könnte zu unempfindlich eingestellt sein: Die Kurve verfügt über einen kleinen Absatz, welcher sich auf der Höhe des üblichen Maximums von 0.5 s befindet. Könnte es sein, dass das tiefe Maximum auf kurzzeitiges Prellen zurückzuführen ist, dass ein und dasselbe Fahrzeug vom Detektor verloren wird und dann wieder detektiert?
- Der Detektor könnte zu empfindlich eingestellt sein, so dass kurze Impulse von der benachbarten Fahrspur detektiert werden könnten.

Die Lösung ist: Übersprechen von der Nebenspur, siehe dazu die nächste Abbildung.

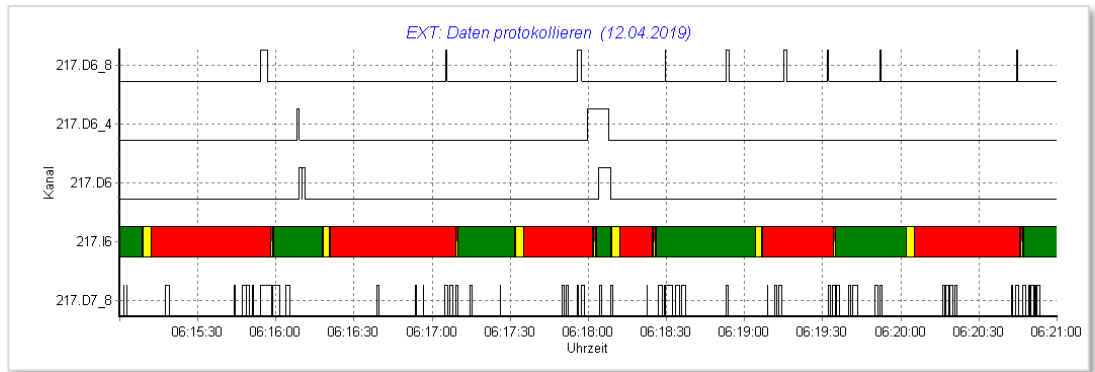


Abb. 98 Übersprechen auf Detektor 217.D6_8

Die oberen 3 Zeilen zeigen die Abfolge der drei Detektoren der rechten Spur, gefolgt vom zugehörigen Lichtsignal. Die unterste Zeile zeigt den Anmelde-detektor der mittleren Spur, also den Nachbarn des betrachteten Detektors.

Die ganze rechte Hälfte des Diagramms zeigt auf der Zeile von 217.D6_8 übersprechende Detektionen von 217.D7_8.

6.3 Signalanalyse für Doppeldetektoren

Fahrzeugklassen in der Zufahrt 111.12 (Zollikon, ZH)

Folgende Bedingungen haben sich zur Bestimmung der Fahrzeugklassen als geeignet erwiesen:

- Lastwagen, wenn $f_2 > k_{LKW,2}$
- Lieferwagen, wenn $f_2 \leq k_{LKW,2}$ UND $f_2 > k_{LW,2}$ UND $f_1 > k_{LW,1}$
- Alle anderen Fahrzeuge sonst

mit

- $k_{LW,2} = 0.7$
- $k_{LKW,2} = 0.91$
- $k_{LW,1} = 1$

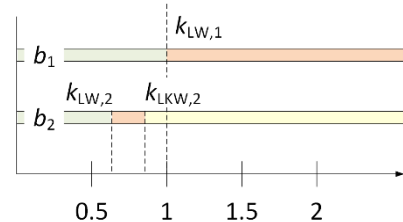
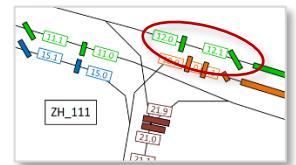


Abb. 99 Grenzwerte für 111.12

Die Einführung des Kriteriums $k_{LW,1}$ für den 1. Detektor war nötig, um das Kriterium für Lieferwagen gegen grosse Autos zu schützen. In Abb. 99 sind die Grenzwerte graphisch dargestellt:

- Gelb markiert ist das Kriterium für Lastwagen
- Rot markiert sind die beiden Kriterien für Lieferwagen, die gleichzeitig erfüllt sein müssen.
- Grün markiert sind die Bereiche, welche für die sonstigen Fahrzeuge übrig bleiben.

Die folgende Tabelle zeigt, wie gut welche Fahrzeugklasse erkannt worden ist:

	Total	als Autos	als Lieferwagen	als Lastwagen
Autos	517	508 (98 %)	7 (2 %)	2 (< 1 %)
Lieferwagen	69	32 (46 %)	36 (52 %)	7 (10 %)
Lastwagen	14	1 (7 %)	1 (7 %)	12 (86 %)

Tab. 100 Erkennungsgüte von Fahrzeugklassen mit Doppelschleife 111.12

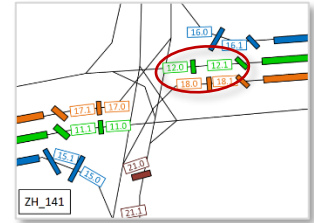
- Autos werden gut erkannt.
- Lastwagen werden genügend gut erkannt.
- Und Lieferwagen werden schlecht erkannt, d.h. nur jeder 2. Lieferwagen wird als solcher erkannt.

Die Kategorie Lieferwagen ist somit nicht zuverlässig erkennbar.

Fahrzeugklassen in der Zufahrt 141.12 (Zollikon)

Folgende, etwas abweichende Bedingungen zum vorhergehenden Beispiel sind zur Bestimmung der Fahrzeugklassen verwendet worden:

- Lastwagen, wenn $f_2 \leq k_{LKW,2}$ UND $f_1 \geq k_{LW,1}$ UND $f_1 \leq k_{LKW,1}$
- Lieferwagen, wenn $f_2 > k_{LW,2}$ UND nicht Lastwagen
- Alle anderen Fahrzeuge sonst



mit

- $k_{LW,2} = 0.8$
- $k_{LKW,2} = 0.6$
- $k_{LW,1} = 1.75$
- $k_{LKW,1} = 4$

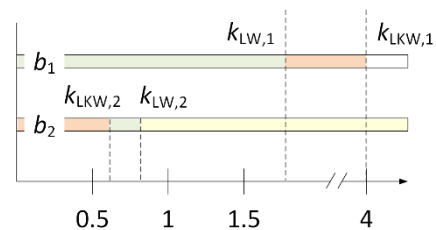


Abb. 101 Grenzwerte für 141.12

Vor allem die Bedingung mit $k_{LKW,2}$ erstaunt, da der Wert eine obere Grenze darstellt. Das kommt daher, dass Lastwagen auf dem zweiten Detektor nur kurze Impulse auslösen, da ihr Chassis weit von der Fahrbahn entfernt sich über den Detektor bewegt. Dadurch sind die Grenzen $k_{LKW,2}$ und $k_{LW,2}$ vertauscht.

In Abb. 101 sind die Grenzwerte graphisch dargestellt.

Die folgende Tabelle zeigt, wie gut welche Fahrzeugklasse erkannt worden ist.

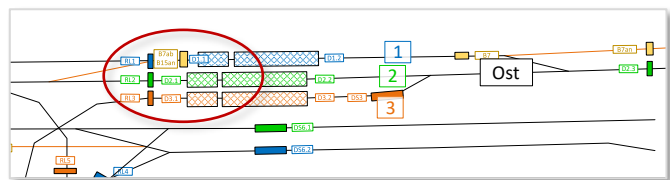
	Total	als Autos	als Lieferwagen	als Lastwagen
Autos	696	667 (96 %)	26 (4 %)	3 (< 1 %)
Lieferwagen	111	69 (62 %)	42 (38 %)	0
Lastwagen	6	2 (33 %)	0	4 (67 %)

Tab. 102 Erkennungsgüte von Fahrzeugklassen mit Doppeldetektor 141.12

Auch hier ist die Kategorie Lieferwagen nicht zuverlässig erkennbar.

Fahrzeugklassen in der Ost-Zufahrt von Knoten ZUCH_10 (Zuchwil, SO)

Wie auch schon in Zollikon sind die Fahrzeugklassen schlecht anhand der Doppeldetektoren erkennbar. Der erste Detektor der Doppeldetektoren ist hier ein Videodetektor (schraffiert), der zweite Detektor funktioniert auf induktiver Basis.



	Total	als Autos	als Lieferwagen	als Lastwagen
Autos	107	101 (94 %)	6 (6 %)	0
Lieferwagen	10	4 (40 %)	6 (60 %)	0
Lastwagen	6 (5 %)	0	0	6 (100 %)

Tab. 103 Erkennungsgüte von Fahrzeugklassen in Zufahrt ZUCH_10.1

	Total	als Autos	als Lieferwagen	als Lastwagen
Autos	236	200 (85 %)	36 (15 %)	0
Lieferwagen	24	16 (67 %)	7 (29 %)	1 (4 %)
Lastwagen	4 (1.5 %)	0	1 (25 %)	3 (75 %)

Tab. 104 Erkennungsgüte von Fahrzeugklassen in Zufahrt [ZUCH 10.2](#)

	Total	als Autos	als Lieferwagen	als Lastwagen
Autos	34	30 (88 %)	4 (17 %)	0
Lieferwagen	12	2 (17 %)	8 (67 %)	2 (17 %)
Lastwagen	15 (33 %)	2 (13 %)	0	13 (87 %)

Tab. 105: Erkennungsgüte von Fahrzeugklassen in Zufahrt [ZUCH 10.3](#)

Vor allem Lieferwagen werden schlecht als Lieferwagen erkannt.

Fazit auch hier, nicht nur in Zollikon für rein induktive Doppeldetektoren: die Erkennung der Fahrzeugklasse ist auch für gemischt optisch und induktive Doppeldetektoren nicht mit den VDE-Zählstellen vergleichbar und sollte nicht praktiziert werden.

Es wäre zu überlegen, ob eine Fahrzeugverfolgung über noch mehr Detektoren genauere Rückschlüsse auf die Fahrzeugklassen zulassen würde. Das würde aber den Rahmen dieser Untersuchungen sprengen.

Geschwindigkeit in Zufahrt 111.12 (Zollikon)

Die Resultate sind plausibel. Man sieht sich aufbauende und abbauende Geschwindigkeiten in den Kolonnen.

Für den Doppeldetektor 111.12 ist die Äquivalenz-Distanz 5.5 m.

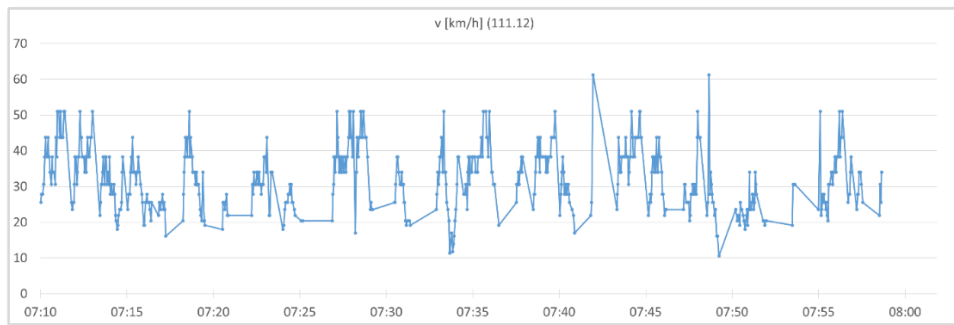


Abb. 106 Geschwindigkeit auf Doppelschleife [111.12](#)

Geschwindigkeit in Zufahrt 141.12 (Zollikon, ZH)

Für den Doppeldetektor 141.12 ist die Äquivalenz-Distanz 8.5 m.

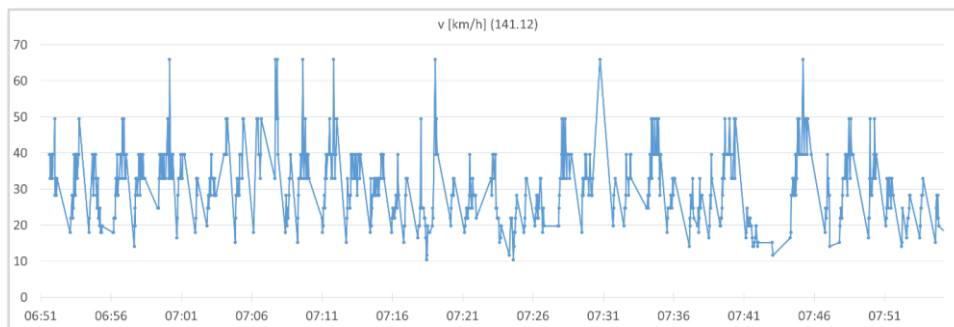
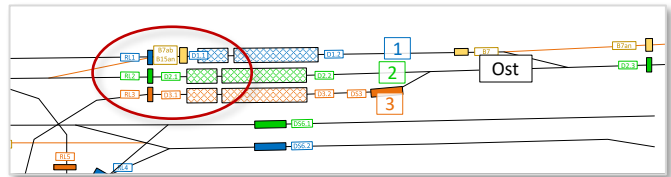


Abb. 107 Geschwindigkeit auf Doppeldetektor [141.12](#)

Geschwindigkeit in der Ost-Zufahrt von Knoten ZUCH_10 (Zuchwil, SO)

Wie auch schon in Zollikon ist die Geschwindigkeit recht gut anhand der Doppeldetektoren berechenbar. Zusätzlich zur Geschwindigkeit wird in den nächsten Abbildungen rechts auch die Verteilung der beobachteten Geschwindigkeiten gezeigt. Die Verteilungsfunktion dient der Einstellung der Äquivalenz-Distanz.



Für die beiden Geradeaus-Spuren 1 und 2 (1 biegt später rechts auf die Autobahn ab) stellen sich ähnlich Geschwindigkeitsverteilungen ein mit einer Häufung bei 45 km/h und einer zweiten Häufung bei etwa 65 km/h. Die ausgeschilderte Geschwindigkeit ist 60 km/h.

Die Spur 3 biegt links auf die Autobahn ab und wird auf Anmeldung grün. Es gibt wenig Fahrzeuge, welche ohne Halt die Zufahrt durchfahren können. Ausserdem biegt sie sofort nach links ab, was die Geschwindigkeit deutlich verringert.

Nicht für alle Fahrzeuge kann mit dem verwendeten Verfahren eine Geschwindigkeit berechnet werden. Solche Werte erscheinen in den folgenden Abbildungen als Lücke.

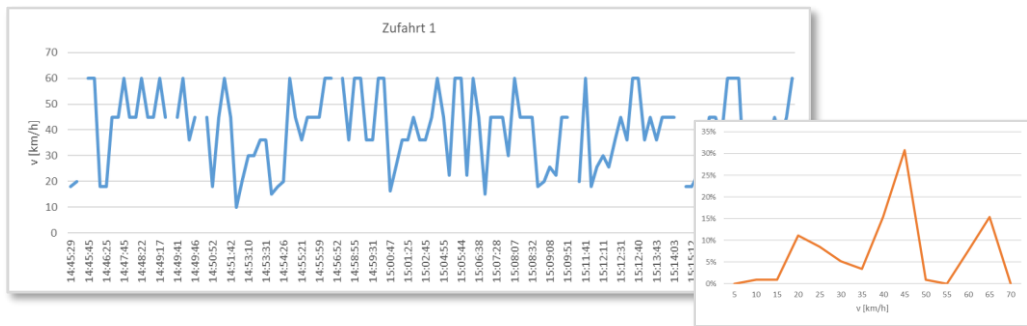


Abb. 108 Geschwindigkeit in Zufahrt ZUCH_10 Zufahrt 1

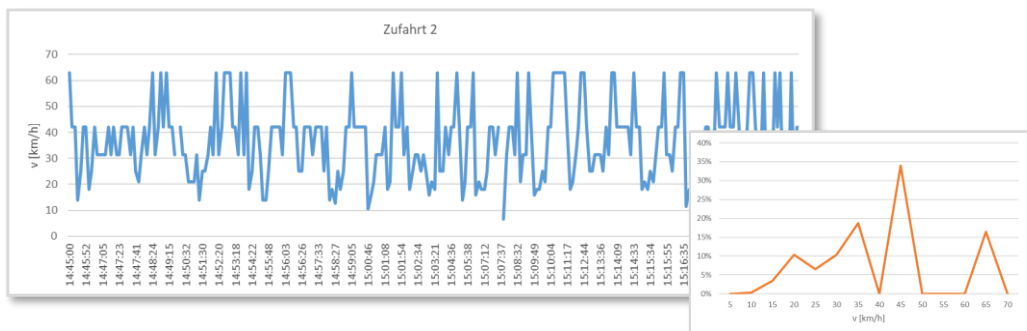


Abb. 109 Geschwindigkeit in ZUCH_10 Zufahrt 2

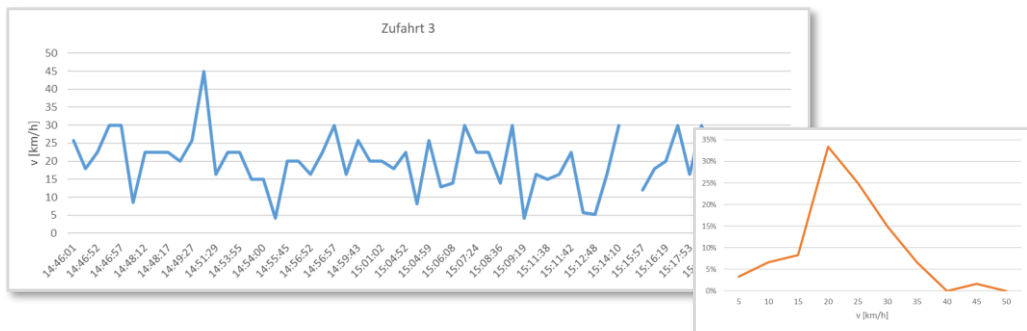


Abb. 110 Geschwindigkeit in ZUCH_10 Zufahrt 3

6.4 Längsvergleich

Bei einem Längsvergleich werden Signalschnipsel zeitlich zueinander verschoben und auf Ähnlichkeit getestet.

- Dabei können Länge und zeitliche Verschiebung in gewissen Grenzen variieren
- Die Schnipsel-Länge soll mindestens 1 Fahrzeugpulk beinhalten; bei wenig Verkehr kann ein Fahrzeugpulk aus einem einzigen Fahrzeug bestehen, da das folgende Fahrzeug durch eine lange Lücke abgetrennt ist.
- Die zeitliche Verschiebung entspricht der Fahrzeit zwischen den beiden Detektoren.

Der mikroskopische Längsvergleich kann somit auch der Schätzung von Fahrzeiten dienen [11].

Der Längsvergleich sollte zu einer Korrektur der Messungen führen können.

Die folgende Abbildung zeigt eine nächtliche Detektionssequenz in Zollikon von Osten nach Westen (Lagepläne siehe Anhang II.1). Die Fahrzeuge lassen sich gut verfolgen. Rosa hinterlegte Detektorimpulse stellen keine Einzelfahrzeuge dar und verbergen mehrere Fahrzeuge hinter sich.

Auf der Strecke biegt auch manchmal ein Fahrzeug ab, oder ein neues Fahrzeug kommt dazu.

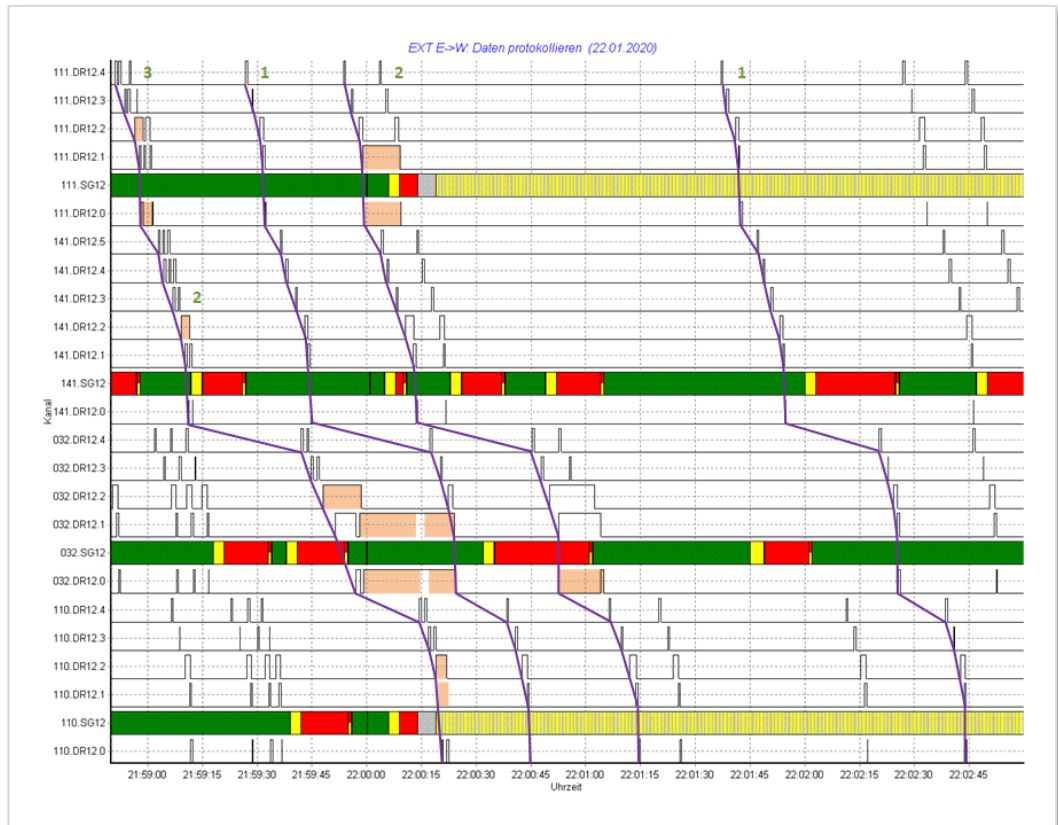


Abb. 111 Fahrzeugverfolgung auf der Forchstrasse nachts

Frühmorgens schwillt der Verkehr an. Die nächste Abbildung zeigt einen Ausschnitt. Es ist die Ostzufahrt zum Knoten 111, Lageplan siehe Abb. 140.

- Violett mit Pfeilen zum Anzahl Fahrzeugen versehen sind Fahrzeugpuls, die verfolgt werden können.
- Die violetten Linien geben die Grenzen zwischen den Pulks wieder
- Abbiegenden Verkehr gibt es um diese Zeit nicht (DR18_3)
- Der Verlängerungsdetektor DR12_2 kann nicht zum Zählen verwendet werden.

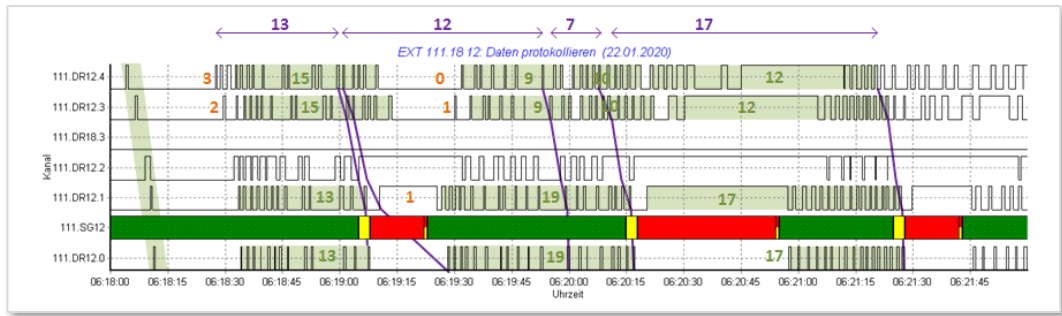


Abb. 112 Fahrzeugverfolgung am Knoten 111 frühmorgens

Die Fahrzeuge sind nun viel schwieriger zu verfolgen. Die einen Detektoren können mit kleinen Korrekturen zum Erkennen von Einzelfahrzeugen verwendet werden, andere sind zu lang und eignen sich nicht. Die Entwicklung eines Algorithmus zur Verfolgung der Fahrzeuge ist nicht Bestandteil dieses Forschungsberichts, die Möglichkeit dazu kann hier aber anschaulich suggeriert werden.

6.5 Gegenverkehr

Das folgende Beispiel aus Basel zeigt ein Beispiel, wo Gegenverkehr auf dem Detektor D4 erkannt werden kann, und zwar vom abbiegenden Verkehr auf Zufahrt 5 (von Detektor D5 aufgezeichnet).

Die Detektion von Gegenverkehr sollte zu einer Korrektur der Messungen führen können, ist aber nur möglich, wenn in der Gegenrichtung genügend redundante Detektoren vorhanden sind, damit der Gegenverkehr auch als solches erkannt werden kann.

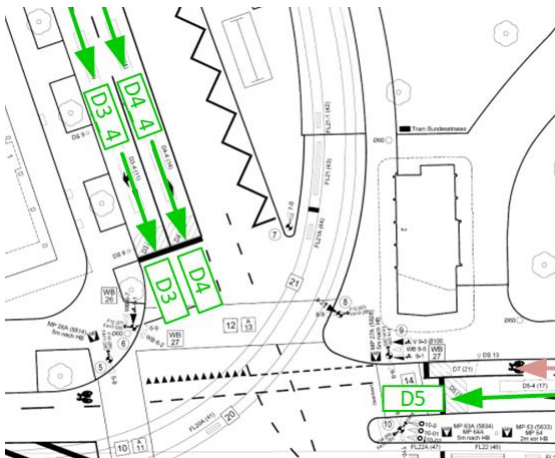


Abb. 113 Ausschnitt des Knotens BS_145

Nicht jedes Ansprechen bei Gegenverkehr ist korrigierbar. Redundante oder zusätzliche Information kann ein Ansprechen bei Gegenverkehr korrigierbar machen:

- Ein Detektor, der sich **hinter einer Haltelinie** befindet, spricht üblicherweise bei Rot nicht an, abgesehen von Rotfahrern, die aber normalerweise nur kurz nach Rot oder kurz vor Grün vorkommen. Die Kenntnis des Zustandes der zugehörigen Signalgruppe kann also unterscheiden zwischen Ansprechen durch den Gegenverkehr und echtem Ansprechen eines Fahrzeuges in die richtige Richtung.
- Für einen Detektor, der sich **in einer Zufahrt** zu einem Lichtsignal befindet, kann häufig nicht abschliessend festgestellt werden, ob er vom Gegenverkehr oder in die richtige Richtung überfahren worden ist.
- Wenn sich der Detektor **an der Haltelinie** befindet und einen Impuls bei Rot sendet, dann ist dieser Impuls entweder von einem Rotlichtfahrer oder vom Gegenverkehr ausgelöst worden.

Im hier beschriebenen Fall liegt der Detektor an der Haltelinie.

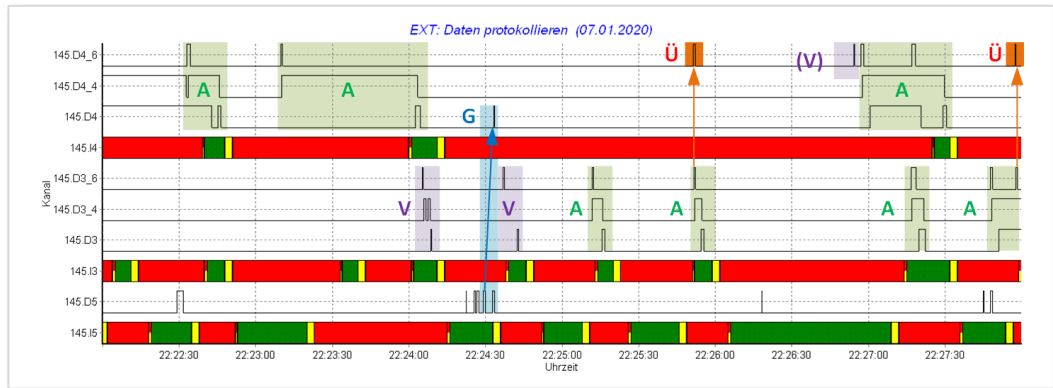


Abb. 114 Erkennung von Gegenverkehr am Knoten BS_145

Die Messungen zeigen eine ganze Sammlung von Fällen, die wir besprochen haben:

- **A**: das sind Autos, die verfolgt worden sind. Sie sprechen auf allen 3 Detektoren in der Zufahrt an, und der Verlängerungsdetektor spricht lange an.
- **V**: das sind Velos, die aber keinen eigenen Fahrstreifen und auch keine eigenen Detektoren haben. Sie sprechen auf allen 3 Detektoren an, aber der Verlängerungsdetektor spricht nur kurz an. Bei der ersten Messung spricht er sogar 2-mal an, was am nicht-linearen Fahrverlauf des Velos liegt.
- **Ü**: das sind übersprechende Fahrzeuge von der einen Fahrspur auf die Nebenfahrspur.

Und schliesslich **G**: das ist ein Fahrzeug des Gegenverkehrs, welches zu nah an die Fahrspur des Detektors D4 gekommen ist:

- Der Impuls tritt bei Rot auf.
- Der Impuls hat keine Vorgänger-Impulse der Detektoren in der Zufahrt
- Mit etwas Phantasie kann man sich ein Fahrzeug aus der Fahrspur 5 aussuchen, das abgebogen sein muss.

Kann der Gegenverkehr nicht immer vom Verkehr in die richtige Richtung unterschieden werden, hat dies eine Einbusse in der erzielbaren Qualität zur Folge.

Die erzielbare Qualität kann dann nur mit einer Referenzmessung bestimmt werden, entweder durch redundante Detektoren stromauf- oder stromabwärts oder durch Beobachtung. Die erzielbare Qualität entscheidet über dann über Einsatz oder Nichteinsatz des Detektors. Zur erzielbaren Qualität gehört

- ein Toleranzbereich der erwarteten Abweichungen und
- eine Angabe zur Streuung, d.h. eine Angabe, wie konstant die Abweichungen sind und ob sie nur zu bestimmten Tageszeiten auftreten.

6.6 Quervergleich

Der Quervergleich ist eine Verfolgung übersprechender Fahrzeuge:

- Spurwechsel
- Zu breite Fahrzeuge oder ungenaues Befahren der Spur
- Detektion der Gegenrichtung
- Sonstige Effekte

Der Quervergleich sollte zu einer Korrektur der Messungen führen können.

Der mikroskopische Quervergleich dient auch dem Aufdecken von Detektionsfehlern. Er zerfällt in 2 Aufgaben:

- Erkennen von übersprechenden Signalen von Fahrzeugen, welche die Detektoren in der vorgesehenen Richtung überfahren (Fahrt zwischen 2 Spuren),
- Erkennen von Fahrzeugen, die aus der Gegenrichtung heraus einen Detektor überfahren, welche nicht für diese Richtung vorgesehen ist.

Die Unterscheidung zwischen den zwei Fälle wird unter folgenden Bedingungen einfacher:

- Die Signalzustände sind bekannt, also ob überhaupt Fahrzeuge in der Gegenrichtung oder in der vorgesehenen Richtung fahren können.
- Die Fahrzeuge der Gegenrichtung können mittels eines Detektors erkannt werden.

6.6.1 Velo und Motorfahrzeuge

Wir betrachten dazu den Knoten 145 in Basel-Stadt. In seiner Westzufahrt liegen Velo- und Fahrzeugdetektoren nebeneinander:

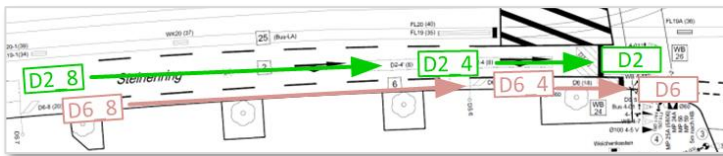


Abb. 115 Detektoren der Westzufahrt von BS_145

In der Darstellung der Messungen kann man die einzelnen Detektions-Sequenzen verfolgen. In der folgenden Abbildung sind mit Violett die erkannten Fahrzeuge unterlegt, welche über die Detektoren «D2_x» fahren. Mit Grün sind die Detektionen von Velos unterlegt, welche über die Detektoren «D6_x» fahren.

Die einzelnen Fahrten sind nicht einfach nachvollziehbar. Grundsätzlich ist die parallele Erfassung von Velos und MIV schwierig. Wir wollen aber trotzdem einen Versuch wagen.

Orange markiert sind nicht erklärable Messungen.

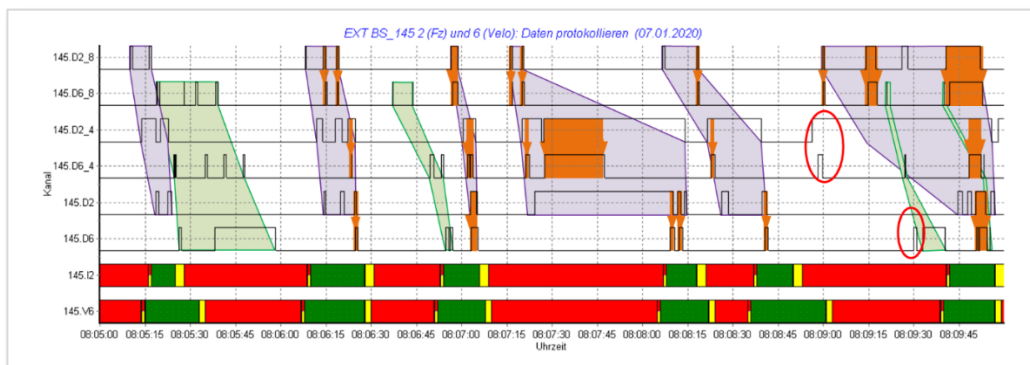


Abb. 116 Verfolgung von Velos und Autos am Knoten BS_145

Die Abbildung ist zwar etwas überladen, zeigt aber gut die Komplexität der Verfolgung paralleler Verkehrsströme:

- D2_8 → D2_4 → D2 → I2 zeigen die Zufahrt mit Detektoren und Signalgruppe für den Motorfahrzeugverkehr,
- D6_8 → D6_4 → D6 → V6 zeigen die Zufahrt mit Detektoren und Signalgruppe für die Velos

Die Signalgruppe für die Velos zeigt immer etwas länger grün, beginnt immer ein bisschen vorher und endet meistens auch nachher.

- Violett unterlegt sind Fahrzeugpuls, die auf den verschiedenen Detektoren wiedererkannt werden können.
- Grün unterlegt sind Velos und Gruppen von Velos, die über die Detektoren verfolgt werden können.
- Rot unterlegt sind Fehlmessungen. Der Pfeil auf den Impuls zeigt an, welcher Impuls eigentlich richtig wäre und welcher Impuls vom überfahrenden Fahrzeug fälschlicherweise ausgelöst worden ist.

Der Fahrzeugpulk ab 08:06:15 erzeugt Fehlimpulse auf dem Velostreifen:

- Auf dem ersten Detektor erzeugen die zwei letzten Fahrzeuge einen Fehlimpuls.
- Auf den beiden folgenden Detektoren erzeugt nur noch das letzte Fahrzeug einen Fehlimpuls.

Man erkennt deutlich, dass ohne das Wissen über die benachbarte Fahrzeugspur nur auf dem Velostreifen von einem korrekt erfassten Velo und einem verlorenen Velo nach anfänglicher Detektion ausgegangen werden könnte.

Es sind in Zukunft Regeln abzuleiten, wann ein Impuls als induziert angesehen werden kann, also fälschlicherweise von einem Fahrzeug auf einer anderen Spur ausgelöst worden ist, in der Art wie:

- Induzierte Veloimpulse sind immer kürzer als die originalen Fahrzeugimpulse und treten innerhalb der Dauer des Fahrzeugimpulses auf.
- Sie können sogar Einzelfahrzeuge auf der Höhe des Belegungsdetektors voneinander unterscheiden (siehe violettes Oval um 08:12:20 in der nächsten Abbildung)
- Die Geschwindigkeit der Velos ist üblicherweise kleiner als diejenige der Fahrzeuge, kann aber auch schneller sein (siehe die Pfeile).
- Ein Übersprechen von Velo auf Fahrzeug ist bisher in den Aufzeichnungen noch nicht gefunden worden.

Siehe dazu die Resultate aus den Feldversuchen in Anhang [III.3](#).

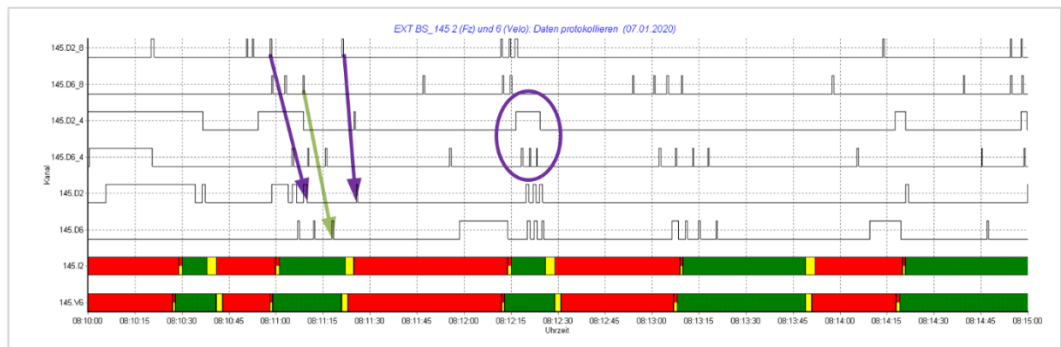


Abb. 117 Verfolgung von Velos und Autos (2) am Knoten BS_145

6.6.2 Motorfahrzeuge

Kürzere Abbiegespuren

Abbiegespuren beginnen meist mit einem eigenen Detektor und trennen sich so von der Hauptspur. Als Beispiel nehmen wir die Ostzufahrt des Knotens Zollikon [111](#), Lageplan siehe Anhang [II.1.4](#).

In der Darstellung der Messungen kann man die einzelnen Detektions-Sequenzen verfolgen, vor allem dann, wenn wenig Verkehr herrscht. In der folgenden Abbildung sind mit Orange Fahrzeuge eingezeichnet, die geradeaus fahren und dabei die Detektoren «DR12_x» überfahren. Mit Violett sind Fahrzeuge markiert, die auf die Linksabbieger Spur gefahren sind und dabei die Detektoren «DR18_x» überfahren.

DR18.2 ist ein Verlängerungsdetektor, DR18.1 befindet sich kurz vor der Haltelinie. Es sind 2 Fälle eingezeichnet:

- Im ersten Fall fährt das Fahrzeug bei Rot bis an die Haltelinie vor. Das führt zur gleichzeitigen Belegung der beiden Detektoren.
- Im zweiten Fall fährt das Fahrzeug entweder langsam vor oder bleibt auf dem Verlängerungsdetektor stehen, bis die Ampel Grün wird. Das führt nur am Schluss zu einer gleichzeitigen Belegung beider Detektoren.

Sobald die Ampel Grün zeigt, fahren beide Fahrzeuge los und werden anschliessend auf dem Detektor DR18.0 noch einmal erfasst. Der Folgedetektor DR18.9 spricht hier nicht an.

Weitere Beispiele findet man in Anhang VI.

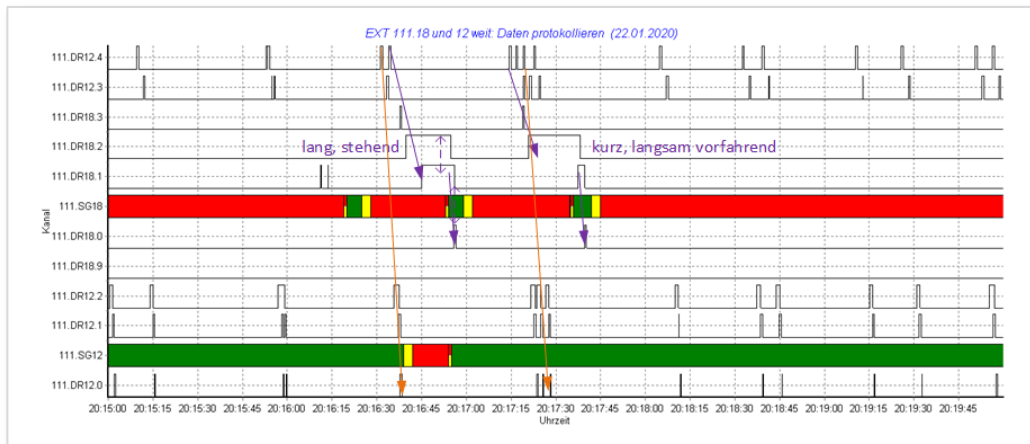


Abb. 118 Geradeaus- und Abbiegeverkehr von Osten am Knoten [111](#), abends

Parallele Spuren

Wir werfen wieder einen Blick auf die Ostzufahrt des Basler Knotens BS_217, siehe [Abb. 81](#). Die Detektoren D6 liegen in der Rechtsabbiegerspur, D7 in der Geradeauspur und D8 in der Linksabbiegerspur.

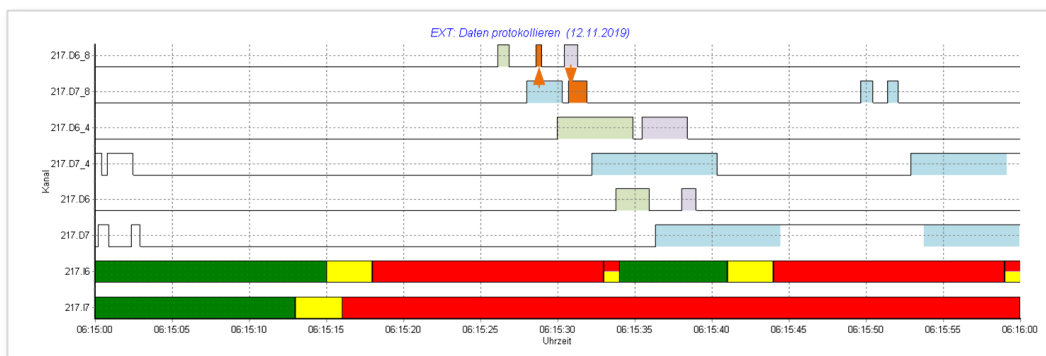


Abb. 119 Gegenseitiges Übersprechen von Fahrzeugen

- Es kommt zuerst ein Auto auf der rechten Spur (6) und wird nur dort detektiert (siehe [Abb. 81](#)).
- Dann kommt ein Auto auf der mittleren Spur (7), welches auf die rechte Spur (6) überspricht.
- Und schliesslich kommt ein Auto auf der rechten Spur (6), welches auf die mittlere Spur (7) überspricht.

Die Verlängerungsdetektoren reagieren korrekt auf die beiden Autos auf der rechten Spur und das einzelne Auto auf der linken Spur, ebenso die Haltelinien-Detektoren.

6.7 Anfahrverhalten

6.7.1 Von Osten (ZUCH_10)

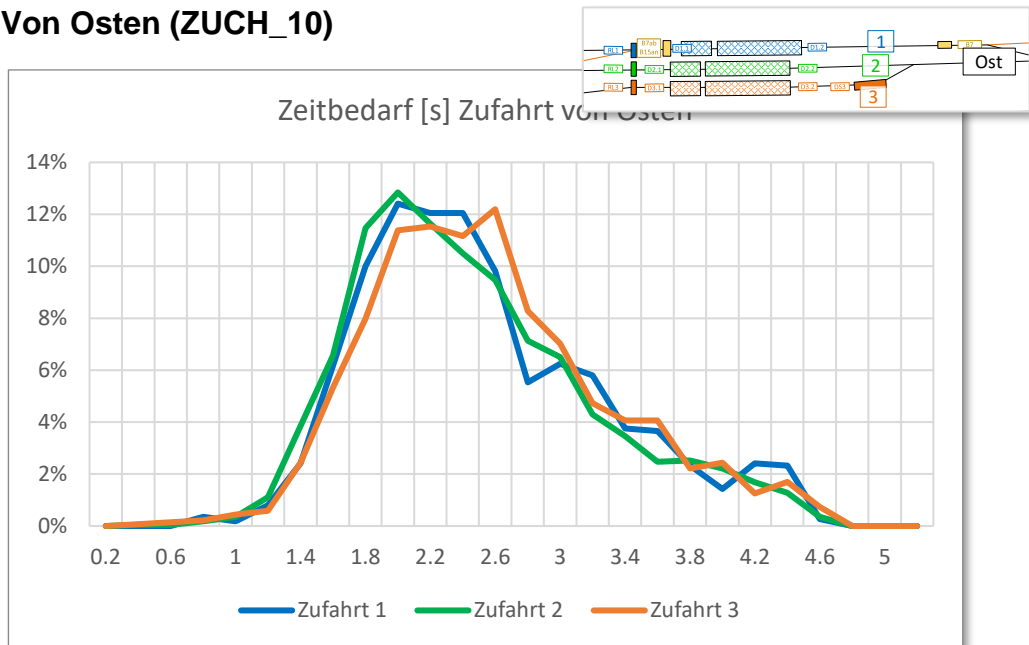


Abb. 120 Verteilung des Zeitbedarfs in der Zufahrt von Osten (ZUCH_10)

Deutlich sieht man, dass die Verteilung von Zufahrt 3 (dem Linksabbieger) längere Zeitbedarfswerte aufweist, was auf einen höheren Schwerverkehrs-Anteil zurückzuführen ist. Allerdings kann man nicht erkennen, wie hoch nun dieser Schwerverkehrsanteil ist.

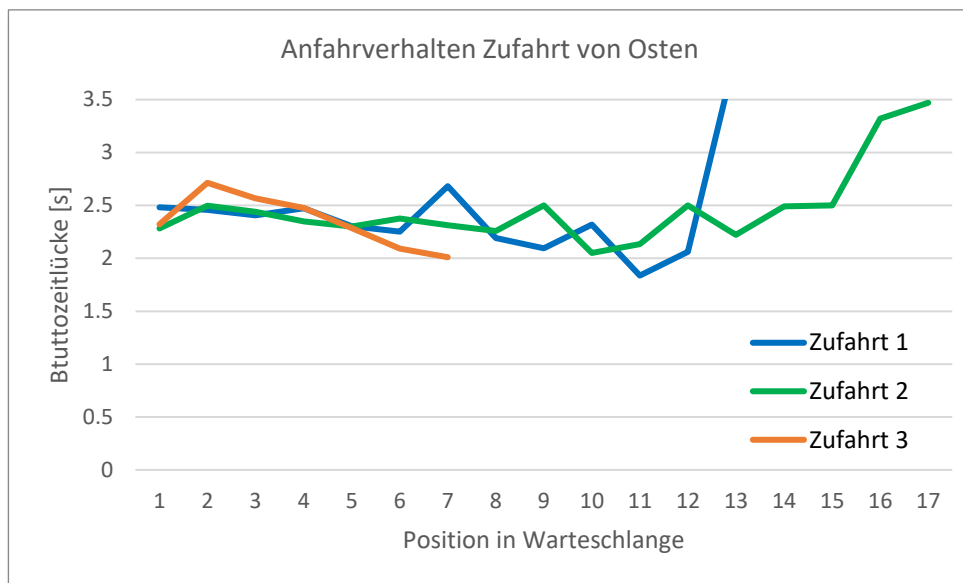


Abb. 121 Anfahrverhalten in der Zufahrt von Osten (ZUCH_10)

Man erkennt in der zeitlichen Abfolge der Zeitbedarfswerte, dass sie alle um etwa 2.3 s bis 2.5 s beginnen. Zufahrt 3, der Linksabbieger, hat von Anfang an höhere Werte, die mit der Fahrzeugposition weiter hinten in der Warteschlange kürzer werden.

Der Zeitbedarfswert in den anderen beiden Zufahrten nimmt auch erst einmal etwas ab, bis er weiter hinten dann zunimmt und eher unregelmässig wird. Die Unregelmässigkeit der Kurven rührt auch von der Anzahl Werte, welche gemittelt worden sind – lange Schlangen sind seltener als kurze, so dass für hintere Fahrzeugpositionen weniger Werte zur Verfügung gestanden haben.

6.7.2 Von Süden (ZUCH_10)

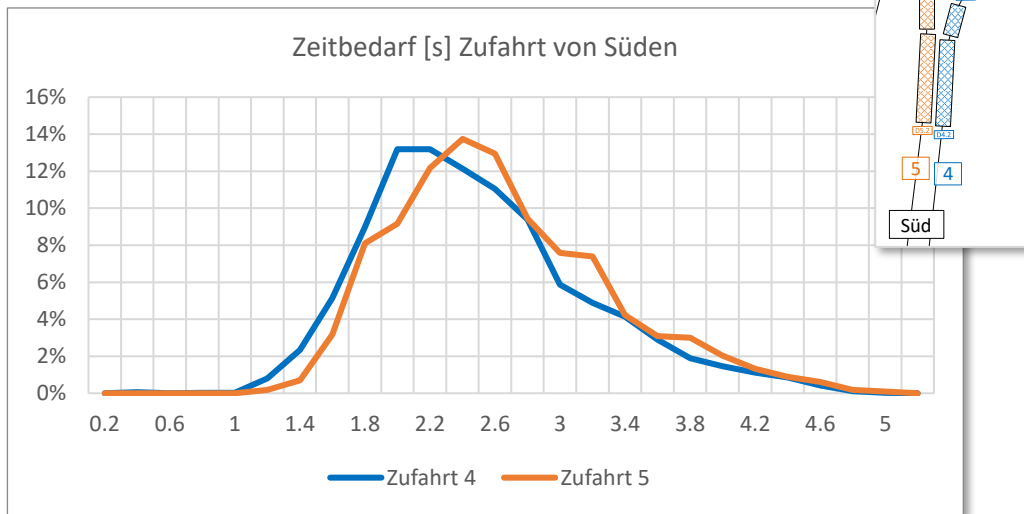


Abb. 122 Verteilung des Zeitbedarfs in der Zufahrt von Süden ([ZUCH_10](#))

Zufahrt 5 hat einen deutlich grösseren Zeitbedarf als Zufahrt 4. Das liegt daran, dass in Zufahrt 5 generell weniger Fahrzeuge vor dem Rotlicht warten und somit die Grünphasen kürzer werden. In diesen Zufahrten wird der Zeitbedarfswert umso kleiner, je länger die Grünphase dauert. Für kurze Grünphasen ist der mittlere Zeitbedarfswert also höher.

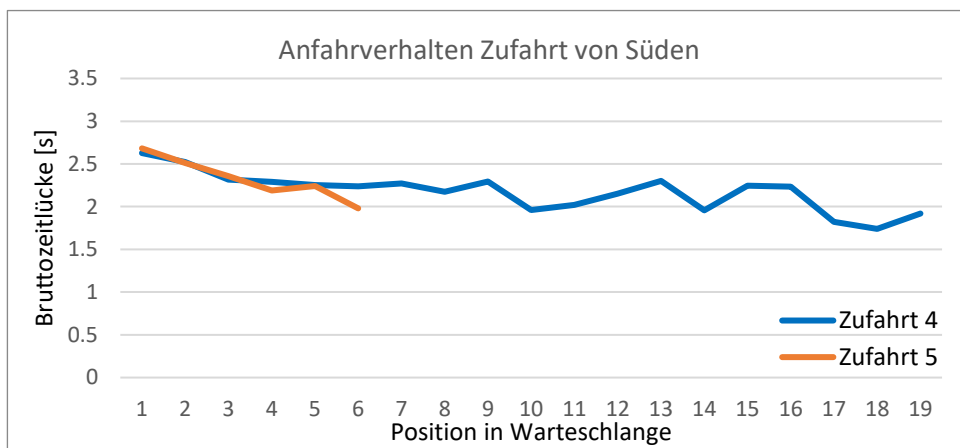


Abb. 123 Anfahrverhalten in der Zufahrt von Süden ([ZUCH_10](#))

Das ist nicht immer so. In [16] beispielsweise ist für die Stadt Zürich in den 1990er-Jahren gemessen worden, dass die Kurven ganz spezifischen Mustern folgen, welche zu zwei Optima der Gröndauer führen, einem kurzen und einem langen.

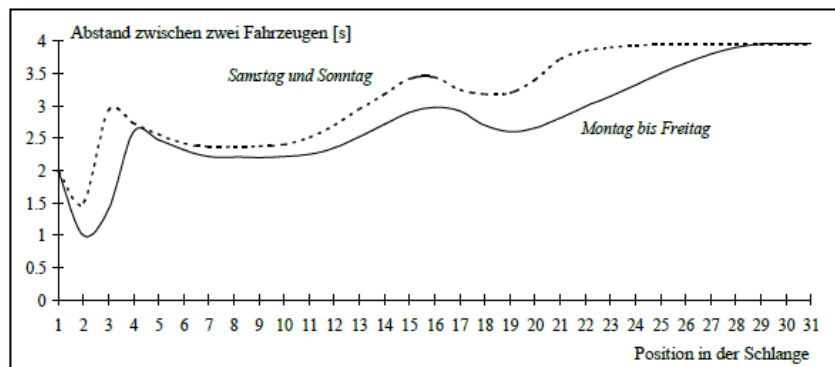


Abb. 124 Abstand zwischen zwei anfahrenden Fahrzeugen im Zürich der 90er-Jahre

7 Schlussfolgerungen und Forschungsbedarf

7.1 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse und Erkenntnisse dieses Berichts beruhen im Wesentlichen auf der Beobachtung von 6 Knotenpunkten in drei verschiedenen Schweizer Städten. Dazu sind alle Zufahrten so gut wie lückenlos mit Videokameras beobachtet worden. Für die gesamte Zeit standen aufgezeichnete Detektorflanken und Signalgruppen-Zustandswechsel zur Verfügung.

Es hat gezeigt werden können, dass es möglich ist, die allermeisten hier beobachteten Phänomene in den Messdaten zu verstehen, wenn man gleichzeitig Videoaufnahmen macht. Nur sehr wenige Daten müssen als «spontane Störung» abgetan werden.

Damit die Daten von den Störeffekten dieser Phänomene befreit werden können, müssen die Phänomene

- erstens automatisch erkannt und
- zweitens die Daten automatisch korrigiert werden können.

Es war nicht die Aufgabe dieser Forschungsarbeit, dies umzusetzen. Es war jedoch die Aufgabe, die Grundlagen über weitere Strecken zu erarbeiten, damit dies in einem nächsten Schritt getan werden kann.

Je nach Anspruch an die Güte der Resultate, sind die Grundlagen schon heute ausreichend, um sie in die Praxis umzusetzen oder sie als Grundlage für die Berechnung komplexerer Grössen als reine Zählwerte von Motorfahrzeugen zu verwenden. Erste Anwendungen in der Praxis werden die hier beobachteten Phänomene bestätigen können und sicher noch weitere Phänomene zu Tage fördern. Darum ist es nun wichtig, die im Anschluss vorgestellte «[Empfehlung für die Umsetzung in die Praxis](#)» umzusetzen und die gewonnenen Erkenntnisse zu validieren.

Aktuell Benutzbar sind die folgenden Erkenntnisse:

- Eine Zählgenauigkeit für Motorfahrzeuge grösser als 98 % bzw. Fehler kleiner als 2 %
- Eine Ermittlung der Geschwindigkeit auf einem Doppeldetektor mit einer Genauigkeit von ± 10 %
- Die Beobachtung des Anfahrverhaltens nach Rot zur Messung des mittleren Zeitbedarfs und des Zeitbedarfs in Funktion der Länge der Warteschlange
- Die Berechnung der Reisezeit zwischen zwei dafür geeigneten Detektoren

(Noch) nicht benutzbar sind folgende Messungen

- Eine Zählgenauigkeit für Motorfahrzeuge von über 99 % bzw. Fehler kleiner als 1 %
- Eine Verfolgung von Einzelfahrzeugen über mehrere Zufahrten und Knotenpunkte zur Messung zeitvarianter Quell-Ziel-Beziehungen
- Die Ermittlung des Lastwagenanteils
- Die Berechnung von Reisezeit, Staulängen und Anzahl Halten über mehrere Detektoren
- Erkennung überholender **Motorräder** auf einer Abbiegepur Spur und Verfolgung und Zählen von Motorrädern im Allgemeinen

Wahrscheinlich nicht erreichbar

- Ermittlung des Lieferwagenanteils oder gar weiterer Fahrzeugklassen

Grösstenteils sind die Themen im einleitenden [Forschungsbedarf](#) nun behandelt worden. Daraus ist weiterer Forschungsbedarf entstanden, der im Folgenden aufgezählt wird.

7.2 Resultierender Forschungsbedarf

7.2.1 Auswertung des anfahrens Verkehrs und von Fahrzeugpulks

Insbesondere anfahrens Verkehr nach Rot ermöglicht interessante Rückschlüsse auf das Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer, aber auch Pulks von Fahrzeugen, welche die Ampel mit oder ohne Verlangsamung passieren können:

- Wie lang braucht das erste Fahrzeug zum Anfahren, wenn die Ampel auf Grün geht?
- Wie gross sind die Abstände zwischen den Fahrzeugen (Nettozeitlücken), d.h. wie wählen die Fahrzeuglenker den Sicherheitsabstand zum vorherfahrenden Fahrzeug? Das lässt Rückschlüsse auf die Wetter- und Sichtverhältnisse zu.
- In welchem Abstand folgen sich die Fahrzeuge (Bruttozeitlücken), d.h. wie gross ist die Kapazität einer Zufahrt und wie verändert sich dieser Abstand in Funktion der Position in einer anfahrens Warteschlange oder in einem fahrenden Pulk?

Fahrzeugabstände in anfahrens Kolonnen

Die Abstände zwischen Fahrzeugen in Fahrzeugpulk haben die Tendenz, nach hinten grösser zu werden oder zumindest unregelmässiger (mit grösserer Streuung). Ganz natürlich stellt sich somit die Frage: ab wann lohnt es sich, auf Rot zu schalten, die Fahrzeuge aufschliessen zu lassen und dann wieder Grün zu geben?

Es lohnt sich dann, wenn die Zunahmen der Abstände von Fahrzeugen im Inneren oder am Ende eines Pulks, verglichen mit den Abständen am Anfang des Pulks, so gross geworden sind, dass sie die Dauer der Summe der beiden Zwischenzeiten übertreffen, die sich durch den Einschub einer zusätzlichen Phase ergeben.

Aus der Messung der Entwicklung der Bruttozeitlücken zwischen aufeinander folgenden Fahrzeugen kann die **optimale Gründauer** einer Phase hergeleitet werden. Sie ist zusätzlich abhängig von den genannten Zwischenzeiten und den genannten Phasen bzw. den verwendeten Phasen- oder Signalfolgen.

Das Anfahrverhalten ist abhängig von der Art der **Zufahrt**, von den **Wetter- und Lichtverhältnissen** und von den Fahrzeuglenkern und ihrer **Ablenkbarkeit**, was sich im **Pendlerverkehr**, im Verkehr tagsüber oder am **Wochenende** äussert.

Mittlerer Fahrzeugabstand in anfahrens Kolonnen

Beschränkt man sich auf die Ermittlung des mittleren Fahrzeugabstandes und nur in der anfahrens oder durchfahrenden Kolonne, so kann man den **aktuellen Zeitbedarfswert** ermitteln. Üblicherweise wird der Zeitbedarfswert mit 2 s pro Fahrzeug angenommen. Wir haben in dieser Forschung aber feststellen können, dass er häufig höher ist und auch abhängig von der Zufahrt. Die gerade gemachten Aussagen zur Zeitabhängigkeit gelten natürlich auch hier.

Der Zeitbedarfswert ist ein wichtiges Berechnungskriterium für die **Länge von Grünphasen**. Er wird ebenfalls zur Berechnung der **Leistungsfähigkeit** eines lichtsignalgeregelten Knotens verwendet, die angeboten werden kann respektive für deren **Dimensionierung** in der Planung. Schliesslich wird er in diesem Zusammenhang auch für die Kategorisierung von Zufahrten und Knotenpunkten in **Qualitätsstufen** verwendet.

Mit der Messung des Zeitbedarfswert lassen sich die **Leistungsannahmen** für die einzelnen Zufahrten überprüfen. Ebenso liesse sich überprüfen, ob die aktuell gültige Einteilung in Qualitätsstufen noch geeignet ist. Schliesslich lässt sich überprüfen, ob unter der Messung des Zeitbedarfswerts die richtigen Knotenpunkte als kritisch identifiziert worden sind.

Fahrzeugabstände in fahrenden Kolonnen

Häufig stellt sich in einer Grünen Welle die Frage, ob es noch sinnvoll ist, einen etwas abgesetzten Pulk noch bei Grün zu bedienen oder ihn anhalten zu lassen. Oder wäre es besser, ihn nur etwas abzubremsen, damit er seine Abstände wieder verkleinern kann? Das wäre einfach mit einem etwas verzögerten Grün zu bewerkstelligen.

Die Antwort hängt vom Abstand des Pulks auf den vorhergehenden Pulk ab und von den Abständen der Fahrzeuge untereinander im Pulk.

Das Erkennen eines etwas abgesetzten Pulks setzt entsprechende Detektoren in der Zufahrt voraus, die aber häufig auf koordinierten Strecken zur Verfügung stehen um den aktuellen Rückstau zu messen. Beispiele sind in Abschnitt [4.5](#) gezeigt worden.

Gründe für veränderliche Fahrzeugabstände

Die Fahrzeugabstände sind häufig unterschiedlich in unterschiedlichen Zufahrten und unter unterschiedlichen Bedingungen. Ist es möglich herauszufinden, warum das so ist?

Ziel für eine effiziente Verkehrsabwicklung ist, die Fahrzeugabstände in einer anfahrenden Kolonne möglichst lange möglichst klein zu halten. Kann man das beeinflussen und, wenn ja, mit welchen Massnahmen?

- Topologische Eingriffe, Ein- und Ausfahrten, Übersichtlichkeit
- Veränderung der «üblichen» Länge der Grünphase, z.B. man hat sich an lange Grünphasen gewöhnt und muss deshalb nicht so aufmerksam sein
- Fahrerfahrung auf Achsen, z.B. die nächste Ampel ist ja sowieso rot, da muss man nicht wirklich schnell losfahren
- Fahrzeugmix, viele Lastwagen, aufeinander folgende Busse

7.2.2 Beobachtung der Staulänge und der Reisezeit

Via Fahrzeit

Einzelschleifen können Belegungszeiten messen. Von der Belegungszeit kann man auf die Geschwindigkeit schliessen, wobei die Fahrzeuglänge eine Unbekannte bleibt. Doppelschleifen können die Geschwindigkeit direkt messen. Aus Zählwerten und Geschwindigkeiten kann ein Punkt im Fundamentaldiagramm berechnet werden, was zu einer Schätzung der Reisezeit zwischen zwei Zählstellen verleiten kann.

Das ist auf kreuzungsfreien Strassen ein übliches Verfahren, im städtischen Strassennetz ist der Einfluss der Lichtsignale meist so gross, dass die geschätzte Reisezeit zu optimistisch ausfällt, da der «Widerstand» des folgenden Knotenpunkts nicht bekannt ist. Oder anders ausgedrückt: der Einfluss von Rot und Grün auf die Reisezeit ist grösser als die Geschwindigkeit, die man auf einem Detektor messen oder errechnen kann.

Diesem Problem kann man beikommen, indem man aus den Rot- und Grünphasen einen aktuellen Widerstand versucht zu berechnen. Man kann auch FCD-Daten einspeisen, welche aktuelle Fahrzeiten wiedergeben, und so den geschätzten Widerstand durch einen gemessenen ersetzen [\[10\]](#).

Sobald die Messungen der Detektoren automatisiert verifizierbar und korrigierbar sind, soll anhand berechneter und mit GPS gemessener Fahrzeiten die Korrektheit der Resultate überprüft werden.

Via Staudetektoren

Die Belegungszeit eines Detektors gibt in gewissem Mass Auskunft über die Geschwindigkeit des Fahrzeugs, welches ihn befahren hat. Bei Doppelschleifen ist die Ermittlung sehr präzise, da bei Einzelschleifen die Fahrzeuglänge nicht gemessen werden kann und dadurch die Geschwindigkeit nur geschätzt.

Die Geschwindigkeit gibt Auskunft über den Verkehrszustand, also fliessend, zähfliessend oder gestaut.

Die oberen drei Detektoren in [Abb. 225](#) zeigen schön, wie drei aufeinander folgende Staudetektoren auf die aktuelle Rückstaulänge schliessen lassen können. Sie zeigen in dieser Abbildung vor allem, wie sich eine Fahrzeugkolonne in Bewegung setzt und wieder zu einem Halt kommt.

7.2.3 Erweiterung auf andere Verkehrsträger

Die bisherigen Beschreibungen haben den motorisierten Individualverkehr (MIV) als Beispiel genommen. Die Erkenntnisse sollen jedoch auch auf andere Verkehrsträger erweitert und überprüft werden:

- Öffentlicher Verkehr: sofern er über Detektoren oder Meldepunkte verfügt, können hier ebenfalls Zählungen durchgeführt werden, Geschwindigkeiten und Reisezeiten bestimmt oder auch Abläufe mit hoher Verkehrsdichte des öffentlichen Verkehrs analysiert werden.
- Velos: sofern Velodetektoren vorhanden sind, die man vom MIV unterscheiden kann, können auch hier Werte ermittelt werden. In diesem Zusammenhang kann die Reisezeit ein interessanter Wert sein bzw. die Zusammensetzung der Reisezeiten, da immer mehr Velos elektrisch betrieben werden und schneller fahren können.
- Fussgänger: Fussgänger können mengenmässig nicht erfasst werden, es sei denn, spezielle Detektoren sind vorhanden. Fussgänger-Gehzeiten können aber statistisch ermittelt werden, vor allem, wenn die Fussgänger mehrere Ampeln hintereinander überqueren müssen [\[14\]](#).

7.2.4 Beobachtung von Koordinationsbrüchen

Abschnitt [4.5](#) führt in die Problematik ein und skizziert den Lösungsansatz. Er beruht auf der Abstraktion ein mesoskopisches Modell durch

- Identifikation von Fahrzeuggruppen,
- Erkennung von Dauerbelegungen und
- Berücksichtigung der Grünzeiten von Signalgruppen.

Konkrete Beispiele und Überprüfungen hätten jedoch den Rahmen dieser Forschungsarbeit gesprengt. Wichtig für diese Art der Beobachtung ist, dass möglichst viele Fahrzeuggruppen identifiziert werden können. Das geht nur mit qualitätsgesicherten Impulsdaten von Detektoren.

7.2.5 Ermittlung von Längenklassen

Einheitliche Technologie (z.B. nur Videodetektoren) sowie einheitliche Empfindlichkeit und Bauart (z.B. nur Induktionsschleifen) sind wahrscheinlich Voraussetzung, um mit Doppeldetektoren nicht nur Geschwindigkeit, sondern auch Längenklassen ermitteln zu können.

7.2.6 Zählen von Velos und Motorrädern

Velos und Motorräder können nur lückenhaft auf gewissen Detektoren erahnt werden. Durch ihre Verfolgung im System wären eine genauere Erfassung und somit eine genauere Zählung wohl möglich.

7.2.7 Beobachtung von Quell-Ziel-Beziehungen

Zeitvariante Quell-Ziel-Matrix können pro Knoten einfach geschätzt werden. In Gebieten ist es schwieriger [\[7\]](#) und setzt qualitätsgesicherte Impulsdaten von Detektoren voraus. Konkrete Beispiele und Überprüfungen hätten den Rahmen dieser Forschungsarbeit gesprengt. Ein paar anschauliche Beispiele sind in den Abschnitten [4.5](#) und [6.4](#) sowie in Anhang [VI](#) gezeigt.

7.2.8 Kombination mit anderen Datenquellen

In Ermangelung adäquater Datenquellen im Umfeld der beobachteten Systeme hat die Forschungsarbeit der Frage nicht nachgehen können, welche anderen Messungen mit qualitätsgesicherten Detektormesswerten verbessert werden können oder welche externen Quellen in der Lage sind, Messlücken der Detektoren zu schliessen.

8 Empfehlung für die Umsetzung in die Praxis

Kurzfassung

Dieses Kapitel soll den Leser in die Lage versetzen, die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit nachzuvollziehen und in der Praxis anzuwenden. Es gliedert sich in

- Arbeiten vor dem Zählen,
- Aufgaben während des Zählens und
- Periodische Nachprüfungen.

Die Arbeiten vor dem Zählen entsprechen einer Analyse der vorhandenen Detektionsmittel und einer Berechnung ihrer Genauigkeit.

Die Aufgaben während des Zählens sind eher automatisierter, algorithmischer Natur und dienen der Überprüfung der Plausibilität der Zählwerte.

Die periodischen Nachprüfungen sollen sicher stellen, dass die Resultate der Arbeiten vor dem Zählen immer noch gültig sind.

Ein einheitliches Vorgehen bringt viele Vorteile mit sich, nicht nur die Vergleichbarkeit der Zählwerte und anderer ermittelter Grössen. Dank des möglichen Erfahrungsaustauschs unter den Anwendern wird auch der Weg einfacher, wie man zu diesen Grössen gelangt und wie man deren Qualität auf einem hohen Standard halten kann.

Erste Erfahrungen

Erste Erfahrungen werden zeigen, ob diese Empfehlungen allgemeingültig und verständlich sind. Es wird sich auch zeigen, welcher Schritt mit wie viel Aufwand verbunden ist. Und natürlich werden in einer Anfangsphase die für den zweiten und dritten Schritt beschriebenen Algorithmen entwickelt, getestet und wohl auch verbessert werden müssen.

8.1 Vor dem Zählen

Diese Arbeiten sollen so weit wie möglich mit den Detektionsmitteln des Systems selbst durchgeführt werden können. Nur in Ausnahmefällen sollte man auf Referenzmessungen ausserhalb des Systems zurückgreifen müssen (Zählungen von Hand oder mit mobilen Sensoren).

Je mehr Redundanz die Messungen aufweisen, umso wahrscheinlicher ist es, dass die Information korrekt aus den Messungen herausgelesen werden kann.

Plausibilität – interpretierbar?

- Plausibilität: Können die gemessenen Werte überhaupt interpretiert werden? Hier werden Messungen verworfen, wo kein nützlicher Inhalt erkannt werden kann.

Haben die Messwerte diesen Test bestanden, werden sie als **interpretierbar** bezeichnet und können generell verwendet werden.

Auswahl der Detektoren zum Zählen von Fahrzeugen

Wir haben zeigen können, dass das rohe Detektorsignal vorverarbeitet werden kann, um die Zählwerte zu verbessern. Das geht aber nur, wenn zu viele Impulse gemessen werden.

- Somit kann man als erstes zu lange Detektoren aussondern, vor allem Verlängerungsdetektoren, für anschauliche Beispiele siehe dazu den Abschnitt [8.5](#).
- Auch Detektoren in den Zufahrten, die regelmässig überstaut werden, haben die Tendenz, zu wenig Fahrzeuge zu zählen.

- Schliesslich führt man eine Probezählung mit allen verbleibenden Detektoren durch und sucht sich diejenigen Detektoren aus, deren Zählwerte am ähnlichsten sind.
- Kann man sich nicht entscheiden, da es mindestens zwei etwa gleich starke Garben von Zählwerten gibt, muss man diese Detektoren genauer betrachten oder ganz einfach den einen willkürlich wählen.

Rückfallebenen

Ist eine hohe Zuverlässigkeit gefordert, muss mit dem Ausfall eines Detektors umgegangen werden können. Dazu gibt es die folgenden Möglichkeiten:

- Bereitstellung von **Ersatz-Detektoren** in derselben Garbe, falls der gewählte Detektor ausfallen sollte, kurzzeitig gestört ist oder sein Verhalten suspekt wird.
- Eventuell auch Bereitstellung von Ersatz-Detektoren, deren Abweichung der Zählwerte bezüglich des gewählten Detektors beschreibbar sind, entweder durch einen konstanten Offset, einen Proportionalitätsfaktor oder durch eine **Abweichungs-Ganglinie** [8].
- Geht es nur um statistische Aussagen beispielsweise von Stunden-Zählwerten, können über **Ersatz-Ganglinien** die fehlenden Werte interpoliert werden. Jede Ganglinie benötigt eine periodische Überprüfung, ob sie noch aktuell ist oder ob sie sich korrekt selbstständig nachgeführt hat [8].

Empfehlungen bezüglich Anordnung von Detektoren

- Die Detektoren sollen möglichst nie überstaut werden.
- Die Detektoren einzelne Fahrzeuge voneinander unterscheiden können. Sie müssen geometrisch so aufgebaut sein, dass sie in der Empfindlichkeit so eingestellt werden können, dass eine Fahrzeuglücke immer als solche erkannt wird. Bei stehendem Verkehr kann das schwierig sein. Darum der Wunsch, dass sie nie überstaut werden sollen.
- Will man auch Velos zählen können, braucht es dafür spezielle Detektoren. Entweder zählen diese nur Velos, oder auch Velos – dann muss die Differenz zu einem nahen Detektor gebildet werden, der keine Velos zählt.
- Detektoren sollen gegenüber Abstand zu parallelen Fahrspuren aufweisen, sowohl in dieselbe Richtung als auch in die Gegenrichtung.

Haltelinien-nahe Detektoren bieten sich deshalb am meisten für das Zählen an.

An zweiter Stelle folgen Detektoren, welche weit genug von der Haltelinie entfernt liegen, dass sie nicht periodisch überstaut werden. Das können Detektoren im Zufluss sein oder auch Detektoren im Abfluss. Meist sind diese Detektoren jedoch etwas länger als die Haltelinien-nahen Detektoren, so dass nicht immer in der Lage sind, korrekt aufeinander folgende Fahrzeuge voneinander zu unterscheiden – eben am häufigsten bei Stau.

8.2 Während des Zählens

Neben dem Zählen müssen die Algorithmen mindestens in der Lage sein zu erkennen, ob die Messwerte plausibel sind. Folgende Zusatzaufgaben können sie haben:

- Bestimmung der aktuellen Zählgenauigkeit
- Verwendung eines Ersatzdetektors, falls die Messwerte unplausibel sind
- Verbesserung der Zählgenauigkeit durch Anwenden einer Verbesserungsmethode

Störung – nutzbar?

- Ist der Messwert als einzelner betrachtet störungsfrei?
Hier werden die Messungen auf ihre Wahrscheinlichkeit überprüft, ob sie einen physikalisch möglichen Prozess abbilden.
Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass Messwerte vorverarbeitet sein können und

nicht die ursprüngliche physikalische Messung beinhalten, siehe dazu als Beispiel die Staudetektoren in der Südzufahrt zu [ZUCH_10](#) in Anhang [III.6.5](#).

Redundanz umgebender Messwerte ist nicht erforderlich. Statistische Vergleichsmessungen von umgebenden Detektoren können jedoch beigezogen werden, siehe beispielsweise Abschnitt [6.1.4](#).

Der Übergang zum nächsten Testschritt, der Fehlererkennung und Fehlerkorrektur anhand von Redundanz, ist fließend.

Sind die Messwerte als störungsfrei erkannt worden, werden sie als **nutzbar** bezeichnet und können weiter verarbeitet werden.

Korrekt oder korrigierbar?

- [Quervergleich](#), [Längsvergleich](#) und [Gegenverkehr](#) sind Tests, welche durch Redundanz «Checksummen» errechnen und bei Unstimmigkeiten versuchen, die originalen Signale wieder herzustellen.

Je grösser die Redundanz, umso mehr Erfolg ist den Verfahren beschieden.

Allgemein müssen mikroskopische Verfahren Zeitreihen auf Ähnlichkeit überprüfen:

- Übersprechende Fahrzeuge (Quervergleich) sind gleichzeitig in verschiedenen Zeitreihen zu sehen, evtl. mit einer gewissen Verzögerung und einer unterschiedlichen Pulsdauer.
- Fahrende Fahrzeuge (Längsvergleich) sind zeitlich verzögert in unterschiedlichen Zeitreihen zu sehen, evtl. mit unterschiedlichen Verzögerungen der verschiedenen Fahrzeuge und evtl. mit unterschiedlichen Pulsbreiten, je nach Geschwindigkeit oder Detektor-Einstellung.

Genauigkeit

- Nebst der Überwachung der Genauigkeit auf die Einhaltung gewisser Toleranzen kann auch die absolute Bestimmung der Genauigkeit eine Anforderung an das System sein.

8.3 Periodische Nachprüfungen

Alle beunruhigenden Beobachtungen während des Zählens müssen protokolliert werden. Dazu gehört meist gehäuftes Auftreten von Störungen, nicht korrigierbaren Phänomenen oder zu grosse Abweichungen bei der Genauigkeit.

Ebenso ist es hier wichtig, als Referenz verwendete Detektoren periodisch zu überprüfen und sie, beispielsweise anhand der Garben zur Auswahl des Detektors und zu reflektieren, ob die Auswahl noch heute Gültigkeit hat.

8.4 Plausibilität

Die Plausibilität von Detektoraufzeichnungen kann optisch gut nachvollzogen werden. Die einzelnen Kriterien können in Regeln gefasst werden, welche hier entwickelt werden sollen. Die Beispiele entstammen einem falsch konfigurierten Knoten, was inzwischen korrigiert worden ist.

Besteht ein Detektor den Plausibilitätstest, kann er verwendet werden, denn seine Messdaten können interpretiert werden. Sonst muss er verworfen werden, denn es sind weder Erklärung noch Korrektur für sein Verhalten möglich.

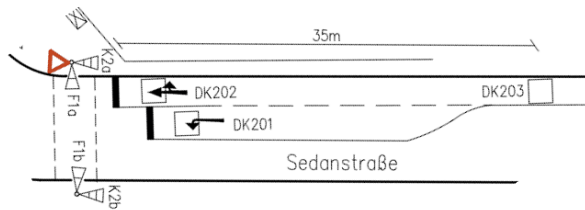


Abb. 125 Beispiel einer Zufahrt («Frankfurt 1228 Nord»)

In der nächsten Abbildung ist ein Signalmitschnitt der 2 Spuren dargestellt:

- zuerst sind die beiden aufeinander folgenden Detektoren für geradeaus und rechts gezeigt, DK203 und DK202,
- dann die zugehörige Signalgruppe K2 (im Lageplan zwei Mal eingezeichnet als K2a und K2b),
- und schliesslich der Detektor an der Haltelinie des Linksabbiegers DK201, welcher auch die dargestellte Signalgruppe benutzt.

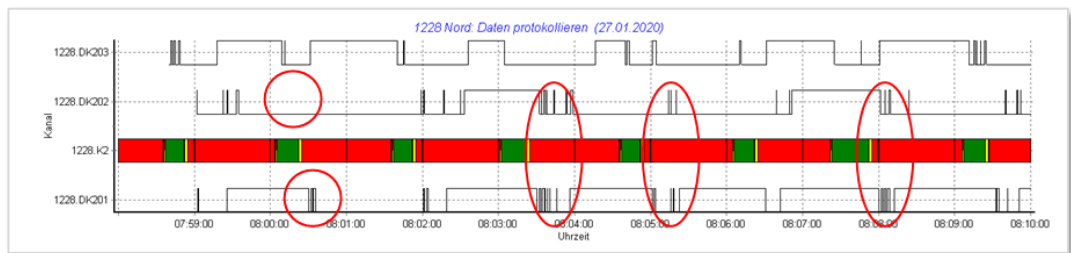


Abb. 126 Signalplanmitschnitt der Zufahrt «Frankfurt 1228 Nord»

8.4.1 Regel 1: Detektor und Signalgruppe

- Detektoren vor der Haltelinie müssen bei Rot eine lange Belegung aufweisen, bei Grün kürzere. Ausnahmen können vorkommen bei der Detektion von Velos (siehe [Abb. 155](#)).
- Detektoren nach der Haltelinie dürfen bei Rot nicht belegt sein und weisen bei Grün eher kurze Belegungszeiten auf.

Es fällt auf, dass DK202 und DK201 häufig Fahrzeuge messen, sobald K2 gerade wieder Rot geworden ist. Das ist nicht plausibel.

8.4.2 Regel 2: nachts kann man die Fahrzeuge verfolgen

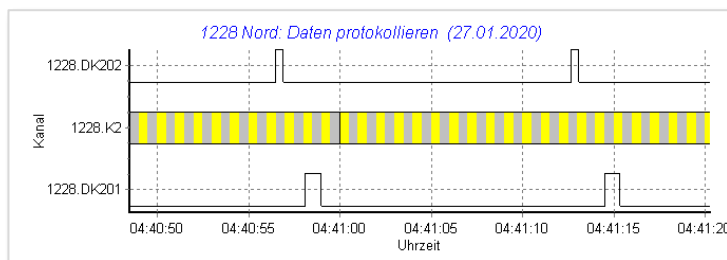


Abb. 127 Signalplanmitschnitt der Zufahrt «1228 Nord», nachts

Man sieht schön die Abfolge von DK202 auf DK201, das Lichtsignal blinkt. DK201 weist längere Impulse auf, was entweder auf eine kleinere Geschwindigkeit der Fahrzeuge oder auf einen längeren Detektor schliessen lässt.

Dummerweise liegen diese beiden Detektoren gemäss Lageplan nicht hintereinander. Deshalb ist die Messung unplausibel. Inzwischen hat sich gezeigt, dass die Detektoren falsch angeschlossen worden sind, so dass DK202 eigentlich DK203 wäre und DK201 eigentlich DK202, so dass die Aufzeichnungen von hintereinander liegenden Detektoren stammen, aber falsch angeschrieben.

8.4.3 Regel 3: entfernte Detektoren

Detektoren, welche weit von der Haltelinie entfernt sind, weisen eher kurze Belegungszeiten auf, auch wenn sie lang sind. DK203 in der oberen Abbildung weist lange und wenige Belegungen auf. Er ist Haltelinien-fern, seine Messung deutet aber eher auf einen Detektor vor der Haltelinie hin. Sein Verhalten würde zu DK201 passen.

8.4.4 Regel 4: Korrelation

Zwischen den Messdaten aufeinander folgender Detektoren muss eine Korrelation erkennbar sein, nicht immer, aber häufig genug.

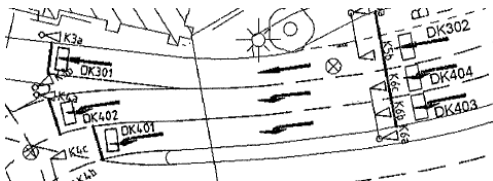


Abb. 128 Beispiel einer Zufahrt («1201 Nord»)

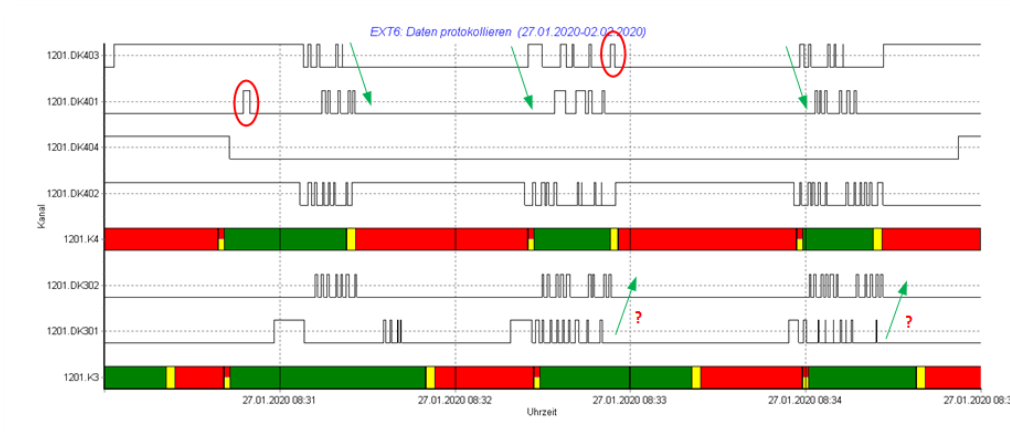


Abb. 129 Signalplanmitschnitt der Zufahrt «1201 Nord»

- Die Abfolge DK403 → DK401 (linke Linksabbiegerspur) sieht plausibel aus, die Fahrzeuge lassen sich verfolgen, was durch die grünen Pfeile angedeutet ist. Es sind seltsame Impulse vorhanden, die aber nicht hier zu analysieren sind (es könnten z.B. Spurwechsel sein).
- DK404 (rechte Linksabbiegerspur) liefert so gut wie keine nützlichen Daten, sein Folgedetektor DK402 sieht plausibel aus.
- Es fällt auf, dass DK401 und DK402 ganz unterschiedliche Signale liefern, obwohl beide vor der Haltelinie liegen. Auf DK401 scheint nie ein Fahrzeug vor Rot zu warten. Das stimmt misstrauisch.
- Die Abfolge DK302 → DK301 sieht manchmal so aus, wie wenn die Detektoren verkehrt verdrahtet wären (also für eine Abfolge DK301 → DK302). Das ist mit den grünen Pfeilen und roten Fragezeichen eingezeichnet.
- Aber häufig sehen diese beiden Signale ganz einfach unkorreliert aus, was in der nächsten Abbildung gezeigt ist.

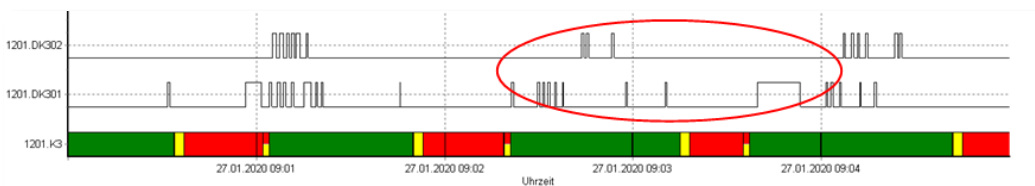


Abb. 130 Signalplanmitschnitt der Zufahrt «1201 Nord» (etwas später)

8.5 Auswahl der Detektoren zum Zählen von Fahrzeugen

8.5.1 Zu lange Detektoren verwerfen

Die nächste Abbildung ist bereits im Kapitel [3.2](#) gezeigt worden.

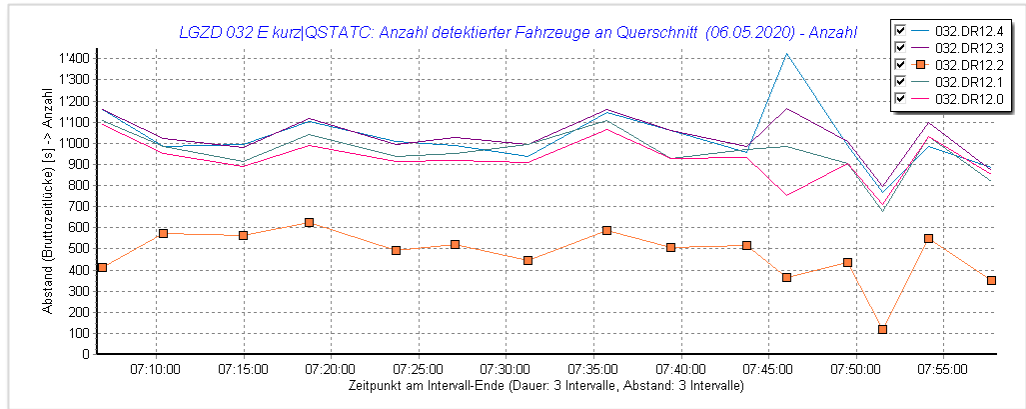


Abb. 31 Zählwerte pro 3 Umläufe in der Zufahrt 12 am Knoten [032](#) (E)

Wir erkennen klar, dass Detektor 032.DR12.2 sich nicht zum Zählen eignen kann. Er ist zu lang und ist als Verlängerungsdetektor ausgelegt worden.

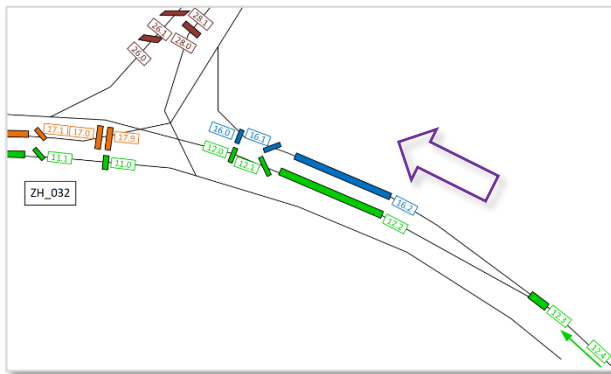


Abb. 29 Lageplan zur Verfolgung von Fahrzeugen am Knoten [032](#) (E)

8.5.2 Aus den kurzen Detektoren auswählen

Es verbleiben die beiden Detektoren vor und nach der Haltelinie (12.1 und 12.0) und die beiden Detektoren in der Zufahrt (12.3 und 12.4) in der Auswahl.

Allerdings zählen die beiden letzteren Detektoren auch die Rechtsabbiegerspur mit. Sie sollten nur in Ausnahmefällen verwendet werden, und zwar dann, wenn sich die beiden Haltelinien-nahen Detektoren als unzuverlässig herausstellen. Dann dürfen sie unter der Bedingung verwendet werden, dass die Haltelinien-nahen Detektoren der Rechtsabbiegerspur 16.0 und 16.1 zuverlässig zählen und ihre Werte von den Zählwerten der beiden Spuren zusammen subtrahiert werden können, so dass die korrekte Anzahl Fahrzeuge, die geradeaus fahren, berechnet werden kann.

Zur Auswahl benötigen wir die Verteilung der Bruttozeitlücken, um zu erfahren, ob Prellen oder Schwingen auf den Detektoren auftritt, siehe dazu den Abschnitt [4.2.3](#) «[Signalanalyse](#)». Statistische Aussagen benötigen immer eine genügend grosse Anzahl von Messungen. Deshalb haben wir die Bruttozeitlücken über einen ganzen Tag beobachtet:

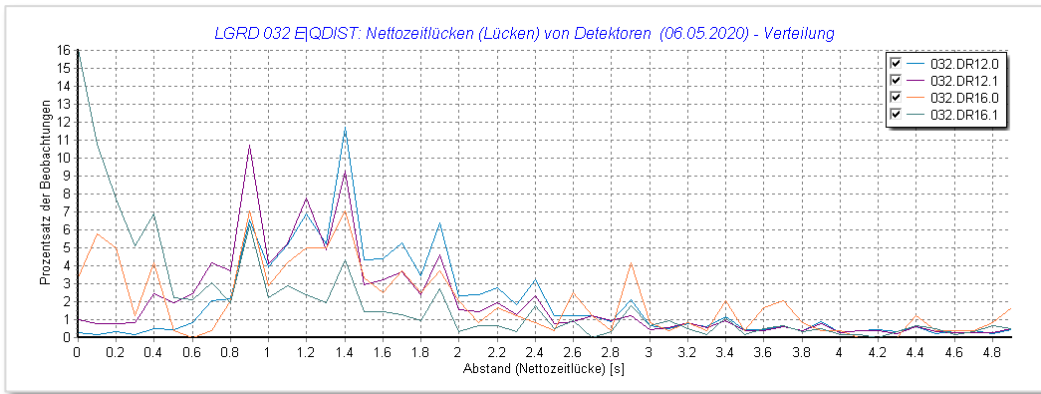


Abb. 131 Bruttozeitlücken der Haltelinien-nahen Detektoren am Knoten 032 (E)

Weil wir den Rechtsabbieger vorhin erwähnt haben, zeigen wir die Verteilungsfunktion auch für seine beiden Haltelinien-nahen Detektoren.

- Bei den Detektoren 16.0 und 16.1 für den Rechtsabbieger Man sieht eine typische Grenze bei 0.6 s¹³. Dieser Grenzwert ist in der Vorverarbeitung des Signals gemäss Abschnitt [4.2.3](#) einzustellen.
- Bei den Detektoren 12.0 und 12.1 für den Geradeausverkehr ist die Grenze nicht so deutlich ersichtlich. Detektor 12.0 kommt (fast) ohne Vorverarbeitung aus, seine Signale sind offenbar von sich aus schon so gut wie fehlerfrei. Ist das wirklich so?

Der Schein kann trügen: wenig Preller kann auch bedeuten, dass generell weniger Fahrzeuge gezählt werden.

Die Antwort finden wir im Vergleich der unkorrigierten mit den korrigierten Zählwerten in den nächsten zwei Diagrammen.

- Unkorrigiert zählt 12.1 immer etwas mehr als 12.0, um 07:45 sogar recht viel mehr. Da werden wir an anderer Stelle sehen, dass die Forchbahn vorbeigefahren ist und die Detektoren stört hat, siehe dazu den Anhang [VII.1.2](#) und die [Abb. 235](#).
- Korrigiert ist die Tendenz andersherum, dass 12.0 eher etwas mehr zählt als 12.1.

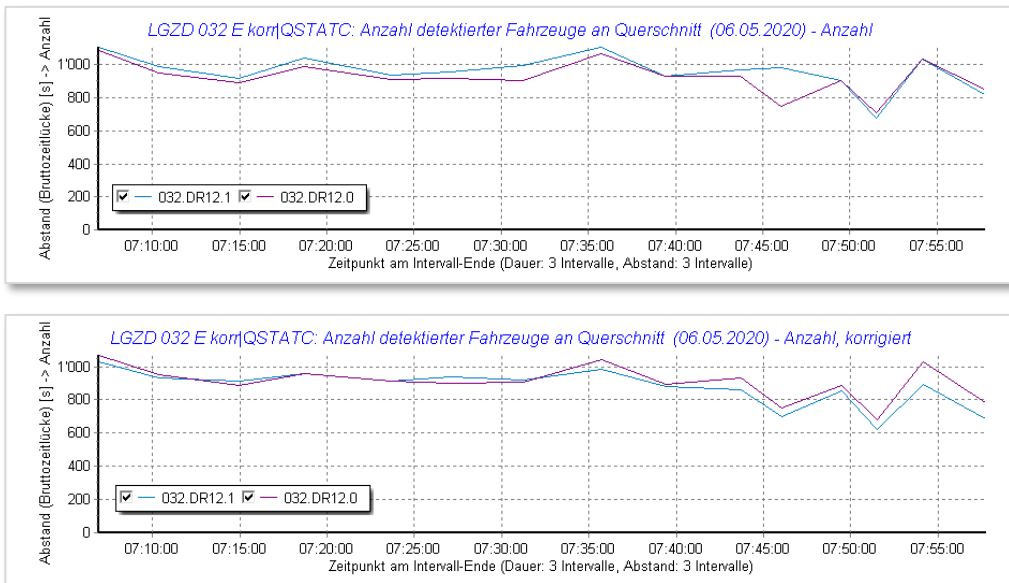


Abb. 132 Direkte und korrigierte Zählwerte von Detektoren am Knoten 032 (E)

¹³ die Verteilung der Nettozeitlücken hat eine Auflösung von 0.1 s und zeigt jeweils den unteren Wert des nach unten offenen Intervalls an: «0.6 s» bedeutet also: > 0.6 s und ≤ 0.7 s

Da wir nicht genauer wissen, wer nun Recht hat, können wir den einen oder den anderen Detektor für das Zählen verwenden und aus der Uneinigkeit der beiden Detektoren die Genauigkeit bestimmen.

Ein Blick auf die Stundenwerte zeigt, dass die Zählwerte sehr nahe beieinander liegen. Im unteren Teil der nächsten Graphik ist der absolute Fehler aufgetragen.

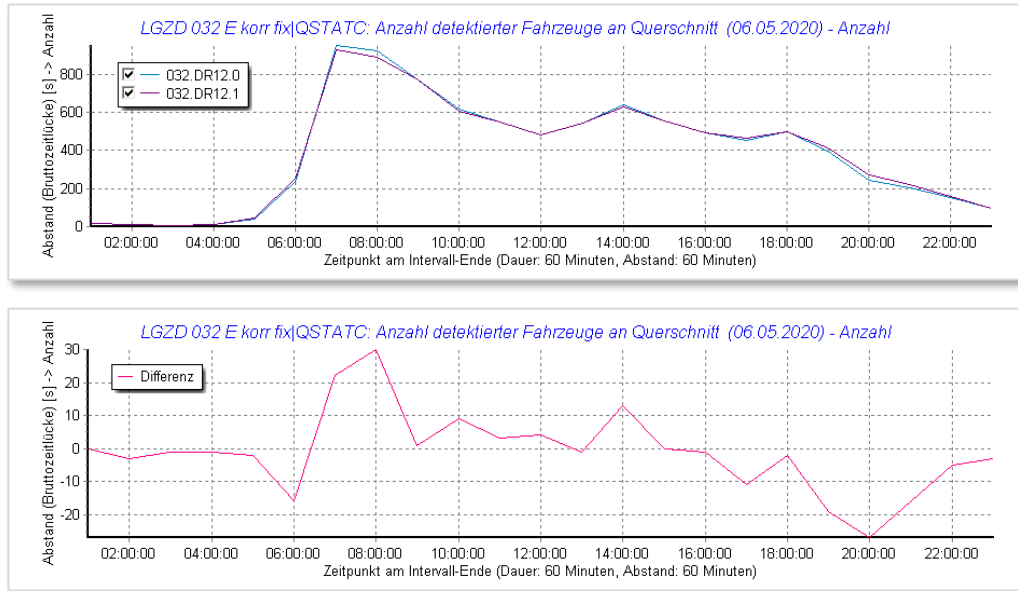


Abb. 133 Stundenwerte und Differenz von Detektoren am Knoten [032](#) (E)

Der relative Fehler als absolute Abweichung zum Mittelwert der beiden Messungen ist aus der nächsten Abbildung ersichtlich:

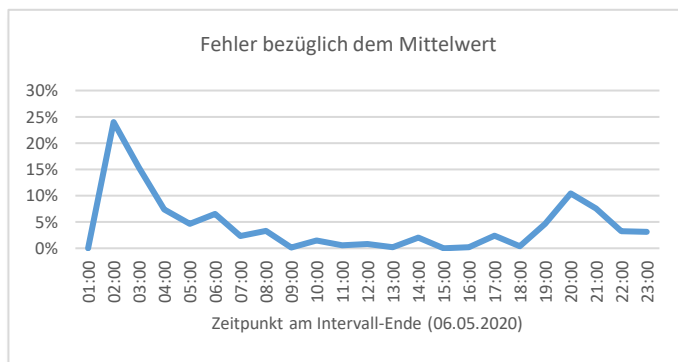


Abb. 134 Fehler bezüglich dem Mittelwert am Knoten [032](#) (E)

Erwartungsgemäss ist der Fehler umso grösser, je weniger Fahrzeuge gezählt werden, also in den Randstunden.

Bezüglich Tagesverkehr erreicht man hier einen erstaunlich geringen Fehler von $\pm 0.29\%$!

Es würde sich lohnen, einen Blick auf die Zeit mit geringem Verkehrsaufkommen zu werfen und zu versuchen, auch dort den Fehler zu reduzieren, nun aber durch mikroskopische Betrachtungen der Einzelfahrzeuge.

Anhänge

I	Phänomene	117
II	Lagepläne	118
II.1	Forchstrasse in Zollikon	118
II.1.1	Knoten Zollikon 110	119
II.1.2	Knoten Zollikon 032	119
II.1.3	Knoten Zollikon 141	120
II.1.4	Knoten Zollikon 111	120
II.2	Knoten Zuchwil ZUCH_10.....	121
II.3	Knoten Solothurn SOLO_16	122
III	Panoptikum der Phänomene an der Haltelinie	123
III.1	Gegenverkehr.....	123
III.1.1	Einzeldetektion	123
III.1.2	Mehrfachdetektion.....	124
III.2	Parallelverkehr	124
III.2.1	Breites Fahrzeug.....	125
III.2.2	Ausholen beim Abbiegen	126
III.2.3	Schlecht entstörtes Fahrzeug (Auto)	126
III.3	Velo	127
III.3.1	Impuls.....	127
III.3.2	Belegung	128
III.3.3	Velostreifen	128
III.3.4	Überholte Velos.....	131
III.3.5	Velo auf Trottoir.....	132
III.3.6	Velo auf Fussgängersteifen	133
III.3.7	Velo auf Abwegen	133
III.4	Zweirad an falscher Haltelinie	134
III.5	Motorrad	135
III.6	Auto an der Haltelinie	136
III.6.1	Doppeltes Ansprechen	136
III.6.2	Schwingendes Ansprechen.....	136
III.6.3	Schwingendes Ansprechen einer Belegung mit Löschen.....	137
III.6.4	Schwingender Impuls an der Haltelinie.....	138
III.6.5	Schwingender Verlängerungsdetektor	138
III.6.6	Prellender Verlängerungsdetektor	139
III.6.7	Belegung mit Lücken.....	140
III.7	Phantom-Ansprechen	141
III.7.1	Mit Schwingen und Löschen	141
III.7.2	Als einzelner Impuls	141
III.7.3	Vergessenes Ansprechen	142
III.7.4	Unvollständiges Ansprechen.....	142
III.8	Spurwechsel.....	143
III.8.1	Systematische Spurwechsel	143
III.8.2	Spontane Spurwechsel	144
III.9	Überholende Motorräder	145
III.9.1	Überholende Motorräder nach der Haltelinie	145
III.9.2	Überholende Motorräder vor der Haltelinie	145
III.10	Bus auf der Rechtsabbiegerspur.....	148
III.11	Rotfahrer	149
III.11.1	Velos	149
III.11.2	Autos	149
IV	Panoptikum der Phänomene in den Zufahrten	150
IV.1	Motorrad.....	150

IV.2	Überholen durch eine Ambulanz	150
IV.3	Ein- und Ausfahrten mit dem Quartier	151
IV.4	Kreuzung.....	152
V	Fahrzeugtypen	153
V.1	Fahrzeugtypen am Knoten 032	153
V.2	Fahrzeugtypen am Knoten 110	155
V.3	Fahrzeugtypen am Knoten 141	157
V.4	Fahrzeugtypen an Knoten ZUCH_10	158
VI	Verfolgung von Fahrzeugen	160
VI.1	Einführendes Beispiel	160
VI.2	Knoten 141, 1. Periode	161
VI.2.1	Anmerkungen zur Quell-Ziel-Bestimmung.....	162
VI.2.2	Die Gesamtheit der Phänomene	163
VI.3	Knoten 141, 2. Periode	164
VI.4	Knoten 141, Zusammenfassung der Perioden	164
VII	Störungen	166
VII.1	Forchbahn.....	166
VII.1.1	Knoten 110.....	166
VII.1.2	Knoten 032.....	167
VII.1.3	Knoten 141.....	168
VII.2	Nicht erklärbare spontane Impulse	169
VII.2.1	Knoten 110.....	170
VII.2.2	Knoten 141.....	170

I Phänomene

Die folgende Tabelle nennen wir die Matrix der Phänomene. Sie zeigt vertikal (in y-Richtung) alle beobachteten und im Anhang bebilderten Phänomene. Horizontal (in x-Richtung) zeigt sie mit einem «x» eine Verwechslungsgefahr mit einem anderen Phänomen an.

	<u>Gegenverkehr</u>	<u>Parallelverkehr</u>	<u>Zweirad (Velo, Motorrad)</u>	<u>Velo auf Trottoir</u>	<u>Überholende Motorräder</u>	<u>Störungen</u>
Detektor kurz vor oder nach der Haltelinie						
<u>Gegenverkehr</u>		x	x			
<u>Parallelverkehr</u>			x			
<u>Velo</u> und <u>Motorrad</u>	x	x	x			
<u>Zweirad an falscher Haltelinie</u>		x	x			
<u>Velo auf Trottoir</u>			x			x
<u>Doppeltes Ansprechen</u> (Auto)			x			
<u>Schwingendes Ansprechen</u> (Auto)			(x)			x
<u>Schwingender Impuls</u> (Auto)		<i>(keine Verwechslungsgefahr)</i>				
<u>Belegung mit Lücken</u> (Auto)		<i>(keine Verwechslungsgefahr)</i>				
<u>Phantom-Ansprechen</u>	x	x	x	x		x
<u>Vergessenes Ansprechen</u>		<i>(keine Verwechslungsgefahr)</i>				
<u>Unvollständiges Ansprechen</u>		<i>(keine Verwechslungsgefahr)</i>				
<u>Systematische Spurwechsel</u>		(x)				
<u>Spontane Spurwechsel</u>		x				
<u>Überholende Motorräder</u>		x	x			
<u>Überholte Velos</u>		x			x	
<u>Bus auf der Rechtsabbiegerspur</u>		<i>(keine Verwechslungsgefahr)</i>				
Rotfahrer (<u>Velos</u>)			x			
Rotfahrer (<u>Autos</u>)		<i>(keine Verwechslungsgefahr)</i>				
<u>Velo auf Fussgängersteifen</u>	x	x				x
Doppeldetektor um oder nach Haltelinie						
Gegenverkehr (innerste Spur)		<i>(keine Verwechslungsgefahr)</i>				
Verlängerungsdetektor						
<u>Motorrad</u>		<i>(keine Verwechslungsgefahr)</i>				
<u>Kreuzung</u>		<i>(keine Verwechslungsgefahr)</i>				

Tab. 135 Matrix der Phänomene

Ein Lesebeispiel: Der Fall «Zweirad an falscher Haltelinie» (y) kann mit den Fällen «Parallelverkehr» und «Zweirad (Velo, Motorrad)» (x) verwechselt werden.

II Lagepläne

II.1 Forchstrasse in Zollikon

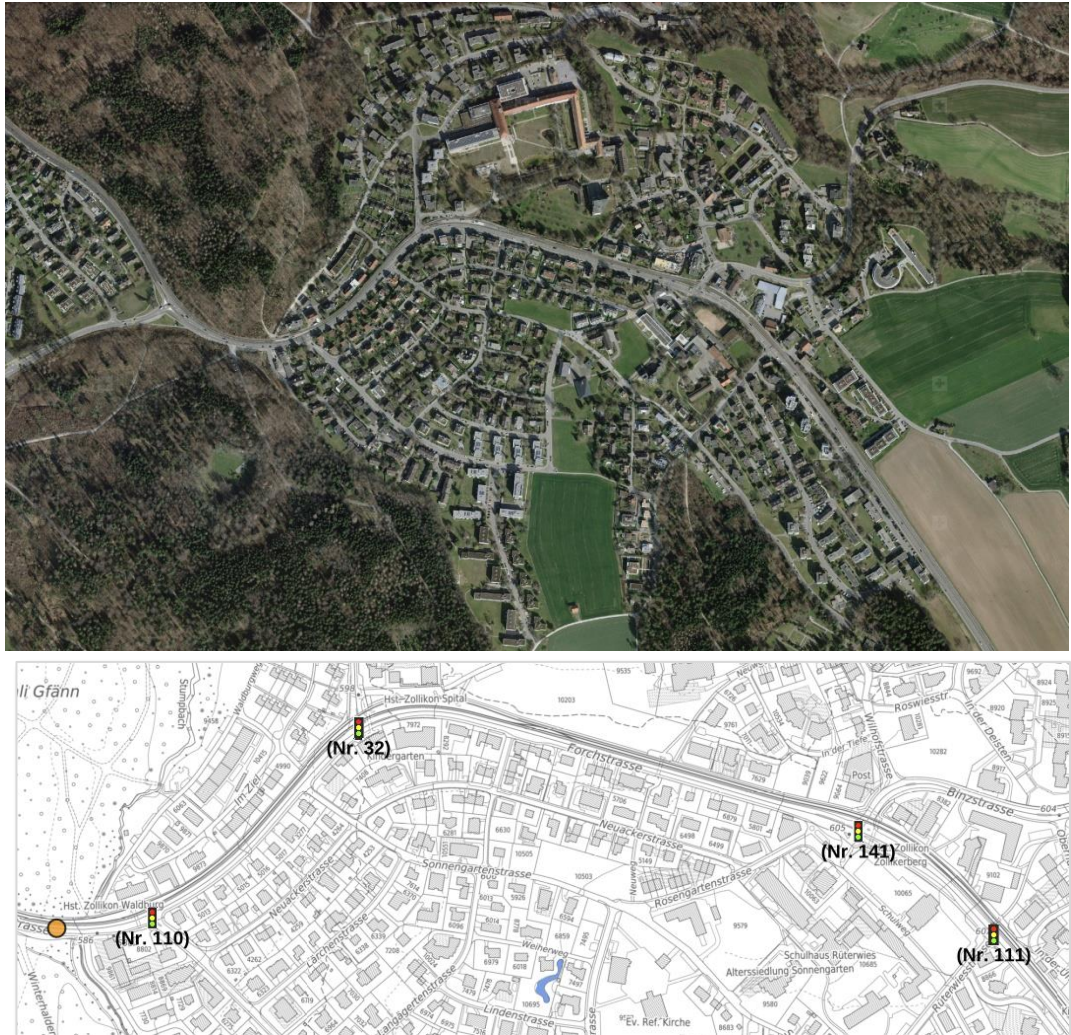


Abb. 136 Knotenabfolge mit Satellitenbild in Zollikon¹⁴

Der Knoten 110 ist der erste, wenn man von Zürich (aus Westen) hinauf nach Zollikon fährt, der Knoten 111 der letzte. Der gelb gefüllte Kreis links von Knoten 110 ist die VDE-Zählstelle 1288.

¹⁴ Luftbild von map.geo.admin.ch, Lageplan von gis.zh.ch

II.1.1 Knoten Zollikon 110



Abb. 137 Luftbild und Detektorschema für Knoten 110¹⁵

II.1.2 Knoten Zollikon 032



Abb. 138 Luftbild und Detektorschema für Knoten 032

¹⁵ Luftbilder von map.geo.admin.ch

II.1.3 Knoten Zollikon 141

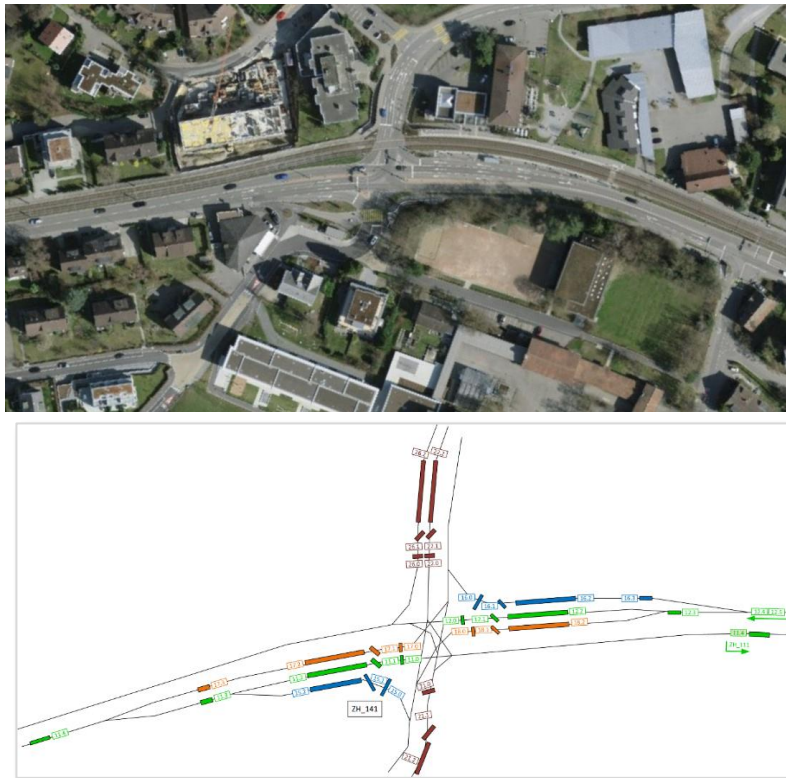


Abb. 139 Luftbild und Detektorschema für Knoten 141¹⁶

II.1.4 Knoten Zollikon 111

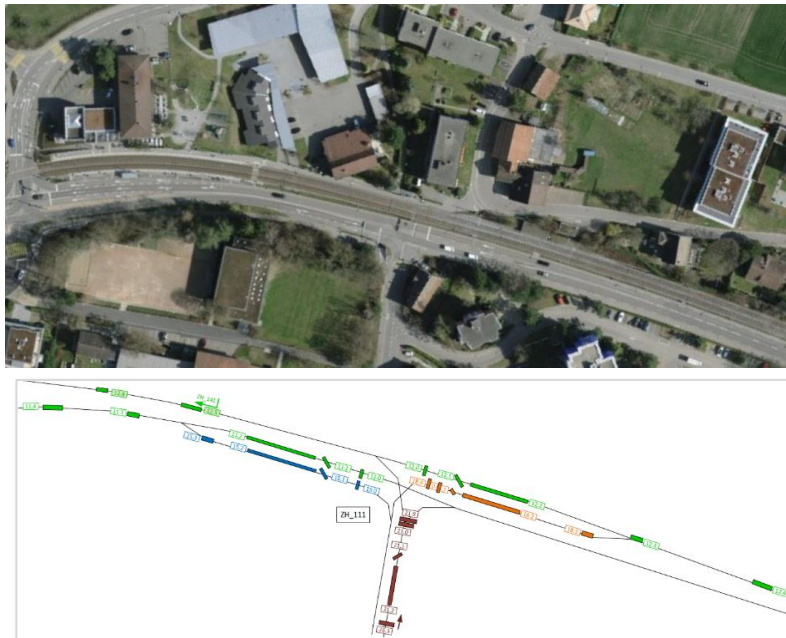


Abb. 140 Luftbild und Detektorschema für Knoten 111

¹⁶ Luftbilder von map.geo.admin.ch

II.2 Knoten Zuchwil ZUCH_10

Der Knoten ZUCH_10 liegt in Zuchwil auf der Luzernstrasse und regelt den Verkehr der Ausfahrt 33 «Solothurn Ost» der Autobahn A5.



Abb. 141 Luftbild für Knoten ZUCH_10¹⁷

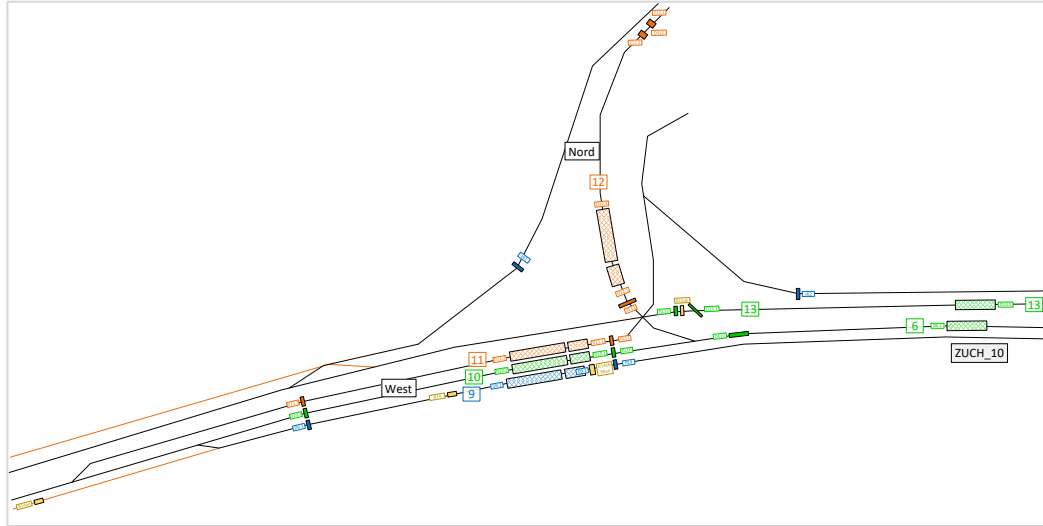


Abb. 142 Detektorschema für Knoten ZUCH_10 (westliche, linke Seite)

Kreuzweise schraffierte Detektoren sind Videodetektoren, die anderen sind Induktionsschleifen.

¹⁷ Luftbild von map.geo.admin.ch

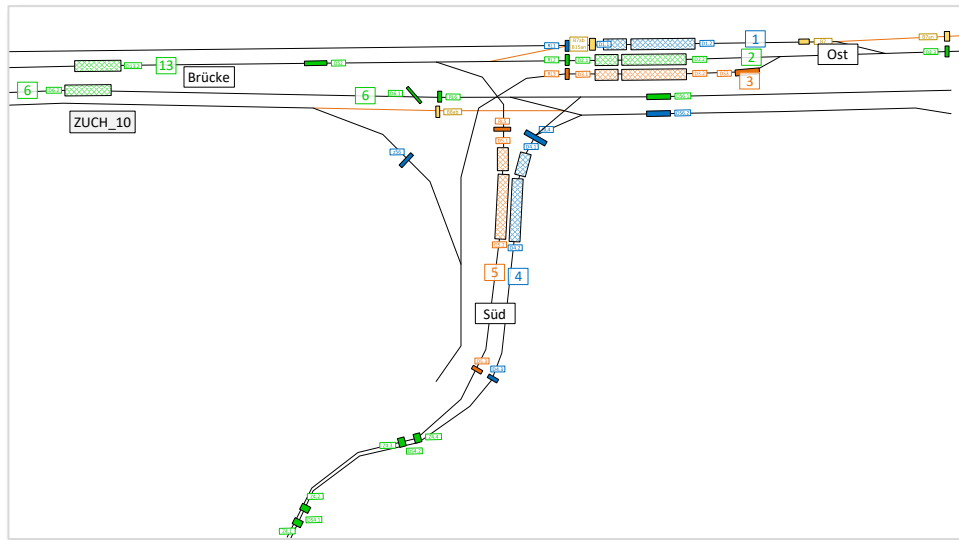


Abb. 143 Detektorschema für Knoten ZUCH_10 (östliche, rechte Seite)

II.3 Knoten Solothurn SOLO_16

Der Knoten SOLO_16 liegt in Solothurn auf der Bielstrasse, von Norden mündet die Weissensteinstrasse ein.

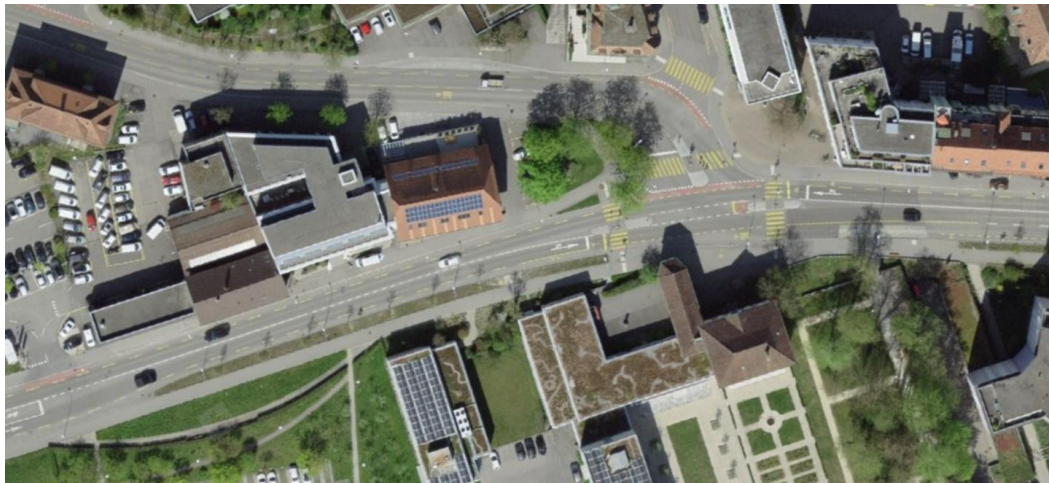


Abb. 144 Luftbild für Knoten SOLO_16¹⁸

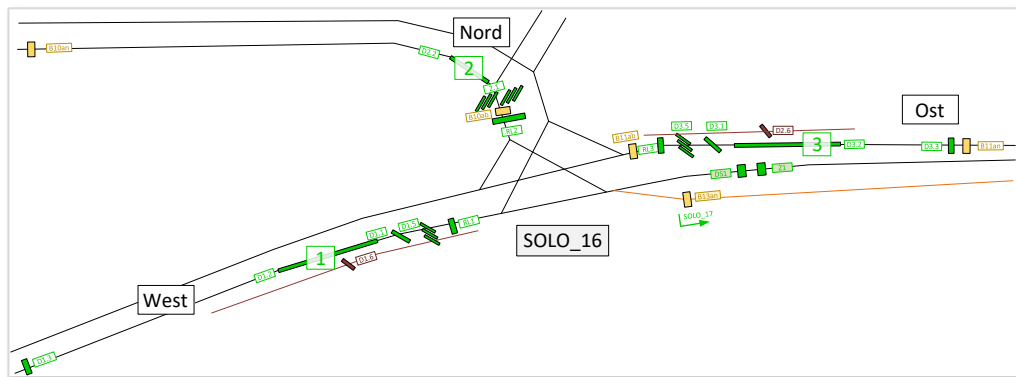


Abb. 145 Detektorschema für Knoten SOLO_16

¹⁸ Luftbild von map.geo.admin.ch

III Panoptikum der Phänomene an der Haltelinie

In diesem Kapitel des Anhangs werden die Phänomene für Detektoren kurz vor und kurz nach der Haltelinie beschrieben. Manchmal folgen auch zwei Detektoren nach der Haltelinie. Phänomene in den Zufahrten, d.h. auf allen anderen Detektoren, werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben, dem Anhang [IV](#).

III.1 Gegenverkehr

Manche Fahrzeuge nehmen es mit der Spurhaltung nicht so genau. Und so geschieht es, dass sie einen Detektor auslösen, der für den Gegenverkehr gedacht ist. In seltenen Fällen kann auch ein überbreites Fahrzeug zu einer solchen Detektion führen.

III.1.1 Einzeldetektion

Ein Detektor, meist vor oder nach der Haltelinie, spricht an, ohne dass ein Fahrzeug auf den vorhergehenden Detektoren erkannt worden ist.

Erkennungskriterien:

- Einzelner, aus dem Kontext gelöster Impuls
- Zugehörige Signalgruppe ist rot, wenn feindlich zum Gegenverkehr

Verwechslungsgefahr:

- Zweirad ([Velo](#), [Motorrad](#)), das bei Rot an die Haltelinie fährt und nicht genau auf dem Detektor anhält (oder bei Rot die Kreuzung quert)
- [Parallelverkehr](#)

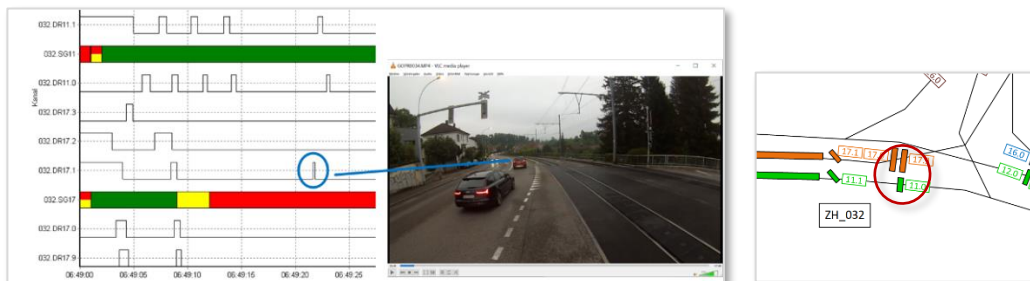


Abb. 146 Einfachdetektion von Gegenverkehr am Knoten [032](#)

In der nächsten Abbildung ist die Detektion von Gegenverkehr beim wegen Überholens eines Velofahrers im Abbiegen gezeigt. Dadurch gerät das Auto auf die Geradeausspur des Verkehrs in Gegenrichtung.

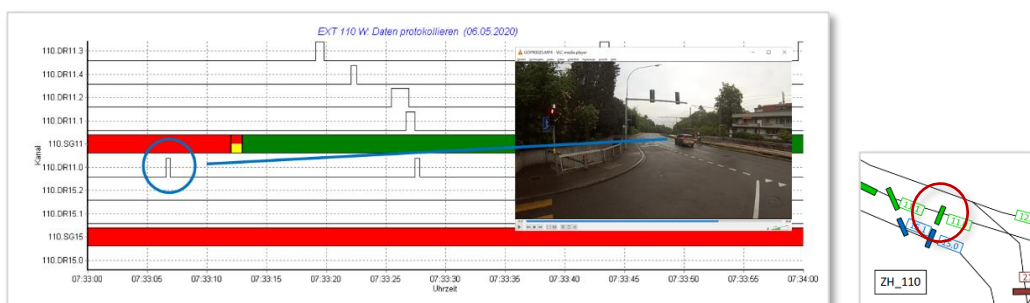


Abb. 147 Einfachdetektion von Gegenverkehr durch Abbiegen am Knoten [110](#)

III.1.2 Mehrfachdetektion

Zwei aufeinander folgende Detektoren werden in umgekehrter Richtung überfahren. Meist sind es die Detektoren kurz vor und kurz nach der Haltelinie.

Erkennungskriterien:

- Zwei Impulse, welcher einer Fahrt in umgekehrter Richtung entsprechen
- Zugehörige Signalgruppe ist rot, wenn feindlich zum Gegenverkehr

Verwechslungsgefahr:

- Keine

Das Phänomen ist eher selten.

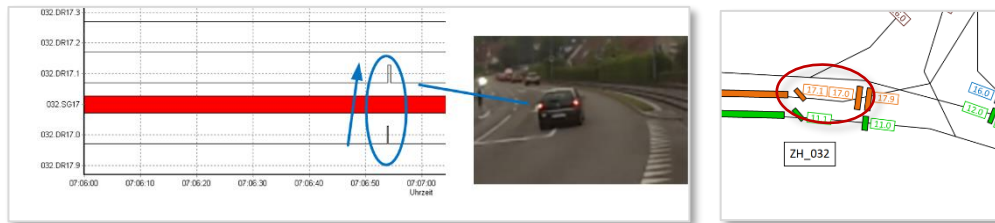


Abb. 148 Mehrfachdetektion von Gegenverkehr am Knoten [032](#)

Auch hier gibt es den analogen Fall am Knoten [110](#), wo der Linksabbieger, der gleichzeitig ein Velo überholt, noch etwas mehr Abstand lässt.

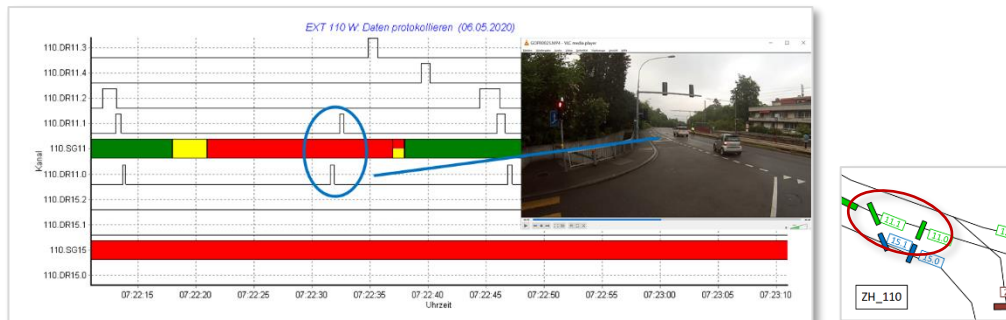


Abb. 149 Mehrfachdetektion von Gegenverkehr durch Abbiegen am Knoten [110](#)

III.2 Parallelverkehr

Manche Fahrzeuge sind so breit, dass sie vom Detektor der Nebenspur auch erkannt werden. Oder andere Fahrzeuge nehmen es mit der Spurhaltung nicht so genau. Wir nennen das auch manchmal «Übersprechen», obwohl es im elektromagnetischen Sinn nur dann ein Übersprechen ist, wenn z.B. durch ein schlecht entstörtes Fahrzeug Wellen ausgesendet werden, welchen einen Detektor ansprechen lassen.

Erkennungskriterien:

- Ein Detektor spricht an, ohne dass ein Fahrzeug auf den vorhergehenden Detektoren erkannt worden ist. Dabei kann es zu einem kurzen Prellen kommen.
- Der Impuls (oder Prell-Impuls) liegt innerhalb des Impulses des eigentlich detektierende Detektors, wenn die Detektoren auf gleicher Höhe liegen,
- oder es kann ein konstanter Offset festgestellt werden, wenn die Detektoren nicht auf der gleichen Höhe liegen

Verwechselbar mit:

- [Gegenverkehr](#), wenn es sich um die innerste Spur handelt
- Überfahrt eines Zweirads ([Velo](#), [Motorrad](#))

III.2.1 Breites Fahrzeug

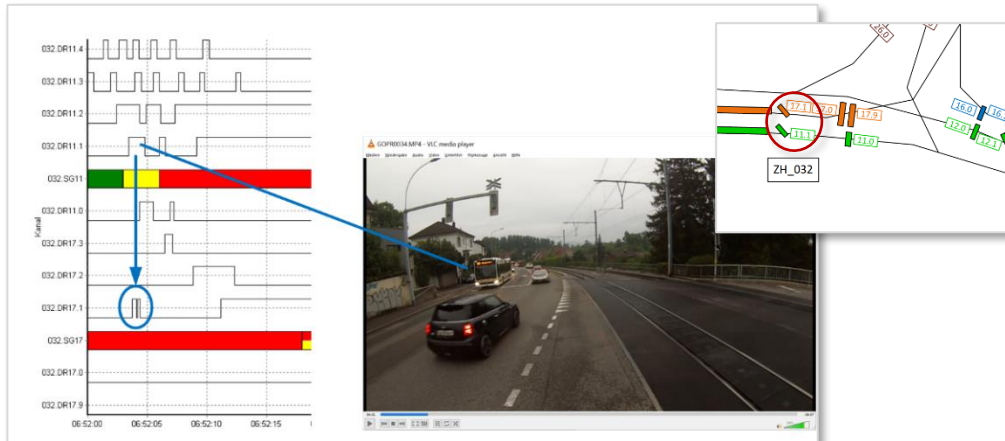


Abb. 150 Übersprechen eines Busses auf die Nebenfahrbahn am Knoten [032](#)

Der Bus fährt bei Grün auf der Geradeausspur und löst Detektor 11.1 aus. Dabei induziert er 2 Impulse auf Detektor 17.1, die Linksabbiegerspur. Diese Impulse sind kürzer, da die Detektion nur «schlecht» ist.

Im nächsten Beispiel löst ein Lastwagen einen Impuls auf der Nebenspur aus, hier am Ende seiner Überfahrt.

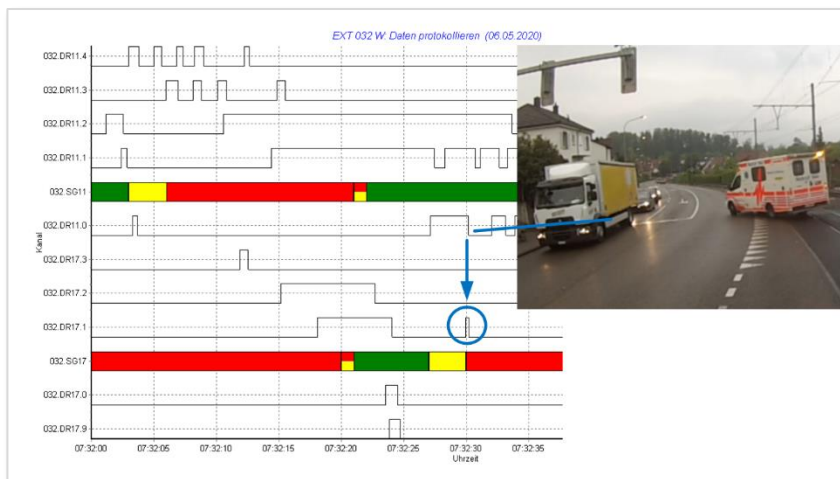


Abb. 151 Übersprechen am Ende auf die Nebenfahrbahn am Knoten [032](#)

III.2.2 Ausholen beim Abbiegen

Holt ein Auto beim Abbiegen bereits auf der Haltelinie aus – die Nebenspur darf natürlich nicht belegt sein – so spricht der Haltelinien-detektor der Nebenspur ebenso an.

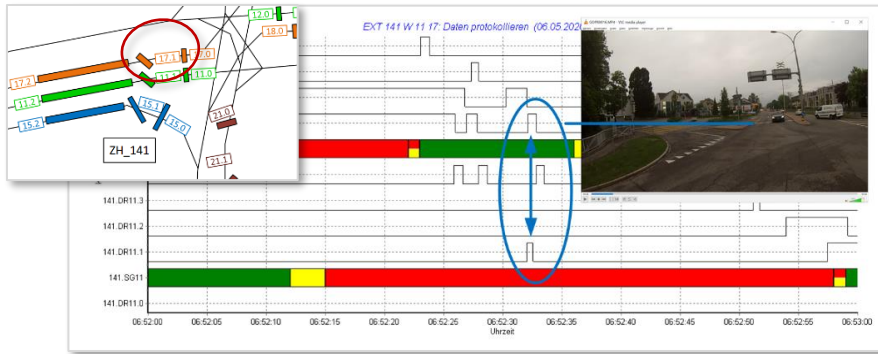


Abb. 152 Ausholen eines Autos beim Abbiegen von Spur 141.17

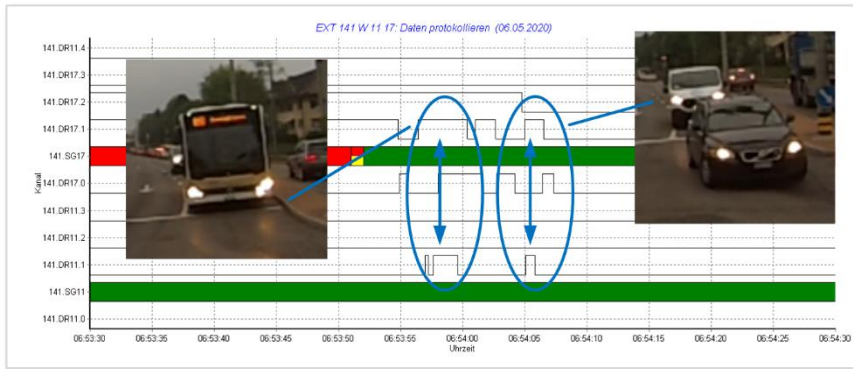


Abb. 153 Ausholen von Bus und Lieferwagen beim Abbiegen von Spur 141.17

III.2.3 Schlecht entstörtes Fahrzeug (Auto)

Auf demselben Detektor hält ein schlecht entstörtes Auto bei Rot an. Beim Anhalten wird ein Impuls auf dem Detektor für die Linksabbiegerspur ausgelöst, der aber nach kurzer Zeit wieder gelöscht wird.

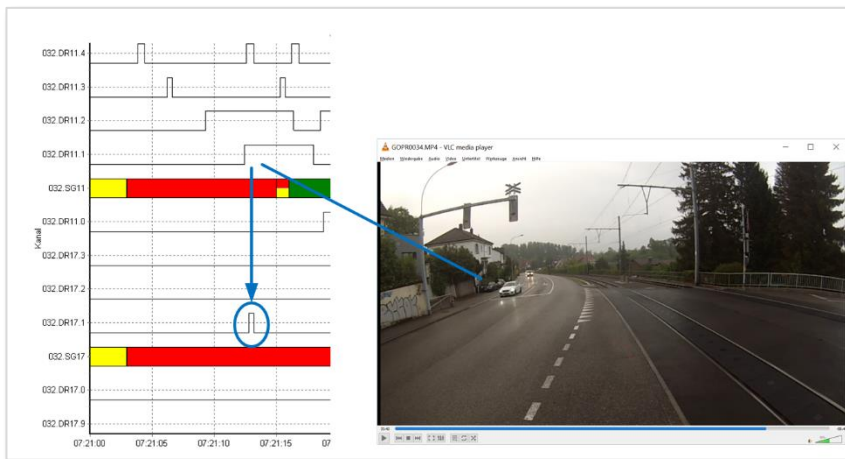


Abb. 154 Überschneiden eines Autos auf die Nebenfahrbahn am Knoten 032

III.3 Velo

Ein Velo kann von einem [Motorrad](#) nicht zuverlässig unterschieden werden. Trotzdem behandeln wir hier Velos und Motorräder einzeln gemäss den beobachteten Situationen.

III.3.1 Impuls

Velos werden häufig nur selektiv detektiert. Die übliche Abfolge der Detektoren kann nicht erkannt werden. Es ist wichtig, dass Velos spätestens an der Haltelinie erkannt werden, damit die Grün bekommen werden. Dort führt die Anwesenheit eines Velos häufig nicht zu einer längeren Belegung des Detektors, sondern zu einem raschen Abfall des Impulses.

Erkennungskriterien:

- Ein Detektor, meist vor der Haltelinie, spricht an, ohne dass ein Fahrzeug auf dem vorhergehenden Detektor erkannt worden ist.
- Es ist selten, dass ein Detektor nach der Haltelinie anspricht, denn seine Empfindlichkeit ist nicht auf Velos eingestellt. Die Wahrscheinlichkeit, dass Motorräder auf anderen Detektoren erkannt werden, ist höher, siehe [Abb. 169](#).
- Bei Grün ist der Impuls kürzer als derjenige eines Autos.

Verwechslungsgefahr:

- [Gegenverkehr](#), wenn es sich um die innerste Spur handelt
- [Parallelverkehr](#)

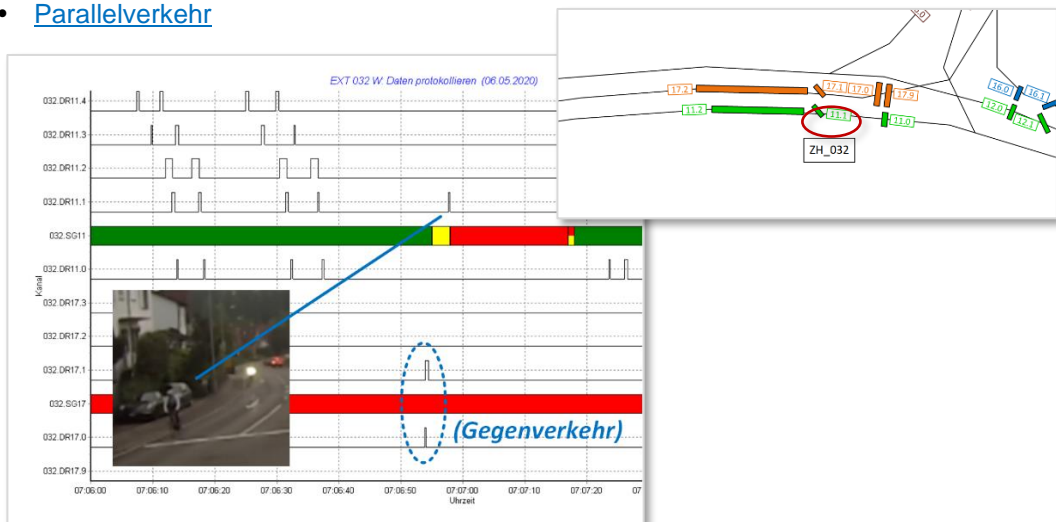


Abb. 155 Detektion eines Velos auf der Spur [032.11](#)

Im gezeigten Beispiel fährt das Velo bei Rot noch über die Kreuzung. Die gestrichelt umrandeten Impulse stammen von Gegenverkehr, siehe [Abb. 148](#).

In nächsten Beispiel wird ebenfalls ein Velo detektiert, das vorher nicht von den Detektoren erfasst worden ist. Seine Ankunft fällt mit nah vorbeifahrendem Gegenverkehr zusammen, was den Detektor zum Schwingen bringt. Die Schwingung wird anschliessend gelöscht. Es ist nicht klar, ob das Velo sonst weiterhin detektiert würde. Glücklicherweise kommt dann ein Auto angefahren, welches den Detektor 17.2 belegt. Dadurch wird auch Detektor 17.1 erneut ausgelöst, was aber wiederum nur zu einem Impuls führt.



Abb. 156 Detektion eines Velos auf der Spur [032.17](#)

III.3.2 Belegung

Es können auch Fälle beobachtet werden, wo ein Velo an der Haltelinie eine Dauerbelegung auslöst. Das Velo kommt «unerkant» durch die Detektoren in der Zufahrt bis zur Haltelinie. Dort löst es eine Dauerbelegung aus.



Abb. 157 Detektion von Velo und Auto auf Spur [032.17](#)

In der Zwischenzeit gesellt sich ein Auto neben das Velo. Bei Grün hört die Dauerbelegung auf, und das Velo löst noch einmal einen kurzen Impuls aus. Dann fährt es «unerkant» über die Detektoren hinter der Haltelinie davon.

Erkennungskriterien:

- Lange Belegungszeit eines Haltelinien-detektors, ohne dass vorher anderer Detektoren angesprochen haben
- Wenn dann noch der Verlängerungs-detektor nach eher langer Zeit dazukommt, steigt die Wahrscheinlichkeit

Verwechslungsgefahr:

- Keine

III.3.3 Velostreifen

Zufahrt 1 (West) des Knotens [SOLO 16](#) verfügt über einen Velostreifen und einen eigenen Detektor, Lageplan siehe [Abb. 145](#):

D1.6 liegt neben dem Verlängerungsdetektor D1.2.

- Spricht nur D1.6 an, aber nicht D1.2, so kann man sicher sein, dass ein Velo ihn überfahren hat.
- Spricht D1.2 an, so kann D1.6 häufig einzelne Fahrzeuge auf D1.2 erkennen, da D1.2 als Verlängerungsdetektor bei sich stauendem Verkehr keine einzelnen Fahrzeuge mehr erkennen kann.
- D1.6 kann jedoch auch eine Dauerbelegung aufweisen, wenn D1.2 eine Dauerbelegung aufweist.

Fazit:

- D1.6 kann zum Anmelden verwendet werden, jedoch nicht zum Zählen.
- D1.2 kann sowieso nicht zum Zählen verwendet werden, sondern nur zum Verlängern.

D1.5 liegt zwischen der Haltelinie für Motorfahrzeuge und derjenigen für Velos.

- Bei stehendem Verkehr vor einem Rotlicht erkennt er wartende Velos oder Motorfahrzeuge, welche zu weit vorn angehalten haben.
- Bei rollendem Verkehr erkennt er Velos und Motorfahrzeuge gleichermaßen, es sei denn, ein Motorfahrzeug überfährt den Detektor gleichzeitig mit einem Velo.

Bei wenig Verkehr können Motorfahrzeuge und Velos gut verfolgt werden. In der folgenden Abbildung sieht man gut, wie das Velo vom Motorfahrzeug überholt wird.



Abb. 158 Velo und schnelleres Motorfahrzeug in Zufahrt [SOLO_16 1](#) bei wenig Verkehr

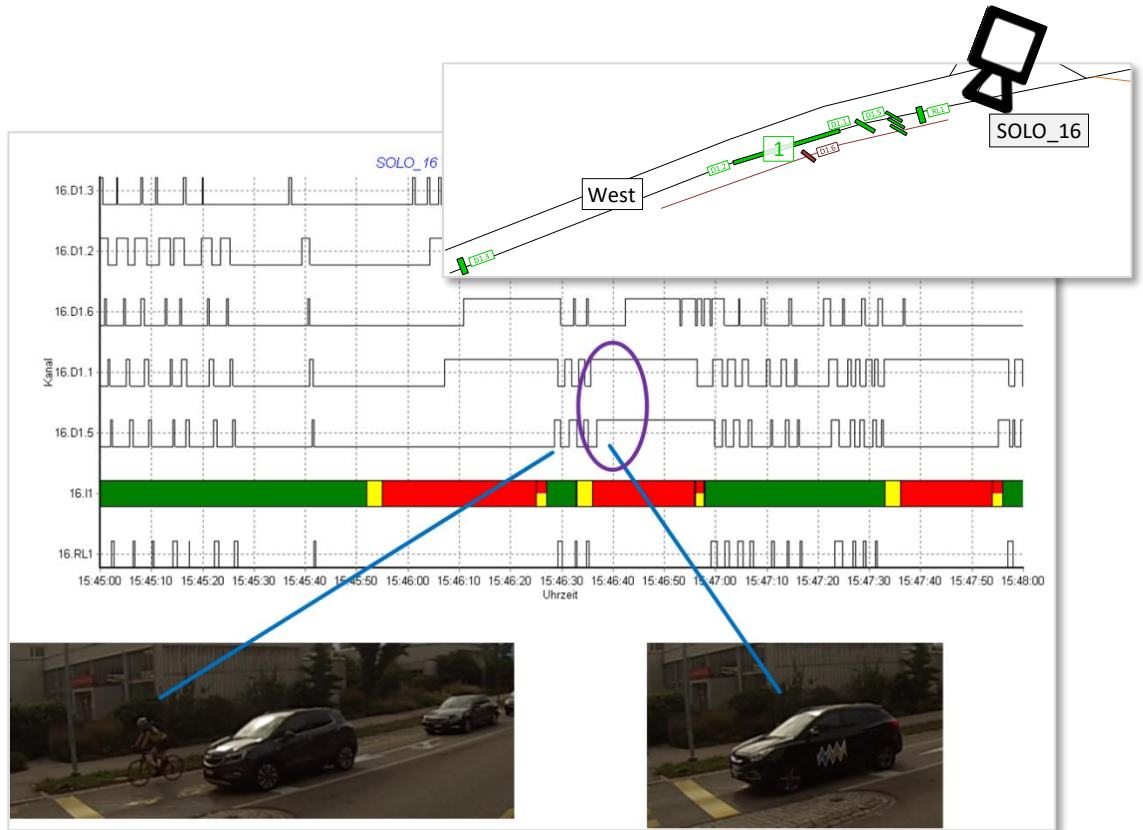


Abb. 159 Velo und Autos in Zufahrt [SOLO 16 1](#) (1)

In [Abb. 159](#) wird das Velo auf der linken Photographie nicht erkannt, weder auf D1.6 bei Dauerbelegung von D1.2 noch auf D1.5 bei gleichzeitiger Überfahrt eines Motorfahrzeugs.

Das erste Fahrzeug bei Rot wird vom Rotlicht überrascht und steht nun zu weit vorn, so dass der eigentlich für Velos gedachte Detektor D1.5 belegt wird.

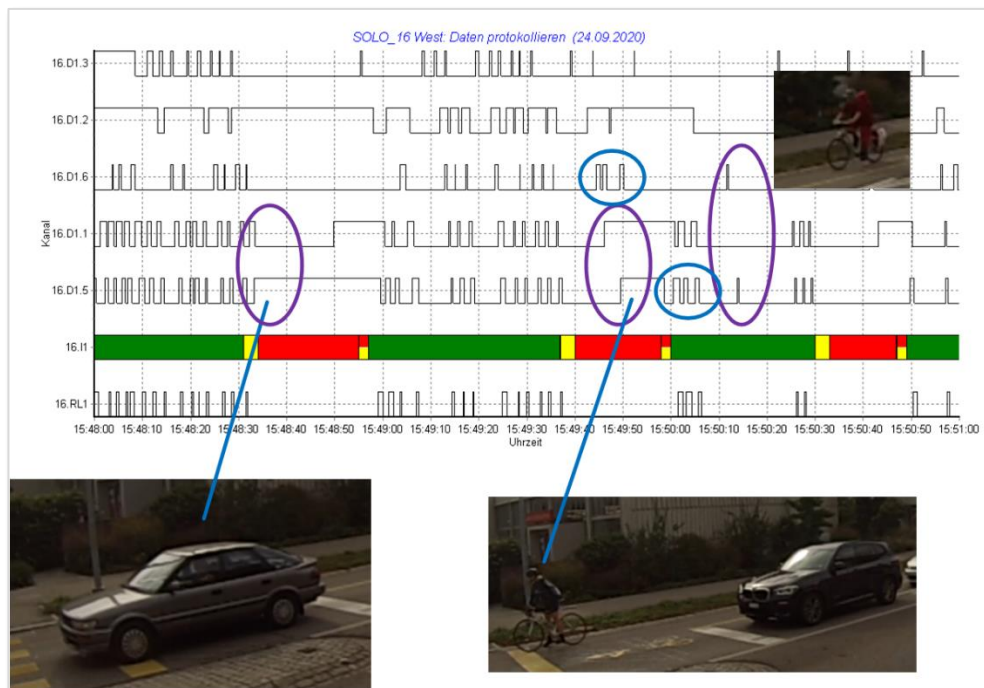


Abb. 160 Velo und Autos in Zufahrt 1 (2)

Das linke Fahrzeug ist noch Überraschter vom Rot und stellt sich noch weiter nach vorne. Auf der rechten Photographie sehen wir ein Velo auf seiner vorgezogenen Haltelinie, welches nach dem Motorfahrzeug angekommen ist. Ihm folgt später bei Grün ein zweites Velo,

das korrekt auf den Detektoren D1.6 und D1.5 erkannt wird und auf keinem der anderen Detektoren.

Der Anmeldedetektor D1.3, die Detektoren am der Haltelinie D1.1 und D1.5 sowie der Rotlichtdetektor RL1 können alle zum Verfolgen der Fahrzeuge verwendet werden, wie man in der nächsten Abbildung erkennen kann. Wir werfen als erstes einen Blick auf die abgebildete Kolonne:

- Das erste Auto hält zu weit vorn an. Aus diesem Grund verlässt es den Verlängerungsdetektor D1.2 beim Anhalten.
- Es wird beim Vorbeifahren vom Velodetektor D1.6 erkannt.
- Naturgemäss bleibt es auf dem Velodetektor D1.5 vor der Haltelinie stehen.
- Das zweite Auto bleibt auf dem Verlängerungsdetektor D1.2 stehen und wird beim Bremsen vom Velodetektor D1.6 erkannt.
- Bei Grün werden alle folgenden Autos ebenfalls vom Velodetektor D1.6 erkannt, während der Verlängerungsdetektor D1.2 auf Dauerbelegung bleibt.

III.3.4 Überholte Velos

Velos fahren am rechten Strassenrand und werden von Fahrzeugen überholt. Velos können deshalb nur zuverlässig mit dem Detektor vor der Haltelinie erkannt werden, je nach Detektor nur mit einem kurzen Impuls oder bei Halt auch mit einer Dauerbelegung. Ob es sich um ein Velo oder um ein Motorrad gehandelt hat, ist anhand des gemessenen Signals nicht zu eruieren.

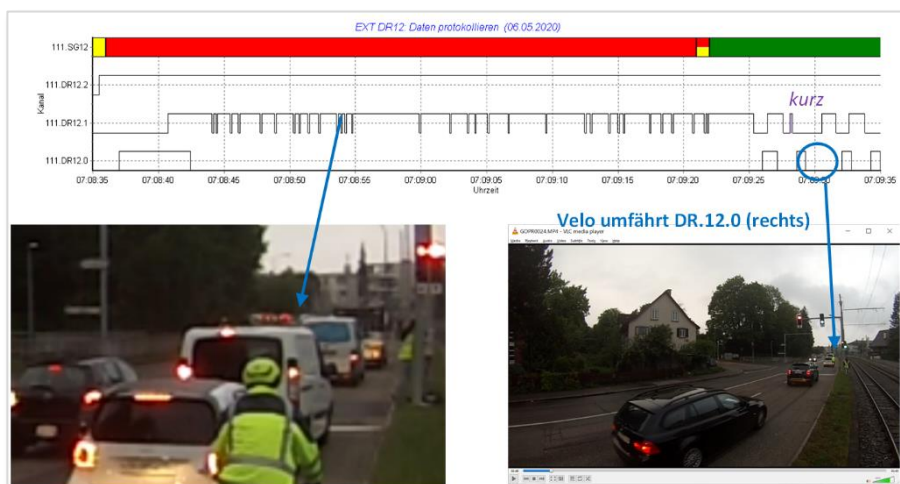


Abb. 161 Velo wird auf Spur 111.12 nach der Haltelinie überholt

Auf Detektor 12.1 wird eine Dauerbelegung gemessen, welche immer wieder kurzzeitig unterbrochen wird. Dieses Phänomen wird in Abschnitt [III.6.5](#) beschrieben.

Überholte Velos können sich auch dadurch äussern, dass das überholende Fahrzeug den Haltelinien-detektor der Nebenspur überfährt. Dieser Fall lässt sich nicht von einem überholenden Motorrad unterscheiden, es sei denn, man kann das überholte Velo oder das angenommene überholende Motorrad später wieder finden.



Abb. 162 Überholendes Fahrzeug fährt zu weit links auf Spur 111.12

Ein Auto, welches nach der Haltelinie zu weit links fährt – beispielsweise um ein Velo zu überholen, wird dort nicht erkannt, wie wenn es sich um ein Motorrad handeln würde. Zur Entscheidung, ob es sich um ein Auto oder um ein Motorrad handelt, muss die Erkennung des Fahrzeugs auf den umliegenden Detektoren beigezogen werden.

Erkennungskriterien:

- Längerer Einzelimpuls als beim Überholen von Motorrädern auf der links angrenzenden Spur, meist bei Rot

Verwechslungsgefahr:

- [Parallelverkehr](#)
- [Überholende Motorräder](#)

III.3.5 Velo auf Trottoir

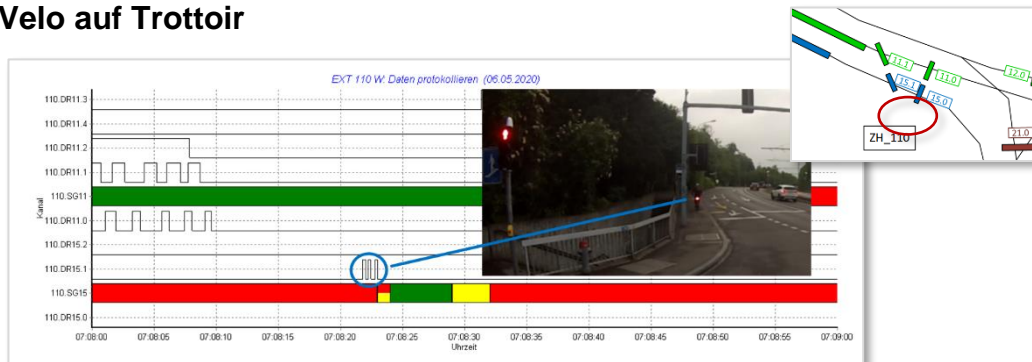


Abb. 163 Velo auf Trottoir neben Spur 032.15

Hier sieht man ein Velo, das in der Gegenrichtung auf dem Trottoir fährt. Es löst dabei Störimpulse im nebenliegenden Detektor an der Haltelinie aus, welche sogar zum Grün der zugehörigen Signalgruppe geführt haben.

Erkennungskriterien:

- Kurz aufeinander folgende Impulse, die in keinem Zusammenhang zu fahrendem Verkehr auf dieser Spur stehen
- Die zugehörige Signalgruppe ist rot.

Verwechslungsgefahr:

- [Velo](#) an Haltelinie
- Sonstige [Störungen](#)

Das Phänomen kann nur selten beobachtet werden.

III.3.6 Velo auf Fussgängerstreifen

Ein Velo, welches auf einem Fussgängerstreifen die Fahrbahn quert, wird möglicherweise von einem Haltelinien-nahen Detektor erkannt, wie im nächsten Beispiel gezeigt.



Abb. 164 Velo auf Fussgängerstreifen vor Spur [141.21](#)

Erkennungskriterien:

- Einzelner, kurzer Impuls eines Detektors nach der Haltelinie eines roten Lichtsignals
- Der Detektor erkennt normalerweise keine Zweiräder

Verwechslungsgefahr:

- [Gegenverkehr](#), wenn Detektor der innersten Spur
- [Parallelverkehr](#)
- [Störungen](#)

III.3.7 Velo auf Abwegen

In der nächsten Abbildung sieht man ein Velo, welches geradeaus fahren möchte. Die Ampel ist rot. Es nimmt nun die Rechtsabbiegerspur, welche auch rot ist, dadurch aber grün wird, was das Velo aber nicht mehr sieht. Dann fährt es nach dem Verkehrsteiler wieder zurück auf die geradeausspur, die inzwischen Grün bekommen hat. Dabei kommt es zu einer gefährlichen Annäherung zum korrekt fahrenden Fahrzeug.



Abb. 165 Velo bei Rot auf Abwegen zwischen Spur [141.11](#) und 15

Erkennungskriterien:

- Fallspezifisches Timing der Detektorimpulse, kann der Gruppe «[Spontane Spurwechsel](#)» zugerechnet werden

Verwechslungsgefahr:

- Es ist schwierig, die Gesamtheit solcher Fälle vorherzusehen. Deshalb werden solche Fälle häufig nicht erkannt. Wegen ihrer geringen Häufigkeit fallen die Fälle statistisch nicht ins Gewicht.

III.4 Zweirad an falscher Haltelinie

In der nächsten Abbildung ist der Fall noch etwas komplizierter. Da kommt auch zuerst ein Velo an die Haltelinie, dann folgt ein Auto, und schliesslich stellt sich ein weiteres Velo auf die falsche Spur, die Geradeausspur neben das erste Velo. Dort wird es erkannt, und da die Ampel gleich grün wird, kann es weiterfahren. Das erste Velo fährt dazu verzögert an, nachdem die Dauerbelegung bei Grün aufgehört hatte. Es wird auf den folgenden Detektoren nicht mehr erkannt, nur noch das folgende Auto.

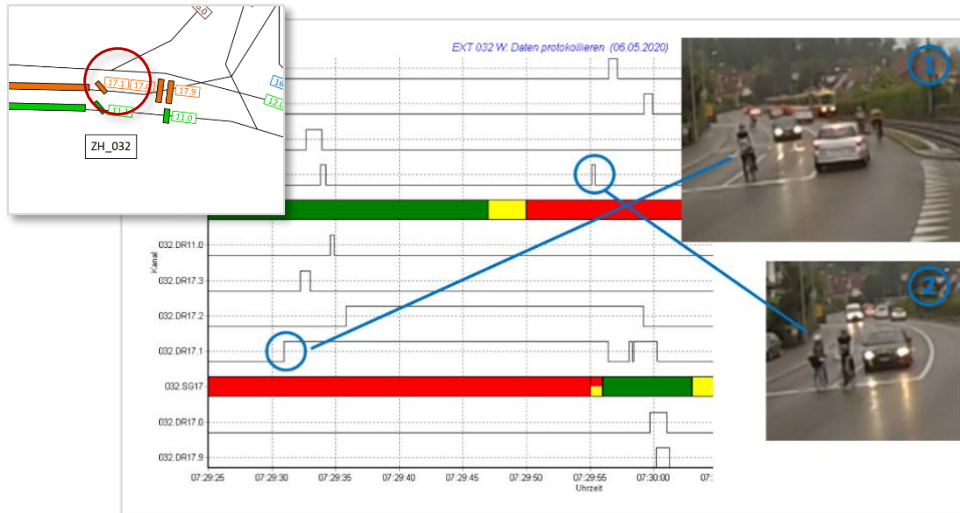


Abb. 166 Detektion von Velo, Auto und noch einem Velo für Spur [032.17](#)

In die Gegenrichtung an demselben kann Ähnliches beobachtet werden: Ein Velo fährt auf Spur 032.16 (Rechtsabbieger) vor, wird dort an der Haltelinie detektiert, fährt dann aber geradeaus über den Knotenpunkt als Spur 032.12:



Abb. 167 Velo an der falschen Haltelinie für Spur [032.12](#)

In der nächsten Abbildung sieht man ein Velo, das zu weit rechts fährt, so dass es von der Rechtsabbiegerspur detektiert wird, obwohl es geradeaus fährt.

Erkennungskriterien:

- Impuls des Detektors vor der Haltelinie bei Rot

Verwechslungsgefahr:

- [Parallelverkehr](#)
- [Velo](#) an der Haltelinie

III.5 Motorrad

Ein Motorrad kann von einem [Velo](#) nicht zuverlässig unterschieden werden. Motorräder werden normalerweise ebenfalls nur am Detektor unmittelbar vor der Haltelinie entdeckt.

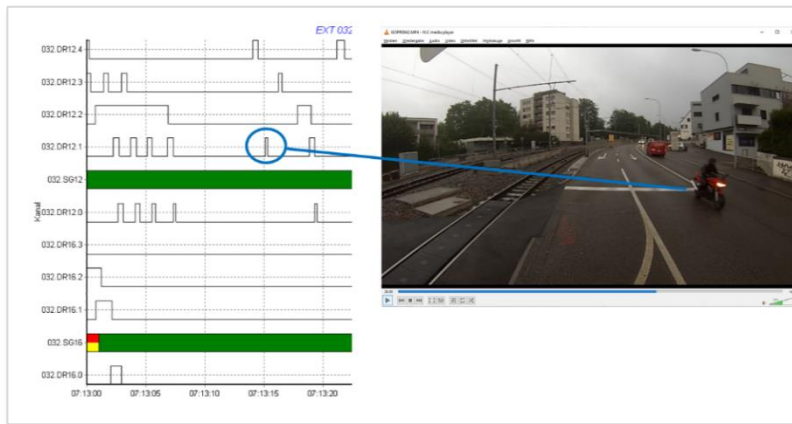


Abb. 168 Detektion eines Motorrads auf Spur [032.12](#)

Es gibt aber auch Ausnahmen. In der folgenden Abbildung wird ein Motorrad sowohl vor als auch hinter der Haltelinie vom Detektor erkannt:

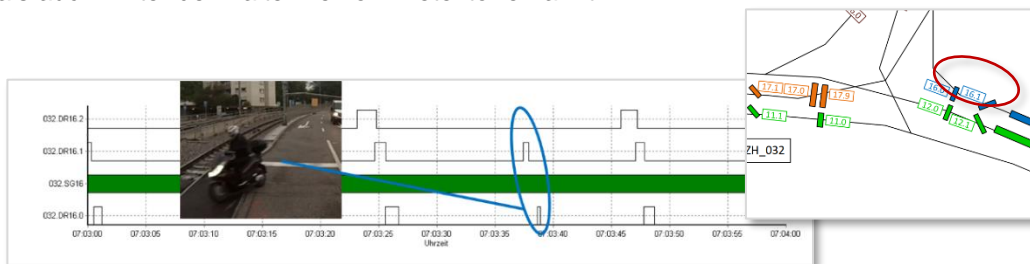


Abb. 169 Detektion eines Motorrads auf Spur [032.16](#)

Zum Vergleich: ein Velo wird nur auf dem Detektor vor der Haltelinie erkannt, nicht nach der Haltelinie:

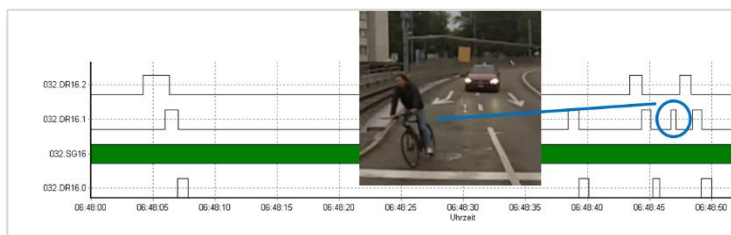


Abb. 170 Detektion eines Velos auf Spur [032.16](#)

Erkennungskriterien für Motorräder:

- Die Unterscheidung zwischen Velos und Motorrädern ist nur für fahrende Zweiräder möglich
- Impulse von Motorrädern sind tendenziell länger als diejenigen von Velos, aber immer kürzer als solche von Autos
- Die Unterscheidung ist aber nicht zuverlässig.

Verwechslungsgefahr:

- Mit [Velo](#)

III.6 Auto an der Haltelinie

Üblicherweise sind Detektoren belegt, wenn ein Fahrzeug auf ihnen steht. Das muss hier nicht besonders gezeigt werden. Bereits für Velos haben wir im Abschnitt [III.3](#) gesehen, dass der Detektor häufig nur eine Impuls auslöst – entweder wegen der Halteposition des Velos oder aus Gründen der Empfindlichkeit.

Auch bei der Belegung durch Autos können unerwartete Erscheinungen auftreten.

III.6.1 Doppeltes Ansprechen



Abb. 171 Doppeltes Ansprechen an der Haltelinie von der Spur [032.17](#)

Man erkennt, wie der Detektor 17.1 korrekt belegt wird, sobald das Auto an der Haltelinie vorgefahren ist. Dann hört die Belegung plötzlich wieder auf, bis sich das Auto bei Grün wohl wieder zu bewegen beginnt.

Erkennungskriterien:

- Mehrere Impulse bei Rot oder beim Ende von Rot an der Haltelinie (.1)
- Es kann eine längere Lücke auftreten
- Gleichzeitig ist der Verlängerungsdetektor (.2) dauerbelegt
- Die Anzahl Impulse kann auf dem Anmeldedetektor (.3) nicht nachvollzogen werden

Verwechslungsgefahr:

- Zweirad ([Velo](#), [Motorrad](#)) an der Haltelinie

III.6.2 Schwingendes Ansprechen

Das Auto wird an der Haltelinie erkannt. Der Detektor beginnt jedoch eine Weile zu schwingen.

Erkennungskriterien (ähnlich wie [Doppeltes Ansprechen](#)):

- Mehrere eher kurze Impulse mit kurzen Lücken bei Rot oder beim Ende von Rot an der Haltelinie (.1)
- Es können längere Lücken auftreten
- Gleichzeitig ist der Verlängerungsdetektor (.2) dauerbelegt
- Die Anzahl Impulse kann auf dem Anmeldedetektor (.3) oder auf dem Detektor nach der Haltelinie (.0) nicht nachvollzogen werden

Verwechslungsgefahr:

- Gering, ein Zweirad ([Velo](#), [Motorrad](#)) könnte sich darin verstecken

- Sonstige [Störungen](#)

Die nächste Abbildung zeigt gleich zwei Mal ein schwingendes Ansprechen: zuerst um 07:37:12 ein Ansprechen mit Vor-Prellen und dann um 07:37:28 eine Ambulanz, die offenbar mit ihrer vielen Elektronik den Detektor anfänglich durcheinanderbringt. Es ist interessant dass die Ambulanz nach kurzer Zeit über die Haltelinie vorrückt und dann dort recht lange stehen bleibt – die Fahrer sind sich offenbar nicht ans Warten vor Rot gewöhnt.



Abb. 172 Schwingendes Ansprechen an der Haltelinie der Spur [032.17](#)

III.6.3 Schwingendes Ansprechen einer Belegung mit Löschen

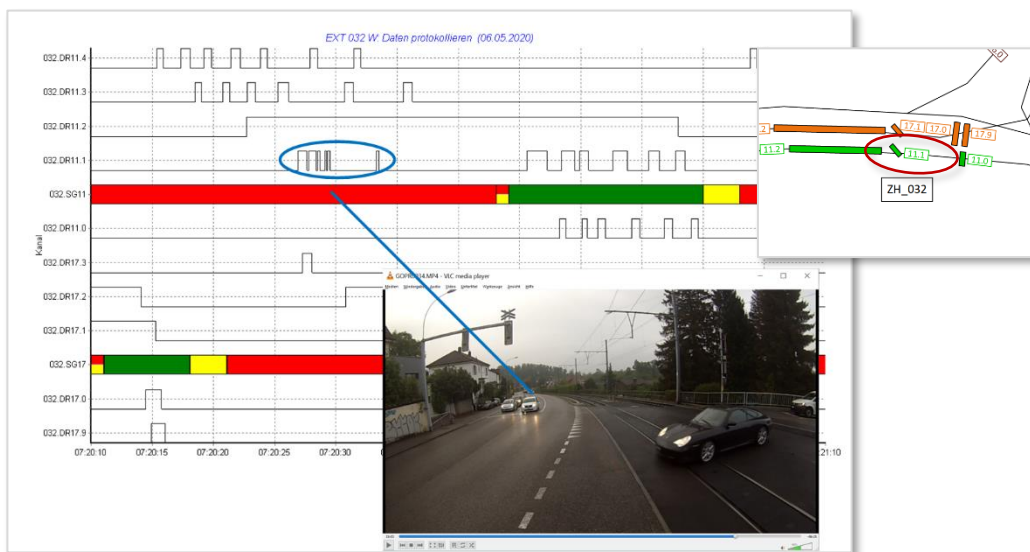


Abb. 173 Schwingendes Ansprechen mit Löschen an der Haltelinie der Spur [032.11](#)

Der Detektor beginnt zu schwingen und löscht die Belegung nach einer Weile fälschlicherweise, hier mit einem kurzen Nachzügler-Impuls. Trotz des Löschens muss das Auto angemeldet bleiben, da es sonst keine Grünphase bekommt.

III.6.4 Schwingender Impuls an der Haltelinie

Auch während einer Überfahrt kann ein Detektor schwingen, nicht nur bei einer folgenden Belegung. Das sieht man in der nächsten Abbildung.

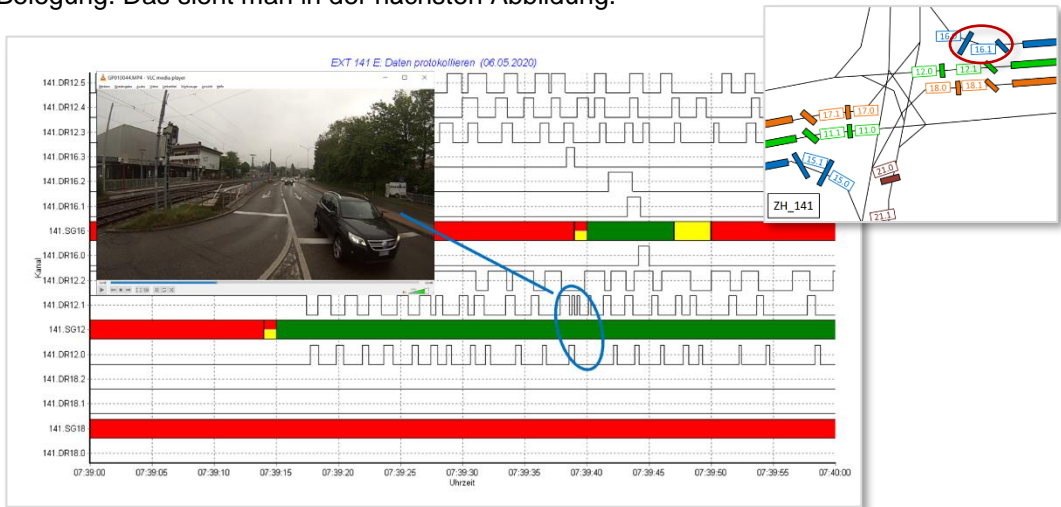


Abb. 174 Schwingender Impuls auf Spur 141.12

Erkennungskriterien:

- Mehrere kurze Impulse mit kurzen Lücken an der Haltelinie (.1)
- Die Anzahl Impulse kann auf dem Anmeldedetektor (.3) oder auf dem Detektor nach der Haltelinie (.0) nicht nachvollzogen werden

Verwechslungsgefahr:

- keine

III.6.5 Schwingender Verlängerungsdetektor

Auch Schwingen bei Dauerbelegung kann auftreten, in der nächsten Abbildung von Detektor Z4.3 am Knoten ZUCH 10. Das wirkt sich natürlich auch auf Detektor DS4.2 aus. Z4.3 und Z4.4 bilden zusammen eine Doppelschleife, deren ODER-verknüpftes Resultat auch unter DS4.2 abgefragt werden kann.

Die Tendenz zum Schwingen sieht man gut in der Verteilungsfunktion für kurze Nettozeitlücken.

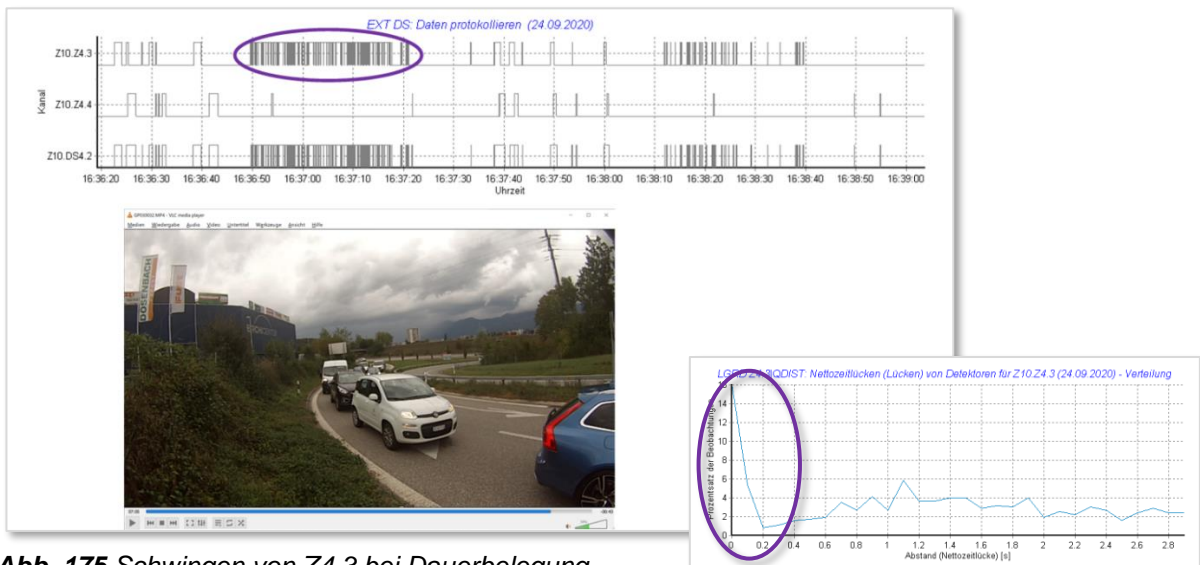


Abb. 175 Schwingen von Z4.3 bei Dauerbelegung

III.6.6 Prellender Verlängerungsdetektor

Der optische Verlängerungsdetektor D11.2 prellt häufig. Da er nicht zum Zählen verwendet wird, spielt das keine so grosse Rolle.

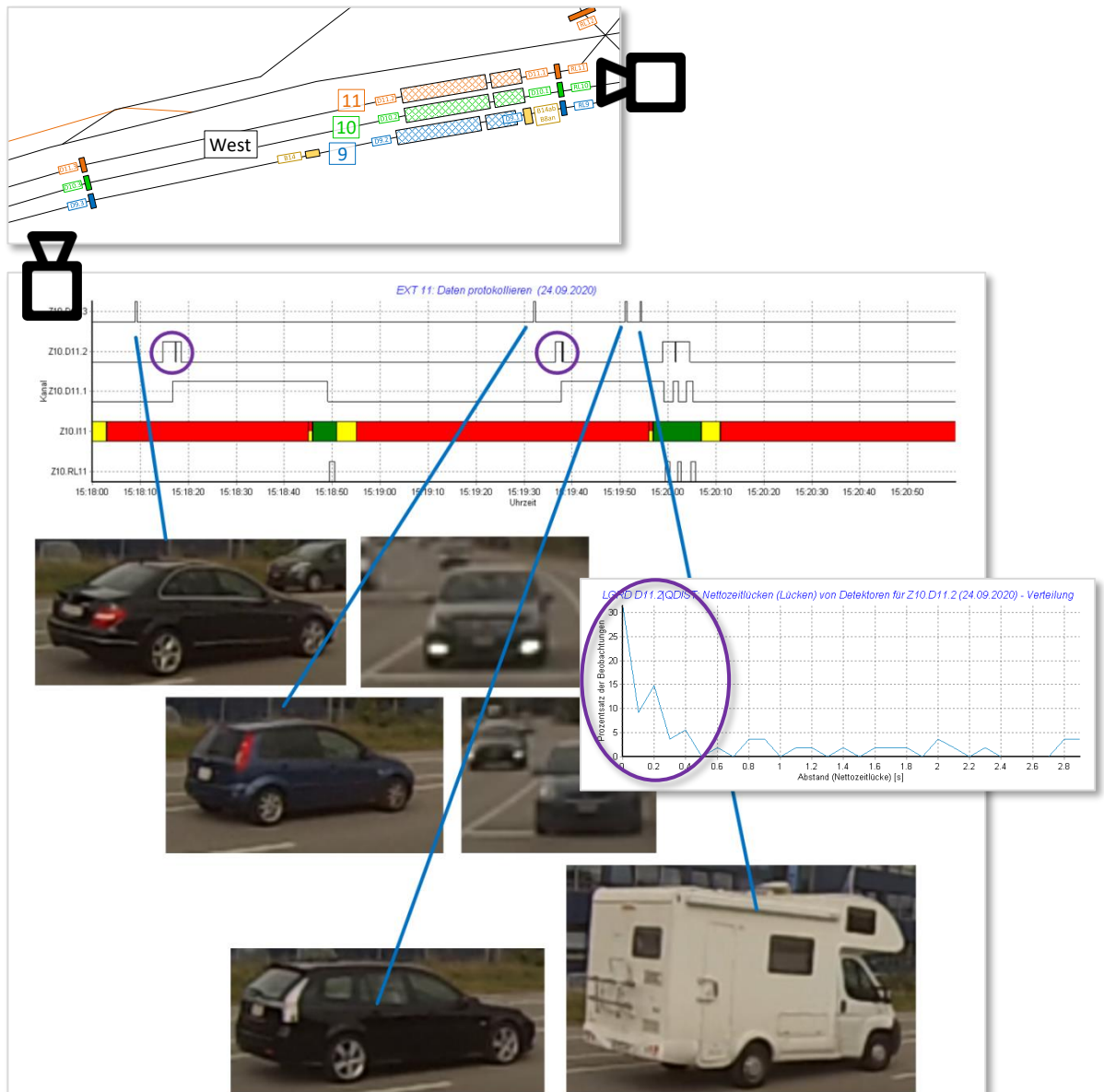


Abb. 176 Prellen des Verlängerungsdetektors D11.2 (ZUCH 10 West)

III.6.7 Belegung mit Lücken

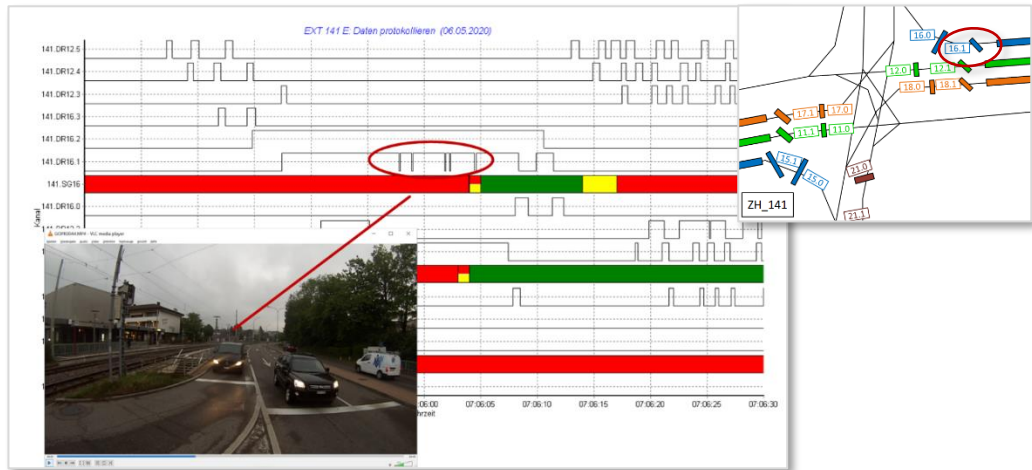


Abb. 177 Mehrere Abfälle der Spur [141.16](#)

Nicht nur beim Ansprechen einer Belegung kann Schwingen auftreten, sondern auch zwischendurch während einer Belegung, wobei die Signalabfälle nicht an Schwingen erinnern, sondern an zufällig verteilte Abfälle. Die Abfälle sind kurz.

Erkennungskriterien:

- Kurze Einbrüche in einem Belegungssignal eines kurzen Detektors

Verwechslungsgefahr:

- keine

In [Abb. 161](#) ist ein weiteres Beispiel zu sehen. Ebenso in der nächsten Abbildung:

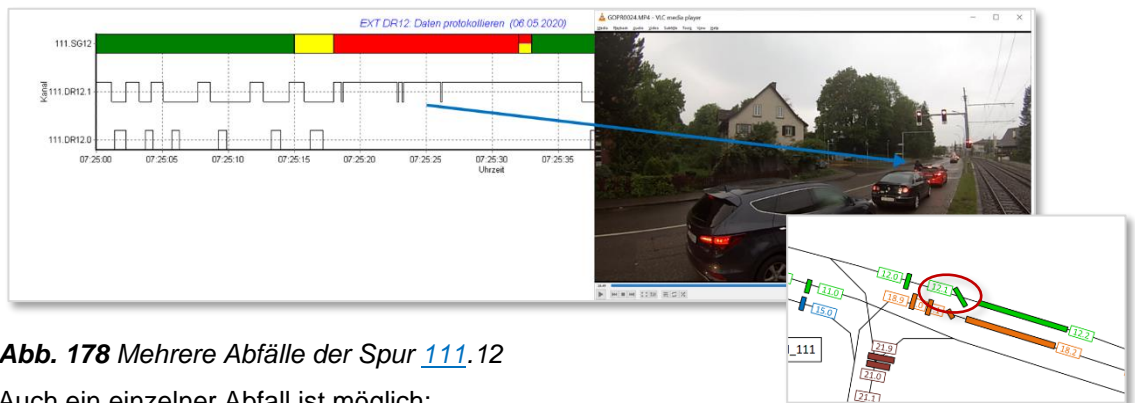


Abb. 178 Mehrere Abfälle der Spur [111.12](#)

Auch ein einzelner Abfall ist möglich:

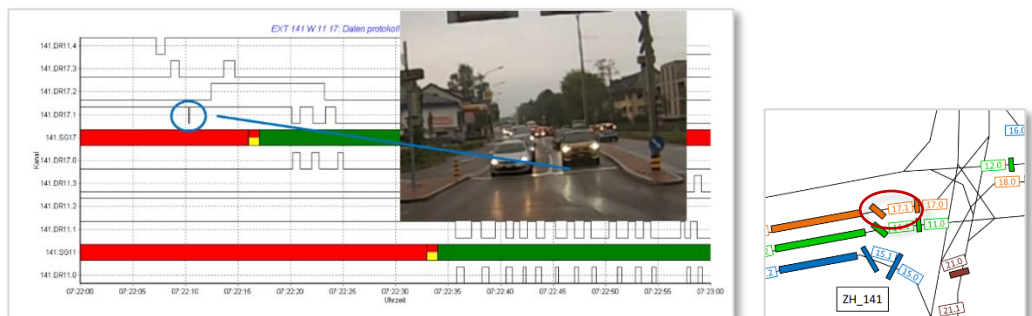


Abb. 179 Einzelner Abfall der Spur [141.17](#)

III.7 Phantom-Ansprechen

Detektoren können ohne ersichtlichen Grund einen Impuls senden oder auch mehrere kurz aufeinander folgende.

Erkennungskriterien:

- Mehrere, aus dem Kontext gelöste, kurz aufeinander folgende Impulse
- Oder auch ein einzelner, meist kurzer Impuls

Verwechslungsgefahr:

- [Velo auf Trottoir](#)
- [Gegenverkehr](#) (für Einzelimpuls)
- [Parallelverkehr](#) (für Einzelimpuls)
- Zweirad ([Velo](#), [Motorrad](#))
- [Velo auf Trottoir](#)
- Sonstige [Störungen](#)

III.7.1 Mit Schwingen und Löschen

Ab und zu spricht ein Haltelinien-Detektor an und schwingt kurz. Am Gegenverkehr kann es hier nicht liegen. Ob es an den Fahrzeugen in der Nebenspur liegt, ist nicht erkenntlich.



Abb. 180 Phantom-Ansprechen mit Löschen an der Haltelinie der Spur [032.17](#)

III.7.2 Als einzelner Impuls

Der Detektor muss nicht immer schwingen. Auch ein einzelner Impuls ist möglich.

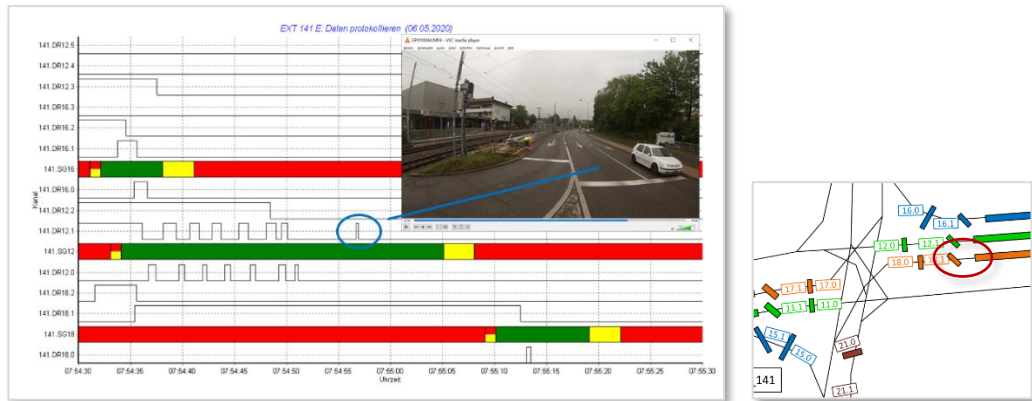


Abb. 181 Phantom-Impuls an der Haltelinie der Spur 141.12

III.7.3 Vergessenes Ansprechen

Von Zeit zu Zeit gibt es Autos, die vom Haltelinien-detektor nicht erkannt werden, obwohl er normalerweise zuverlässig anspricht, für Motorräder bis Lastwagen.

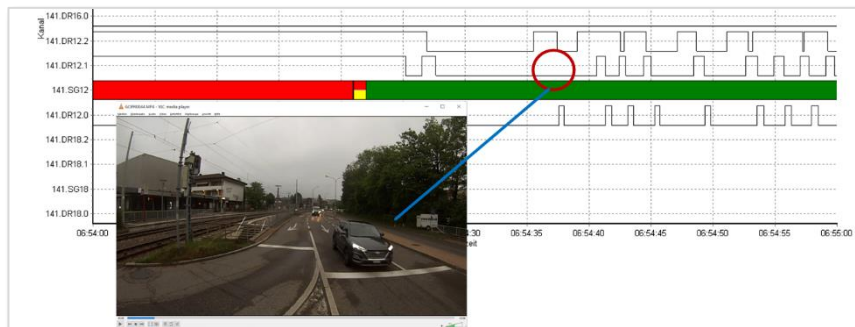


Abb. 182 Vergessenes Ansprechen der Spur 141.12

Erkennungskriterien:

- Das Fahrzeug wird auf den umliegenden Detektoren erkannt

Verwechslungsgefahr:

- keine

III.7.4 Unvollständiges Ansprechen

Hier wird das Fahrzeug nur auf einem der beiden Detektoren erkannt, meist nur auf dem ersten Detektor – wie wenn es ein Motorrad wäre. Die Höhe des Fahrzeugbodens scheint auf dem zweiten Detektor eine Rolle zu spielen.

Dieses Verhalten ist ein Indiz für die Überfahrt eines Lastwagens oder eines grossen Lieferwagens.



Abb. 183 Unvollständig erkanntes Fahrzeug auf Spur [141.17](#)

Erkennungskriterien:

- Das Fahrzeug wird auf dem ersten Detektor mit einem längeren Impuls als für Zweiräder erkannt
- Das Fahrzeug wird auf dem zweiten Detektor nicht erkannt

Verwechslungsgefahr:

- keine

III.8 Spurwechsel

Spurwechsel auf Detektoren oder zwischen Detektoren kommen immer wieder vor. Sie können systematisch vorkommen, wenn die Fahrlinie von Fahrzeugen häufig so gewählt wird, dass sie die Spur wechselt, oder spontan, wenn ein Fahrzeug in unüblicher Weise die Spur wechselt.

III.8.1 Systematische Spurwechsel

Wer auf der Spur [032.16](#) rechts abbiegen will und mit einer gewissen Geschwindigkeit daher kommt, überfährt erst den Verlängerungsdetektor für den Geradeausverkehr 12.2 und dann denjenigen für dem Rechtsabbieger 16.2. Oder er entschliesst sich noch später und überfährt erst den Haltelinien-detektor 12.1 und dann denjenigen der gewünschten Spur 16.1 – oder gar beide. Alle drei Fälle sind in der nächsten Abbildung gezeigt:

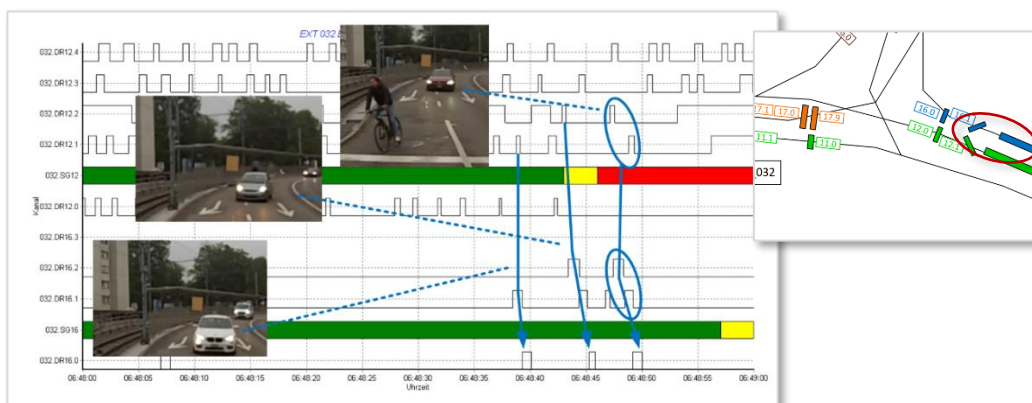


Abb. 184 Systematische Spurwechsel auf Spur [032.16](#)

Erkennungskriterien:

- Fallspezifisches Timing der Detektorimpulse

III.9 Überholende Motorräder

Erkennungskriterien:

- Kurzer Einzelimpuls (der auf eine Detektion eines Zweirads schliessen lässt) auf der links angrenzenden Spur, meist bei Rot
- Kurze Impulse (die auf eine Detektion von Zweirädern schliessen lässt) auf aufeinander folgenden Detektoren der links angrenzender Spur, meist bei Rot
- Die Impulse treten auf Detektoren auf, welche sonst keine Zweiräder detektieren

Verwechslungsgefahr:

- [Parallelverkehr](#)
- Zweirad (Velo, Motorrad) an der Haltelinie

III.9.1 Überholende Motorräder nach der Haltelinie

Obwohl der Detektor [111.DR12.0](#) in der nächsten Abbildung in der Lage wäre, Motorräder zu detektieren, ist das im gezeigten Fall nicht möglich, da das Motorrad ihn überholend umfährt. Das Motorrad gibt sich durch einen kurzen Impuls auf dem Detektor vor der Haltelinie [111.DR12.1](#) zu erkennen. Solches Überholen ist also nicht systematisch erkennbar.

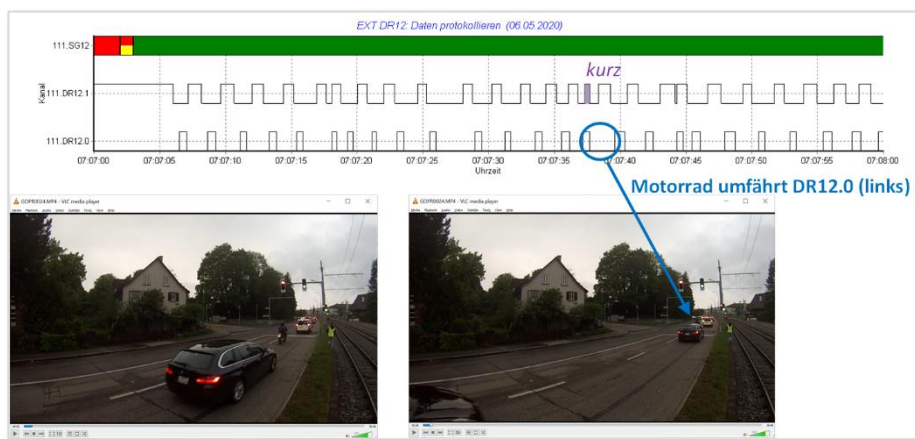


Abb. 187 Motorrad überholt auf Spur [111.12](#) nach der Haltelinie

III.9.2 Überholende Motorräder vor der Haltelinie

Überholen Motorräder vor der Haltelinie, dann können sie auf der dadurch falsch befahrenen Spur detektiert werden, vornehmlich vor der Haltelinie, denn dieser Detektor ist empfindlich genug eingestellt.

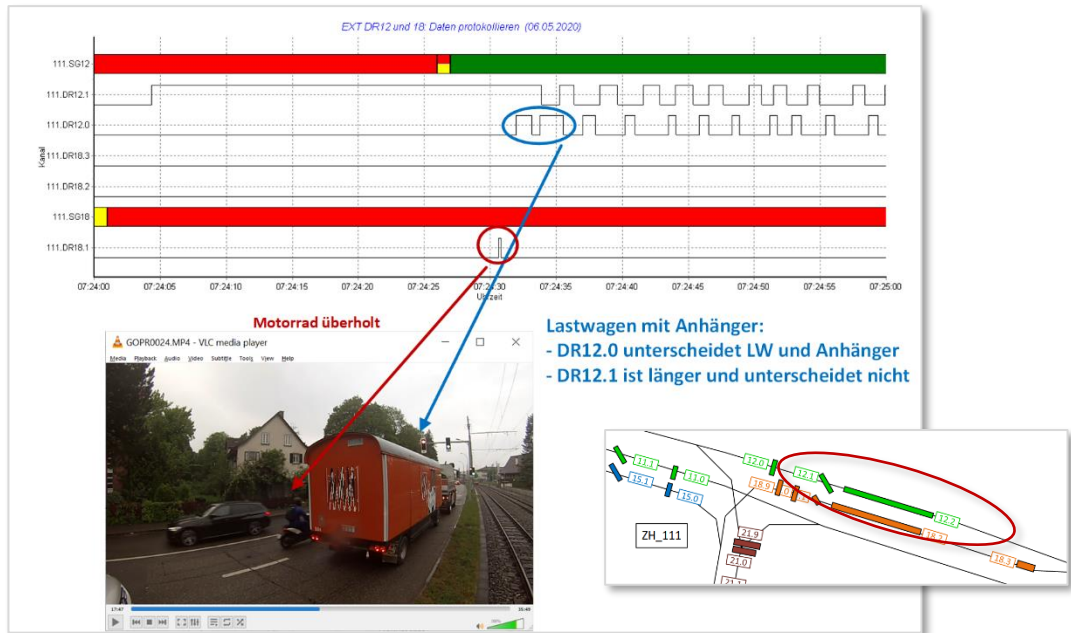


Abb. 188 Motorrad überholt auf Spur 111.12 vor der Haltelinie

Manchmal kann man die Motorräder auch länger verfolgen oder sogar feststellen, dass es sich um mehr als 1 Motorrad handelt, welches auf der Linksabbiegerspur überholt.

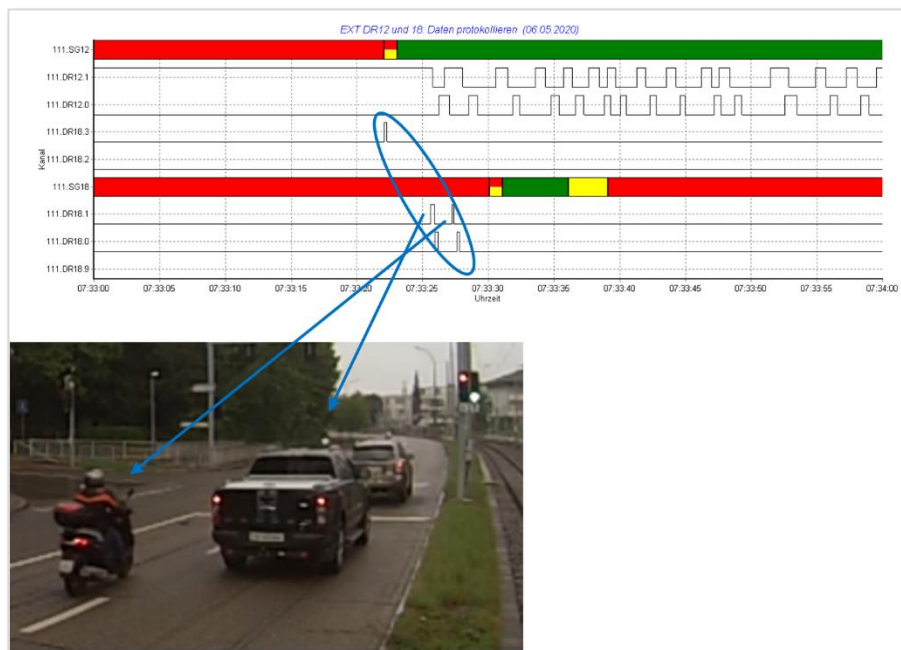


Abb. 189 Zwei Motorräder überholen auf Spur 111.12 vor der Haltelinie

Fährt ein Motorrad bei Rot auf der falschen Spur nach vorne, kann nicht erkannt werden, welche Spur es befahren will. Die Ampel wird falsch reagieren und auch der falschen Spur Grün erteilen. Erst die weitere Verfolgung des Fahrzeugs kann darüber Auskunft geben.

In der nächsten Abbildung wird ein Motorrad auf der Linksabbiegerspur 111.18 erkannt. Es stellt sich aber an die Spitze der Geradeausspur 111.12.

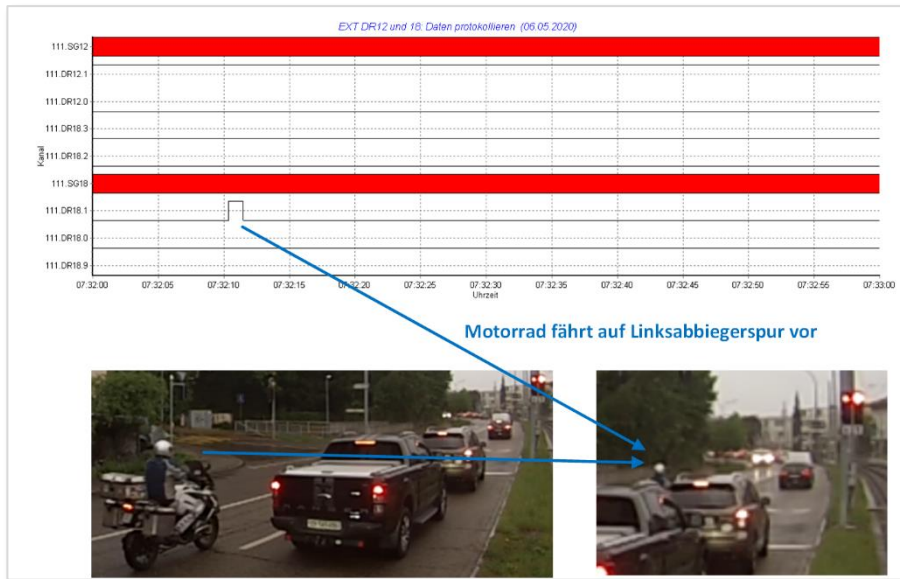


Abb. 190 Motorrad stellt sich bei Rot an die Spitze der Spur [111.12](#)

III.10 Bus auf der Rechtsabbiegerspur

In der nächsten Abbildung wird der Halt eines Busses auf der Rechtsabbiegerspur [110.15](#) gezeigt. Anschliessend zieht der Bus hinüber auf die Geradeausspur 110.11.

- Der Bus nähert sich wie ein Rechtsabbieger
- Nach der Ankunft des Busses wird zufälligerweise eine Rotlichtmissachtung eines Autos gezeigt.
- Bei Abfahrt überfährt der Bus alle Haltelinien-Detektoren der Spuren 110.11 und 110.15.

Zur Erkennung eines Busses gibt es die ÖV-Detektoren mit den zugehörigen Meldepunkten. Sie sind im Anschluss an die Abbildung gezeigt.

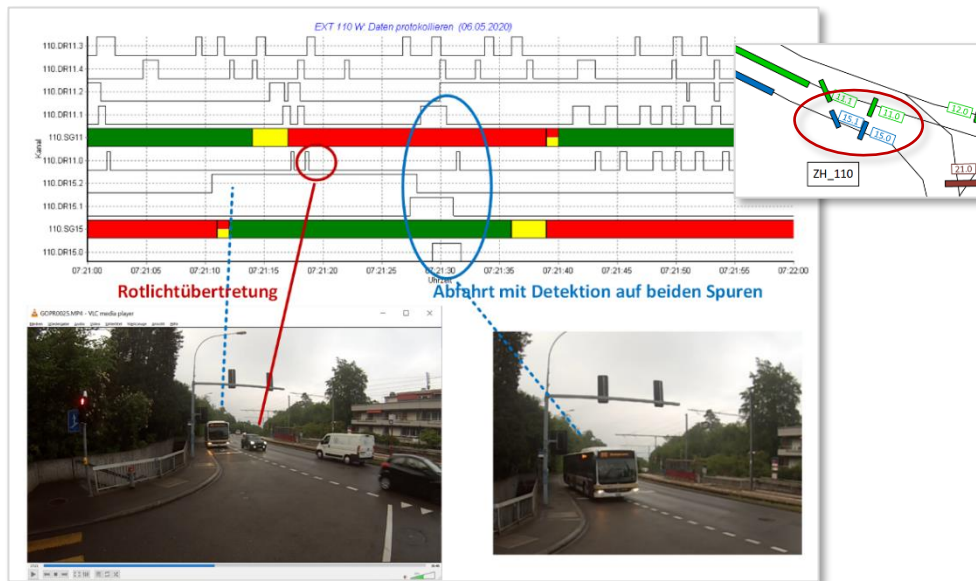


Abb. 191 Bus hält auf Spur [110.15](#)

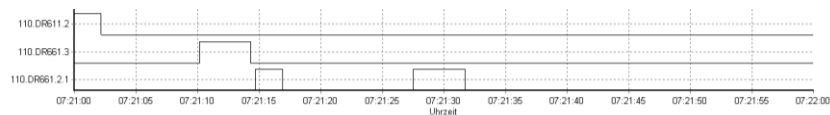


Abb. 192 Bus hält auf Spur [110.15](#) mit zugehörigen ÖV-Detektoren

Erkennungskriterien:

- Fallspezifisches Timing der Detektorimpulse und der Meldepunkte
- Somit gehört der Fall in die Gruppe der [Spurwechsel](#)

Verwechslungsgefahr:

- keine

III.11 Rotfahrer

III.11.1 Velos



Abb. 193 Rotfahrende Velos auf Spur [141.12](#)

Da die Velos nur auf dem Detektor vor der Haltelinie detektiert werden, ist es nicht möglich, nur anhand der Aufzeichnungen zu entscheiden, ob das Velo bei Rot über die Kreuzung gefahren ist oder ob es auf Grün gewartet hat. Ein solcher Entscheid ist nur möglich, wenn das anhaltende Velo auf dem Haltelinien-Detektor eine Dauerbelegung erzeugt.

Erkennungskriterien:

- Einzelner Impuls eines Haltelinien-nahen Detektors bei Rot

Verwechslungsgefahr:

- Zweirad ([Velo](#), [Motorrad](#)) an Haltelinie

III.11.2 Autos

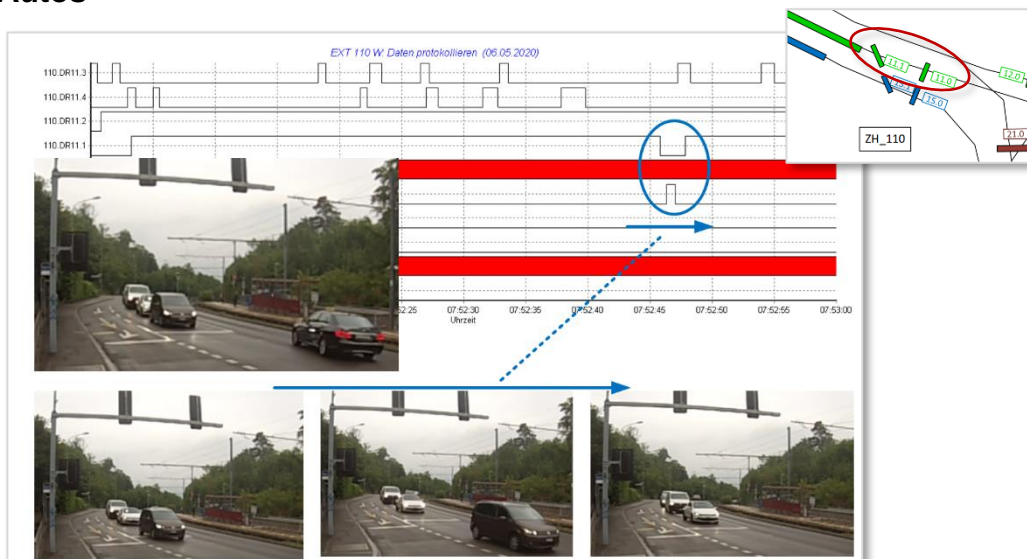


Abb. 194 Rotfahrendes Auto auf Spur [110.11](#)

Hier geht einem Autofahrer an erster Stelle vor einer roten Ampel die Geduld aus.

Erkennungskriterien:

- Wegfahren, detektiert durch Detektoren vor und nach der Haltelinie

Verwechslungsgefahr:

- keine

IV Panoptikum der Phänomene in den Zufahrten

IV.1 Motorrad

Ein Motorrad wird normalerweise vom Verlängerungsdetektor nicht erkannt. Ein Motorrad erhöht aber den Abstand zwischen den aufeinander folgenden Fahrzeugen. Und so lässt sich ein Motorrad manchmal auf einem Verlängerungsdetektor erkennen, da es ihn zum Absinken bringt, siehe die nächste Abbildung.



Abb. 195 Motorrad als Lücke auf Verlängerungsdetektor von Spur 141.12

Erkennungskriterien:

- Ein kurzer Impuls bei fahrendem Verkehr an der Haltelinie suggeriert ein Zweirad
- Meist fehlt der Impuls auf dem Detektor hinter der Haltelinie
- Der Verlängerungsdetektor ist dauerbelegt, weist aber eine kurze Lücke auf, welche vom Timing her auf ein fahrendes Fahrzeug passt

Verwechslungsgefahr:

- Keine

Das Phänomen kann nur selten beobachtet werden.

IV.2 Überholen durch eine Ambulanz

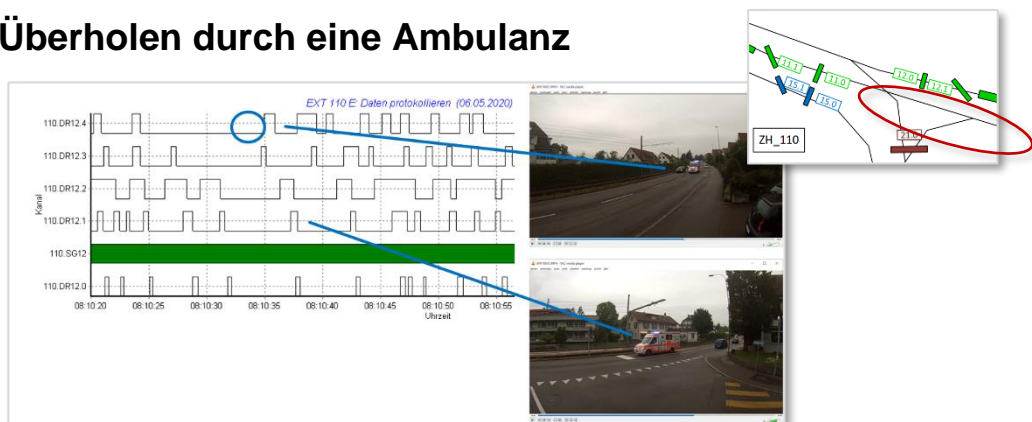


Abb. 196 Ambulanz auf Spur 110.12

Die Detektoren in der Zufahrt 12.4 und 12.3 detektieren üblicherweise den Verkehr korrekt und haben keine Aussetzer. Höchstens einmal wenn der Verkehr zu dicht wird, werden Fahrzeuge nicht korrekt voneinander unterschieden.

Wenn Fahrzeuge fehlen, dann sind sie entweder ins Quartier gefahren oder aus dem Quartier gekommen – oder sie überholen. Überholen ist sehr selten zu beobachten, wie hier im Fall einer Ambulanz mit Blaulicht.

IV.3 Ein- und Ausfahrten mit dem Quartier

Die folgende Abbildung zeigt ein Fahrzeug, welches aus dem Quartier herausfährt und anschliessend auf der Spur [032.17](#) zum Knotenpunkt fährt. Es wird nicht vom Detektor 11.4 detektiert, sondern gleich von Detektor 17.3.

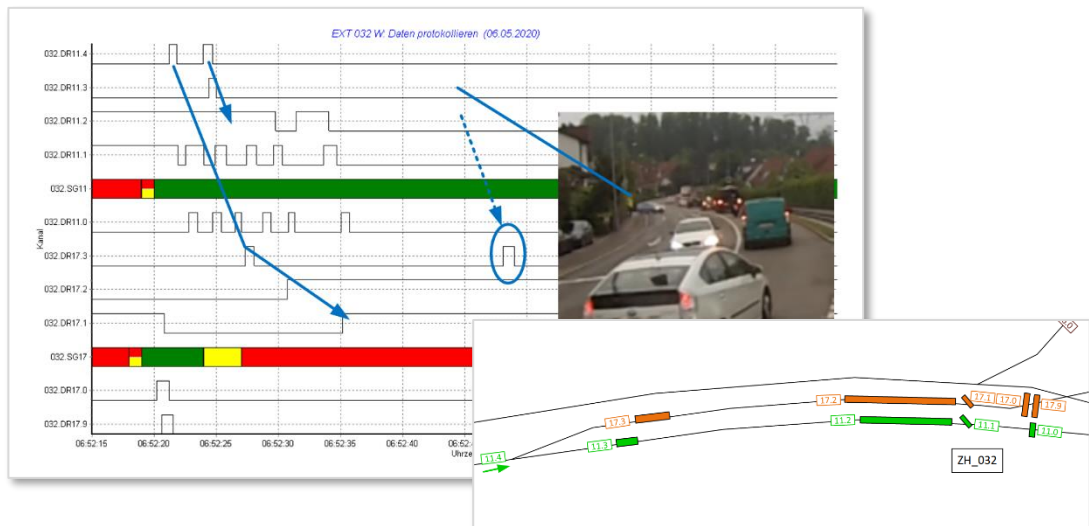


Abb. 197 Einbiegen auf Spur [032.17](#)

Ein weiteres Beispiel für das Einbiegen ist in [Abb. 186](#) im Zusammenhang mit einem Spurwechsel gezeigt.

Im nächsten Fall ist es umgekehrt: das Fahrzeug überfährt noch den Detektor 11.4 und biegt dann ins Quartier ab.



Abb. 198 Ausbiegen von Spur [032.11](#)

IV.4 Kreuzung



Abb. 199 Abbiegender Verkehr über Verlängerungsdetektor [141.DR21.2](#)

Es gibt Situationen, wo der Verlängerungsdetektor von Quartierverkehr gekreuzt werden darf. Dabei spricht er ungewöhnlich kurz an.

Erkennungskriterien:

- Kurzer Impuls des Verlängerungsdetektors

Verwechslungsgefahr:

- Parallelverkehr mit schlechter Spurhaltung
- Gegenverkehr mit Ausweichmanöver (z.B. Überholen eines Velos)

V Fahrzeugtypen

In diesem Kapitel wird eine Auswahl von verschiedene Fahrzeugtypen und die von ihnen erzeugten Detektorimpulse an Haltelinien-nahen Detektoren vorgestellt. Je nach Knoten sind die Detektoren unterschiedlich eingestellt, so dass andere Beobachtungen gemacht werden.

V.1 Fahrzeugtypen am Knoten 032

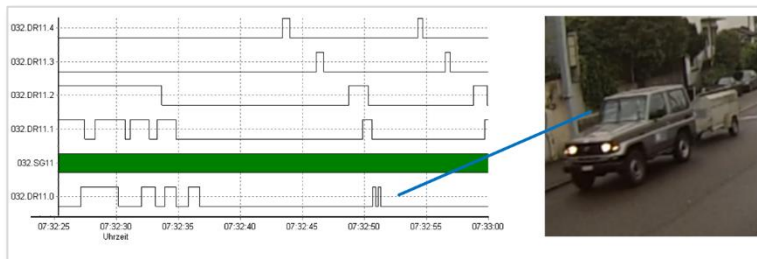


Abb. 200 SUV mit Anhänger auf Spur [032.11](#)

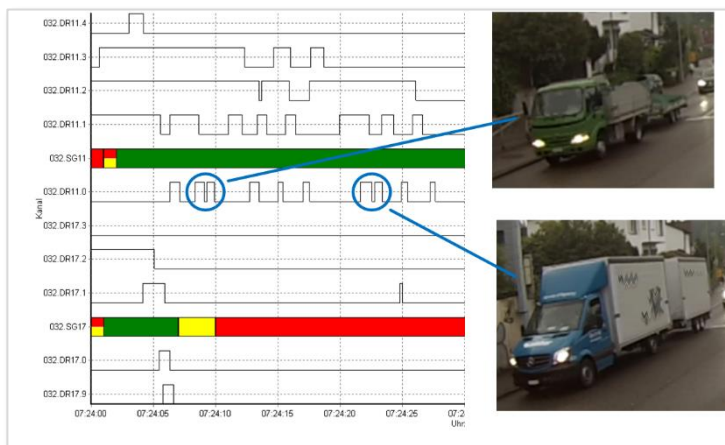


Abb. 201 Zwei Kleinlastwagen mit Anhänger auf Spur [032.11](#)

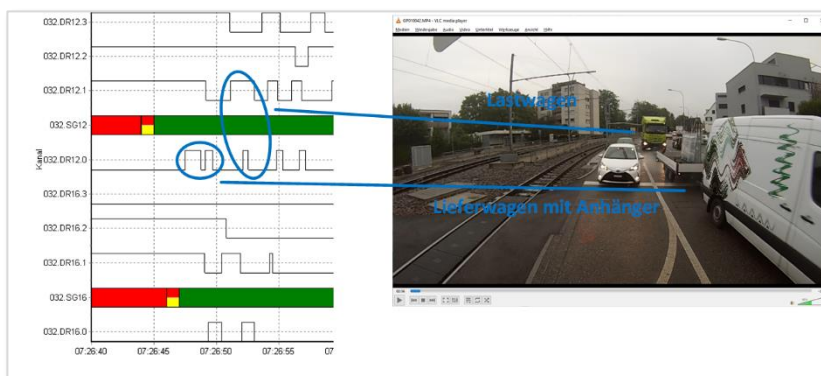


Abb. 202 Lieferwagen mit Anhänger und Lastwagen auf Spur [032.12](#)

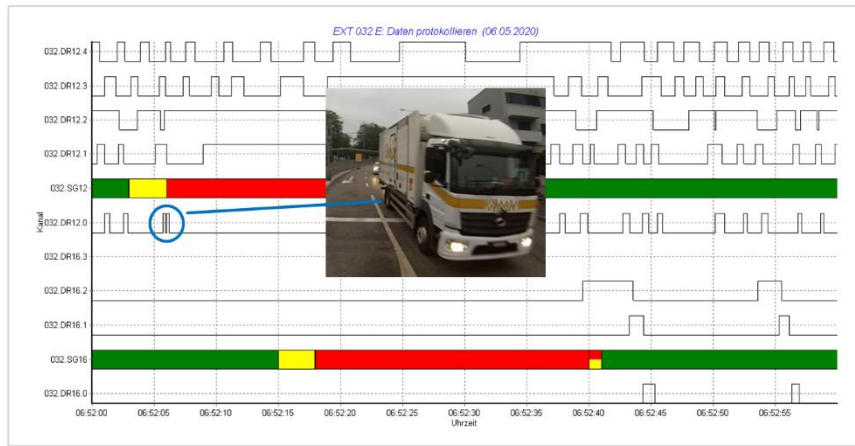


Abb. 203 Lastwagen auf Spur 032.12

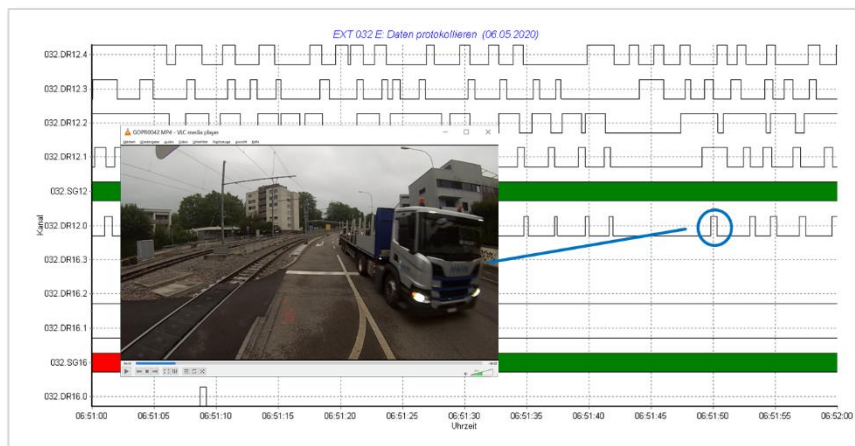


Abb. 204 Sattelschlepper auf Spur 032.12

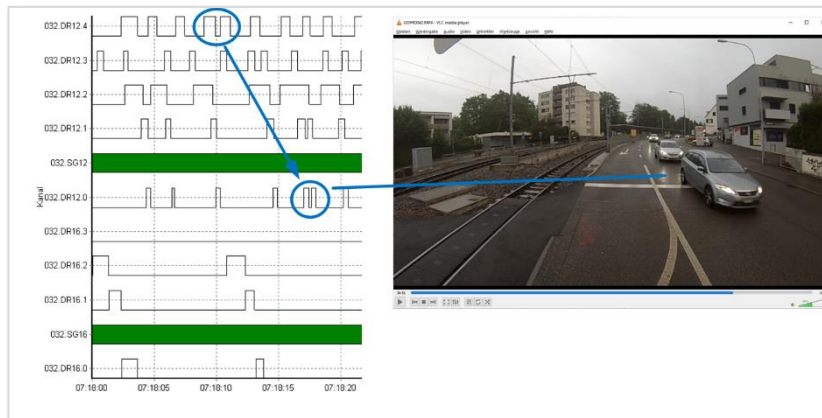


Abb. 205 Zwei eng aufschliessende Fahrzeuge auf Spur 032.12

V.2 Fahrzeugtypen am Knoten 110

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf die beiden Detektoren um die Haltelinie, und zwar «den ersten» 12.1 vor der Haltelinie und «den zweiten» 12.0 nach der Haltelinie.

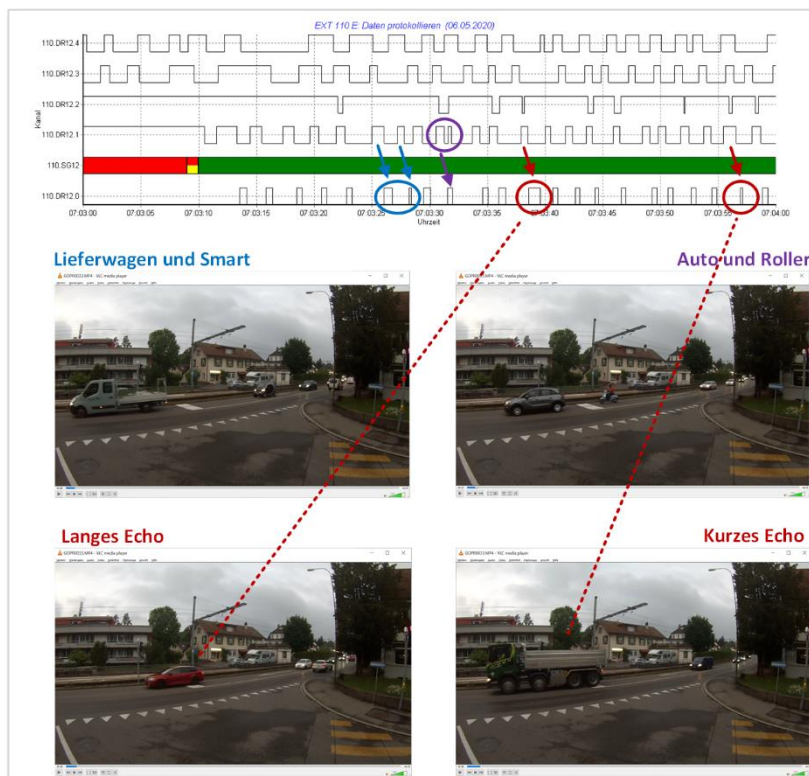


Abb. 206 Fahrzeuge auf Spur [110.12](#)

- Der erste Detektor erkennt den Roller, der zweite nicht (violett)
- Ein Lieferwagen hat auf beiden Detektoren ein längeres Echo als ein Auto (blau)
- Ein Smart hat auf beiden Detektoren ein kurzes Echo (blau)
- Ein Lastwagen hat auf dem 1. Detektor ein langes Echo, auf dem 2. ein kurzes. Die Höhe der Räder scheint für den 2. Detektor eine Rolle zu spielen (rot).

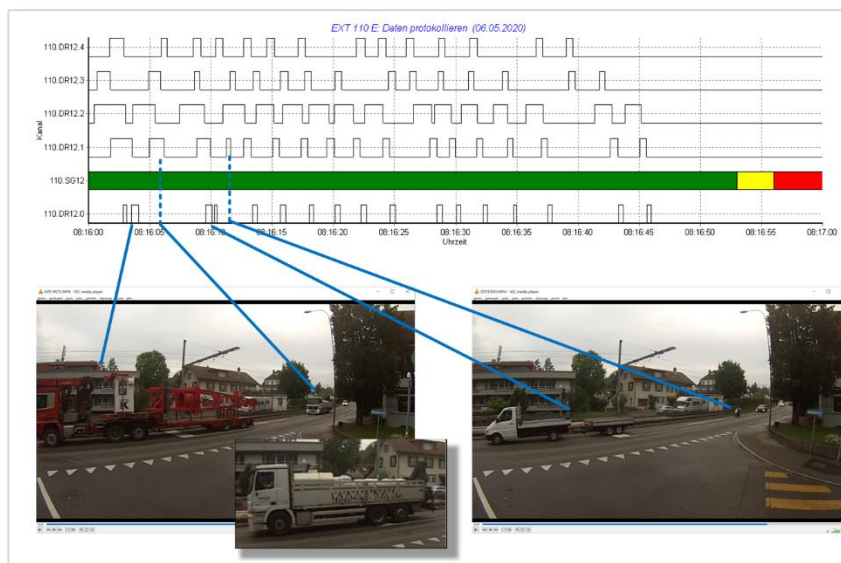


Abb. 207 Fahrzeuge auf Spur [110.12](#)

Alle Fahrzeuge werden vom 1. Detektor 12.3 erkannt.

- Das erste Fahrzeug, ein Krantransporter, ist so lang, dass er auf 12.3 mit zwei Detektionen erkannt wird und auf 12.0 sogar mit drei.

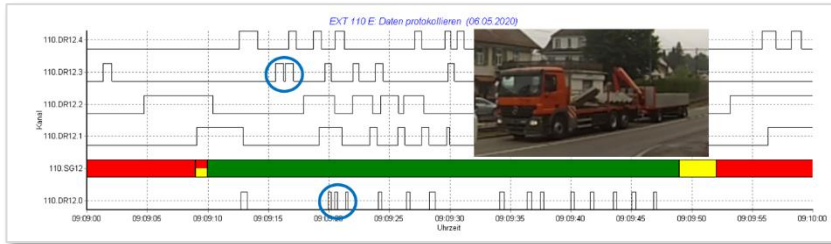


Abb. 208 Langer Lastwagen auf Spur [110.12](#)

- Ein weiteres Fahrzeug, ein normaler Lastwagen, wird vom 2. Detektor nicht erkannt:

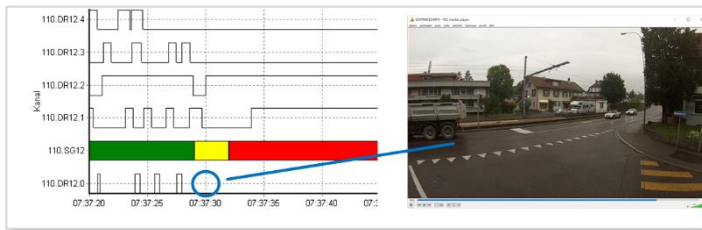


Abb. 209 Lastwagen auf Spur [110.12](#)

- Das erste Motorrad wird auf beiden Detektoren erkannt.
- Das folgende Motorrad erzeugt ein längeres Echo als der folgende Roller, aber beide werden nur auf dem 1. Detektor erkannt:

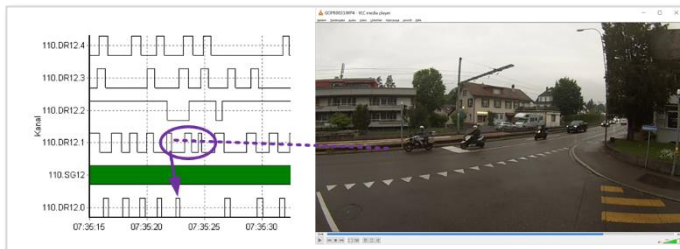


Abb. 210 2 Fahrende Motorräder und Roller auf Spur [110.12](#)

- Das Velo wird nur auf dem 1. Detektor erkannt:

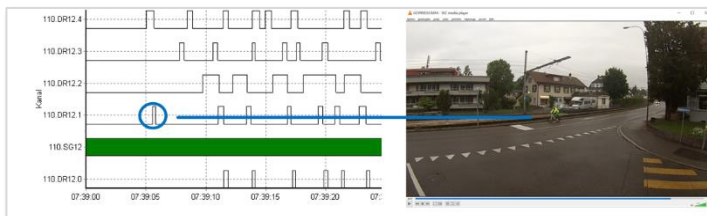


Abb. 211 2 Fahrendes Velo auf Spur [110.12](#)

V.3 Fahrzeugtypen am Knoten 141

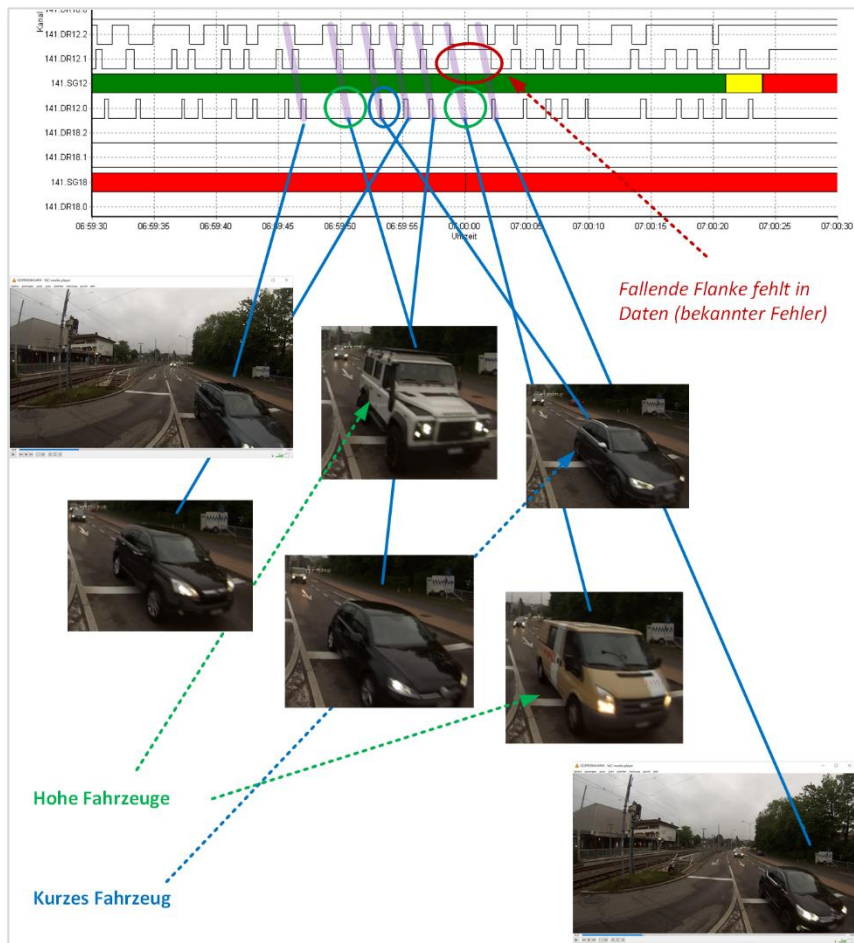


Abb. 212 Verschiedene Typen von Fahrzeugen auf Spur 141.12

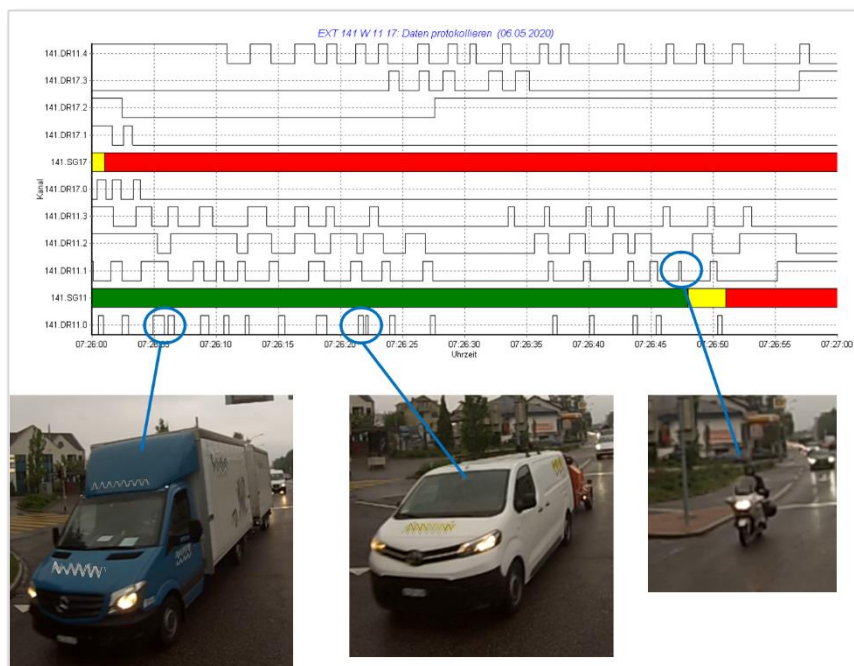


Abb. 213 Verschiedene Typen von Fahrzeugen auf Spur 141.11

V.4 Fahrzeugtypen an Knoten ZUCH_10

Die nächste Abbildung zeigt uns folgende Beobachtungen:

- Ein Motorroller (oben) wird auf den beiden Videodetektoren D10.2 und D10.1 korrekt detektiert, im gezeigten Fall sogar auf dem Verlängerungsdetektor D10.2.
- Anhängerzüge (unten) werden mit 2 Echos auf den Videodetektoren erkannt, erstaunlicherweise auch auf dem Verlängerungsdetektor, dort jedoch als eine Art Nachprellen. Auf dem Schleifendetektor D9.3 zeigen sie das übliche Verhalten, das bis zum Prellen bei Lastenzügen führen kann.

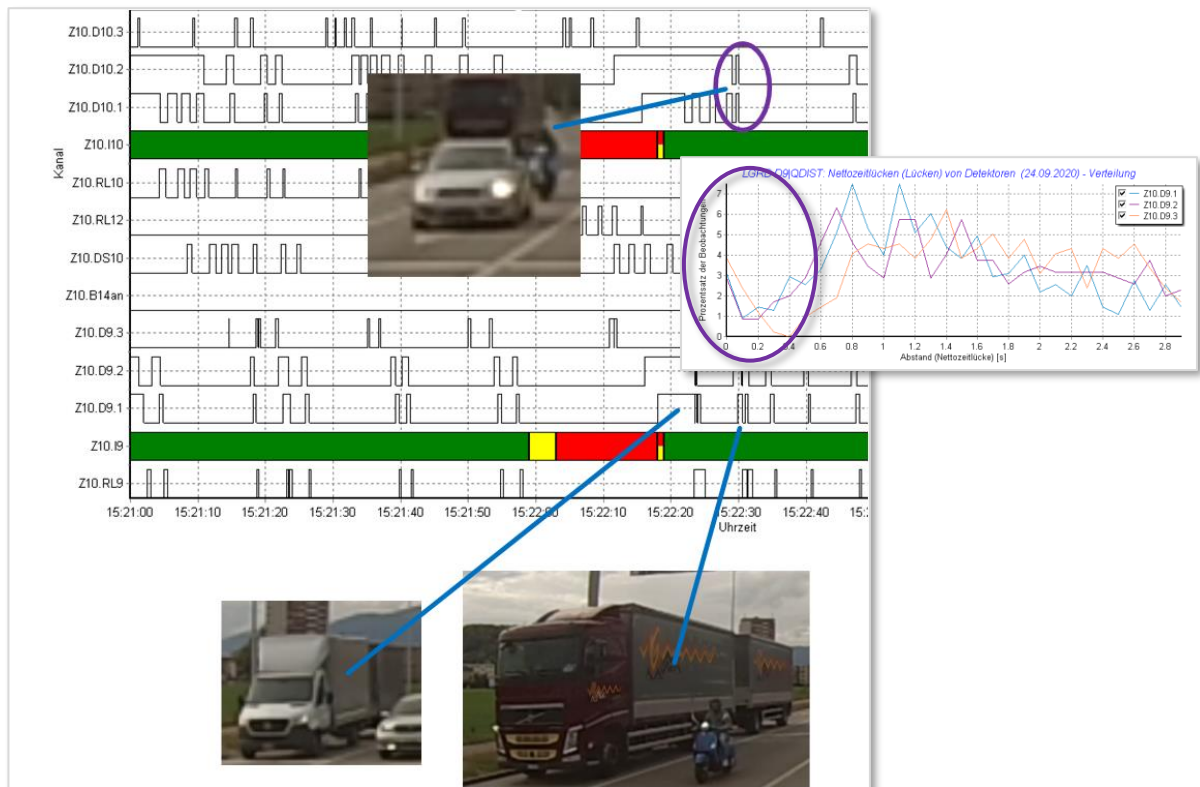


Abb. 214 Roller und Anhängerzüge in der Zufahrt von Westen

Bei Lastwagen hingegen wird häufig das Zugfahrzeug separat detektiert.



Abb. 215 RL13 in der Zufahrt von Norden detektiert Zugfahrzeuge

In der nächsten Abbildung führt die Fahrerkabine eines Lastwagens zu einem Preller auf dem Verlängerungs-Videodetektor.

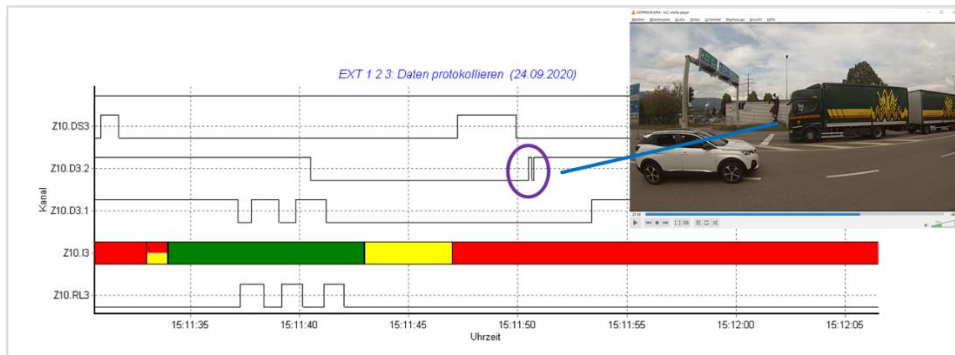


Abb. 216 Fahrerkabine auf Verlängerungs-Videodetektor in Zufahrt von Osten

Auch der Schleifendetektor D2.3 prellt manchmal, hier bei der Überfahrt eines Sattelschleppers – wobei das Prellen eher ein Zählen der Achsen und Drehgestelle ist.

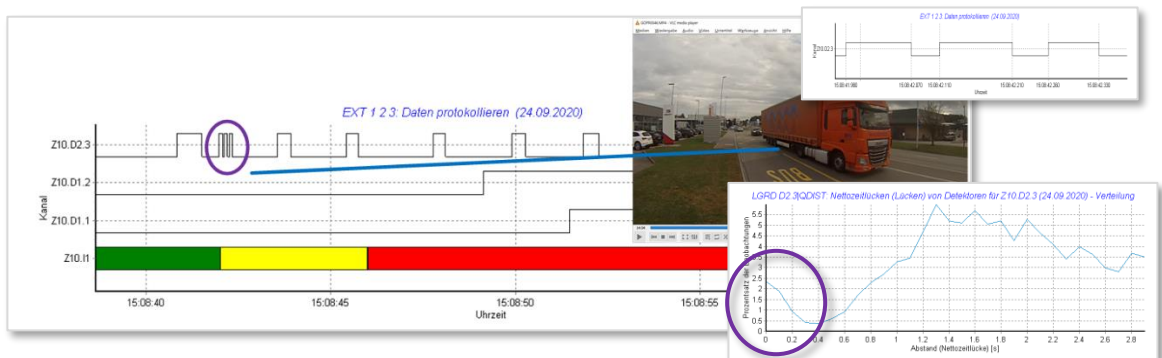


Abb. 217 Dreifaches Echo eines Sattelschleppers auf Schleifendetektor

Auch Anhängerzüge können zu mehreren Echos führen, hier auf dem Rotlichtdetektor RL3.

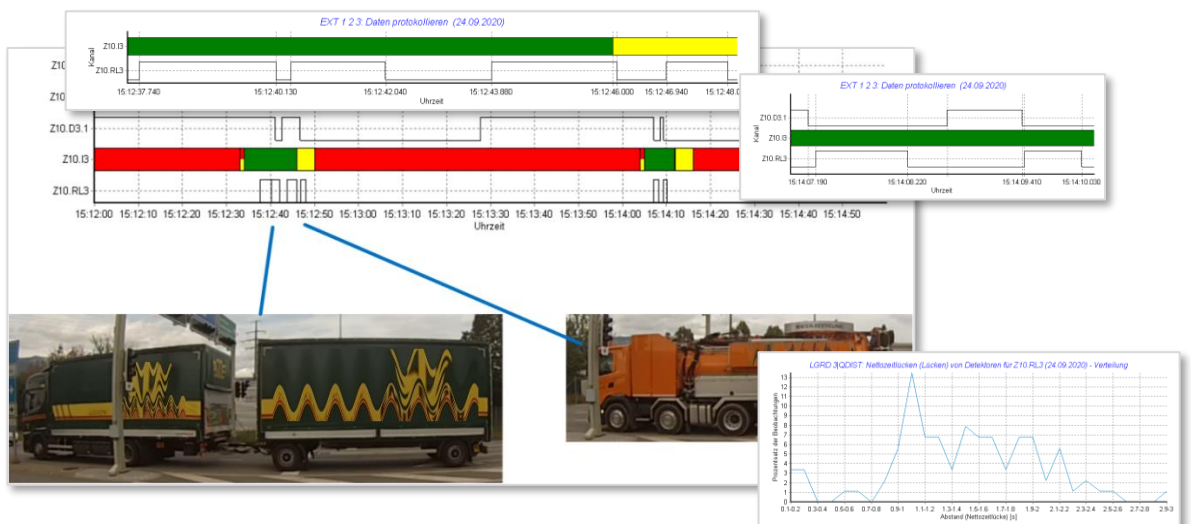


Abb. 218 Detektion von Anhängern

Der 2. Anhängerzug erzeugt eine Lücke von 0.94 s. Im nächsten Grün fahren 2 Fahrzeuge mit einer Lücke von 1.19 s. Das ist sehr knapp, und die Fälle sind entsprechend schwierig voneinander zu unterscheiden.

VI Verfolgung von Fahrzeugen

Die Verfolgung von Fahrzeugen gibt Aufschluss über die Güte der Erfassung der einzelnen Detektoren. Die Fahrzeuge müssen auf jedem Detektor erkannt werden können. Je nach Abschnitt können unterschiedliche Methoden zur Verfolgung von Fahrzeuge verwendet werden:

- In einer Zufahrt mit Staudetektoren kann man sie über ihr [Kolonnenverhalten](#) (siehe Abschnitt 4.5) verfolgen.
- Ebenso spielt der [Längsvergleich](#) aus Kapitel 6.4 eine entscheidende Rolle.
- Schliesslich ist die dort im Anschluss erwähnte Betrachtung des [Gegenverkehrs](#) und auch der [Quervergleich](#) ebenfalls zu berücksichtigen.

VI.1 Einführendes Beispiel

Die nächste Abbildung zeigt die Zufahrt 141.12. In dieser Zufahrt entstehen immer wieder abgeschlossene Gruppen von Fahrzeugen. Sie ziehen sich teilweise über mehrere Umläufe hin. Am Ende müssen alle Zählungen plausibel sein. Wenn nicht, müssen die Unterschiede erklärt werden können. Das ist unser Ziel.

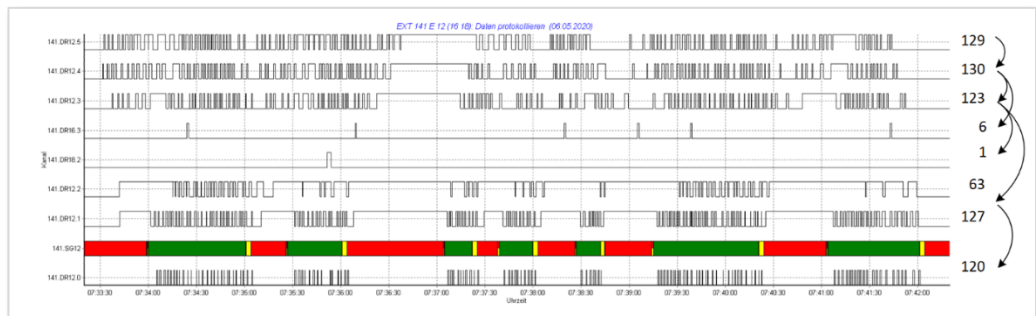
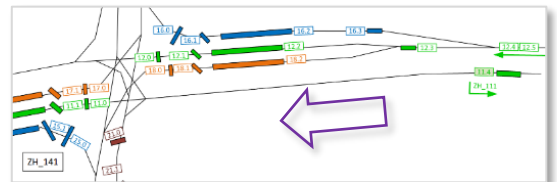


Abb. 219 Eine abgeschlossene Gruppe von gezählten Fahrzeugen

- Alle Fahrzeuge fahren über die Detektoren 12.5 und 12.4.
- Dann spaltet sich der Rechtsabbieger ab, für welchen nur der erste Detektor, 16.3, hier notiert ist.
- Der restliche Verkehr überfährt den Detektor 12.3. Hier spaltet sich der Linksabbieger ab, für welchen nur der erste Detektor, 18.2, hier notiert ist.
- Die anderen Fahrzeuge fahren über den Verlängerungsdetektor 12.2 und schliesslich über den Haltelinien-detektor 12.1.
- Bei Grün überfahren sie die Haltelinie und verlassen den Beobachtungsbereich über den Detektor hinter der Haltelinie, 12.0



Das sollte aus den Aufzeichnungen ersichtlich sein. Wenn wir [Abb. 219](#) betrachten, dann sehen wir feine Unterschiede zu dem, was wir gerade aufgezählt haben:

- Auf dem ersten Detektor, 12.5 wird 1 Fahrzeug weniger detektiert (129) als auf dem 2. Detektor, 12.4 (130).
- Dann fahren 6 Fahrzeuge auf die Rechtsabbiegerspur. Auf dem folgenden Detektor, 12.3, kommen 7 Fahrzeuge weniger an (123). Das deutet darauf hin, dass der erste Detektor korrekt gezählt hat.
- Dann fährt 1 Fahrzeug auf die Linksabbiegerspur. Verlängerungsdetektor 12.2 kann erwartungsgemäss nicht zum Zählen verwendet werden, er zählt im Moment nur etwa

die Hälfte der Fahrzeuge, da er wegen seiner Länge nur bei flüssig fahrendem Verkehr einzelne Fahrzeuge unterscheiden kann.

- Der Detektor vor der Haltelinie, 12.1, kann wieder korrekt zählen. Hier werden 127 Fahrzeuge gezählt statt der erwarteten 122.
- Und schliesslich verlassen 120 Fahrzeuge die Zufahrt über den Detektor 12.0, 7 weniger als gerade noch vorher gezählt und 2 weniger als erwartet.

Im Anhang [III.6](#) sind die Zählfehler der halteliniennahen Detektoren besprochen worden. Hier wollen wir uns nun auch um die Zählfehler der haltelinienfernen Detektoren kümmern.

Sollte man sich nicht im Detail um die Zählfehler kümmern wollen und mit der erreichten Genauigkeit vorlieb nehmen, so könnte man folgende Annahmen treffen:

- Der Abbiegeverkehr wird in den allermeisten Fällen genau erkannt.
- Verlängerungsdetektoren dürfen nicht zum Zählen verwendet werden.
- Bleiben für den Geradeausverkehr die Zählwerte 122 – 123 – 124 – 127 – 120
- Das ergibt einen Mittelwert von 123.2 Fahrzeugen mit einer Abweichung von -2.6 % und +3.1 % - eine Unsicherheit in der Genauigkeit in der Grössenordnung von 5.7 %

Dieser Wert ist nicht wirklich gut, aber auch nicht wirklich schlecht. Es würde sich aber anbieten, den Fehlern noch etwas mehr auf den Grund zu gehen, damit ein paar dieser Werte korrigiert werden können. Das geschieht in den nächsten Abschnitten.

VI.2 Knoten 141, 1. Periode

Der Betrachtete Zeitraum erstreckt sich am 6.5.2020 von 07:10:30 bis 07:18:53. In diesen Grenzen kann das Fahrzeugpaket sicher von vorherfahrenden und nachfolgenden Fahrzeugen unterschieden werden. Folgende Werte sind gezählt worden:

- Rechtsabbieger: 8
- Linksabbieger: 1
- Geradeausverkehr: 127 – 128 – 129 – 132 – 129 (Verlängerungsdetektor: 59)
- Mittelwert: 129, Abweichung -1.6 %, +2.3 %, Unsicherheit 3.9 %

Diese Werte sind recht gut. Werfen wir einen Blick auf die Details.

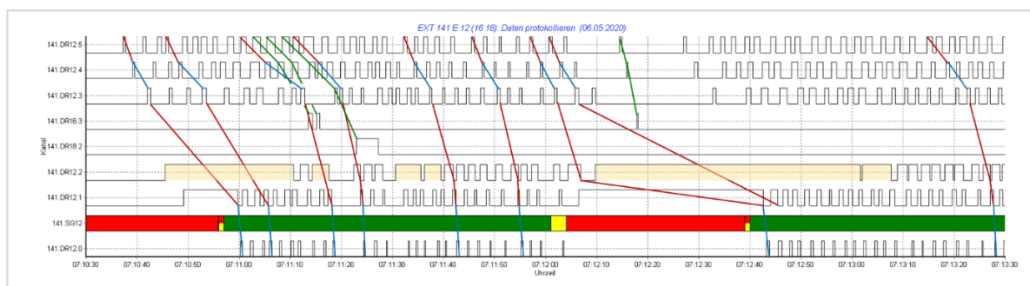


Abb. 220 Fahrzeugverfolgung in Zufahrt [141.12](#), 6.5.2020 07:10:30 bis 07:13:30

Alle Impulse sind korrekt. Die grünen Linien verbinden die Impulse ausgewählter Fahrzeuge des Abbiegeverkehrs, die roten und blauen Linien des Geradeausverkehrs. Detektor 12.2 ist gelblich eingefärbt, sobald er die Fahrzeuge nicht mehr voneinander unterscheiden kann. Das ist bei langsamem Verkehr der Fall.

Die nächste Abbildung überschneidet sich mit 20 Sekunden mit der vorhergehenden, damit man das letzte verfolgte Fahrzeug als erstes auf der nächsten Abbildung wiederfinden kann. Eine Unregelmässigkeit bezüglich Detektion der Fahrzeuge gibt es bei Detektor 12.4 um 07:15:56: da erscheint ein zusätzlicher Impuls, gelb eingekreist. Das ist ein Motorroller, welcher sich an der Kolonne vorbei nach vorne arbeitet und sonst nicht mehr erkannt wird.

Zwei weitere gelbe Kreise sind in der Abbildung zu finden, beide für Detektor 12.5. Sie umkreisen beide Male ein Paar von Fahrzeugen, von denen eines die Spur zum Abbiegen wechseln wird – im ersten Fall ist das das erste Fahrzeug, im zweiten Fall das zweite. In beiden Fällen ist der Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen sehr gering, weil es das hintere Fahrzeug eilig hat.

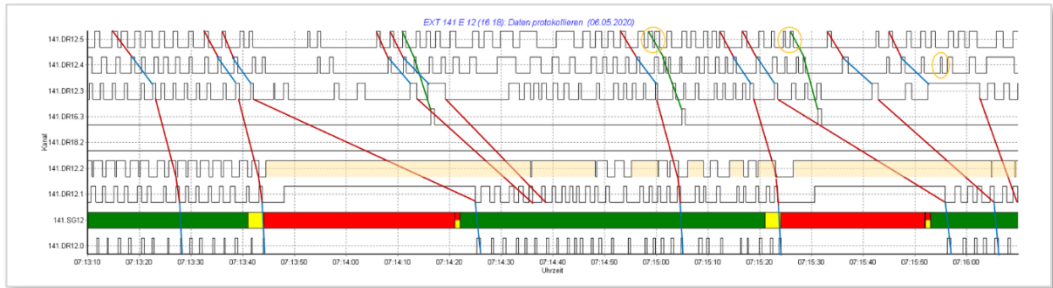


Abb. 221 Fahrzeugverfolgung in Zufahrt [141.12](#), 6.5.2020 07:13:10 bis 07:16:10

VI.2.1 Anmerkungen zur Quell-Ziel-Bestimmung

Zur Quell-Ziel-Bestimmung ist es wichtig, die Fahrzeuge lückenlos durch das System verfolgen zu können. Es gibt Fälle, wo es schwierig ist, mit Sicherheit aus den Daten herauszulesen, welches Fahrzeug zweier aufeinander folgender Fahrzeuge nun die Abbiegespur genommen hat – das erste oder das zweite.



Abb. 222 Eilige Fahrzeuge um 07:15:00 und 07:15:25 an Knoten [141](#)

(Es ist Zufall, dass beide Male das eilige Auto weiss ist und zwei schwarze Rennstreifen auf die Kühlerhaube lackiert hat...)

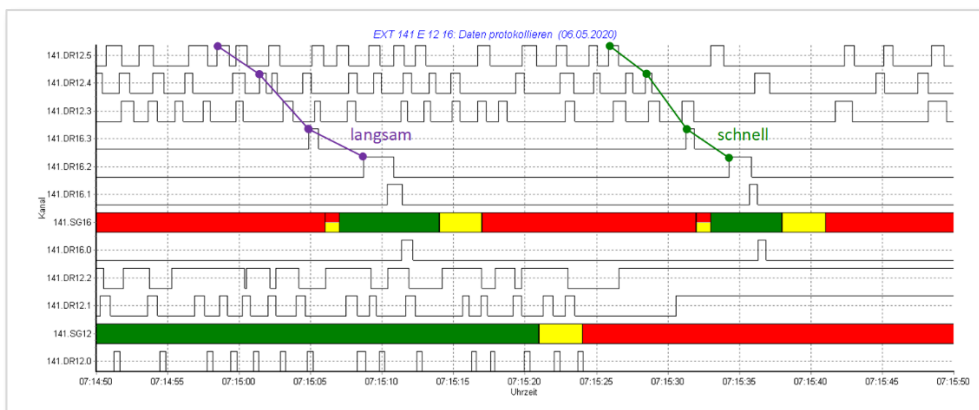


Abb. 223 Geschwindigkeiten der eiligen Fahrzeuge um 07:15:00 und 07:15:25

Den Hinweis auf das abbiegende Fahrzeug kann man nur aus seiner Geschwindigkeit entnehmen: zwischen den Detektoren 12.4 und 16.3 ist sie im zweiten Fall viel höher als im ersten. Würde man die Geschwindigkeit des ersten Falls für den zweiten verwenden, dann fiel die Wahl für das Abbiegefahrzeug wiederum auf das 1. Fahrzeug, was jedoch hier nicht der Fall ist.

VI.3 Knoten 141, 2. Periode

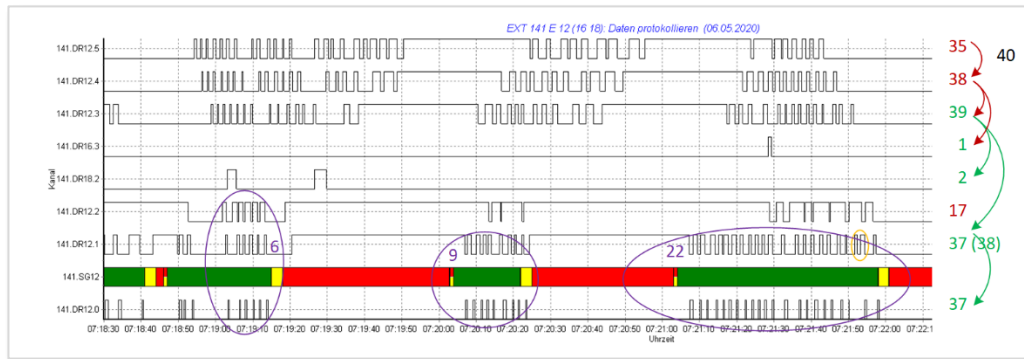


Abb. 225 Fahrzeugverfolgung in Zufahrt [141.12](#), 6.5.2020 07:18:50 bis 07:22:00

Die zweite, hier analysierte Periode, ist kürzer und übersichtlicher. Wir verzichten auf die Verfolgung einzelner Fahrzeuge. Auch der Verlängerungsdetektor wird nicht mehr eingefärbt, wenn er sich verzählt. Rechts neben den Messungen sind die Zählwerte eingezeichnet:

- Schwarz ist die korrekte Zahl einfahrender Fahrzeuge dargestellt.
- Falsche Zählwerte werden rot wiedergegeben, korrekte oder korrigierbare grün.
- Werte in Klammern sind ursprünglich falsche Zählwerte, die jedoch korrigierbar sind.
- Die Pfeile geben die Verknüpfung eines Detektors auf den / die folgenden an.

Folgendes können wir beobachten:

- Wie erwartet, verzählt sich der Verlängerungsdetektor 12.2.
- Der Detektor 12.1 vor der Haltelinie prellt bei der Überfahrt eines Jeeps (gelb eingekreist), was wir aber als korrigierbar annehmen.
- Detektor 12.1 zählt korrekt.
- Detektor 12.3 zählt korrekt.
- Die Detektoren 12.5 und 12.4 zählen zu wenig Verkehr, während die Fahrzeuge sie langsam überfahren.

VI.4 Knoten 141, Zusammenfassung der Perioden

Insgesamt sind 5 Perioden beobachtet worden. Die weiteren Details findet man im Zwischenbericht [\[27\]](#).

Die Qualität der Zählungen der 5 Perioden zeigt sich wie folgt in Tabellenform. Die Perioden sind jeweils mit ihren Anfangszeitpunkten überschrieben:

	07:10:30	07:18:50	07:22:50	07:27:00	07:31:00
12.5	136	35	48	52	20
12.4	137	38	52	53	20
12.3	130	39	46	52	19
16.3	8	1	3	1	1
18.2	1	2	0	2	0
12.2	59	17	24	25	11
12.1	132	38	53	51	20
12.0	129	37	46	49	19

Tab. 226 Zählwerte in Zufahrt [141.12](#)

Grün sind alle Werte eingezeichnet, die korrekt gezählt worden sind.

In der nächsten Tabelle werden die korrigierten Zählwerte dargestellt:

- Grün sind die Zählwerte eingezeichnet, die haben korrigiert werden können,
- rot diejenigen, bei denen das nicht möglich war.
- Weiss sind die Werte, die nicht verändert werden mussten.

Verlängerungsdetektor 12.2 wird in den folgenden Tabellen weggelassen, da seine Zählwerte nicht korrigiert werden können. Es wird angenommen, dass es in Zukunft eine algorithmische Korrektur der Zählwerte geben wird und dass die im folgenden gezeigten Korrekturen maschinell durchführbar sein werden.

	07:10:30	07:18:50	07:22:50	07:27:00	07:31:00
12.5	130	35	48	52	20
12.4	130	38	48	53	20
12.3	130	39	46	52	19
16.3	8	1	2	1	1
18.2	1	2	0	2	0
12.1	129	37	53	50	19
12.0	129	37	46	50	19

Tab. 227 Korrigierte Zählwerte in Zufahrt [141.12](#)

Die letzte Tabelle zeigt schliesslich die Fehler, welche übrig geblieben sind:

	07:10:30	07:18:50	07:22:50	07:27:00	07:31:00
12.5		-5		-1	
12.4		-2			
12.3					
16.3					
18.2					
12.1			7		
12.0					

Tab. 228 Verbleibende Zählfehler in Zufahrt [141.12](#)

VII Störungen

VII.1 Forchbahn

Gewisse Züge der Forchbahn verursachen Störungen an den Detektoren.

VII.1.1 Knoten 110

In der West-Zufahrt (stadtauswärts) ist der Rechtsabbiege-Detektor 15.1 von Störungen betroffen, in der Ost-Zufahrt (stadteinwärts) hauptsächlich der Geradeaus-Detektor 12.1 und sporadisch auch 12.2. Es treten aperiodische Schwingungen auf.

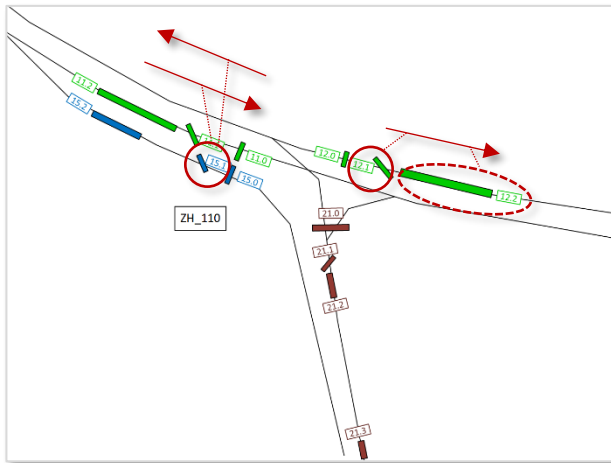


Abb. 229 Detektorschema für Störungen durch die Forchbahn am Knoten [110](#)

Zufahrt West



Abb. 230 Störungen durch stadtauswärts fahrende Forchbahn am Knoten [110](#) (W)

Zufahrt Ost

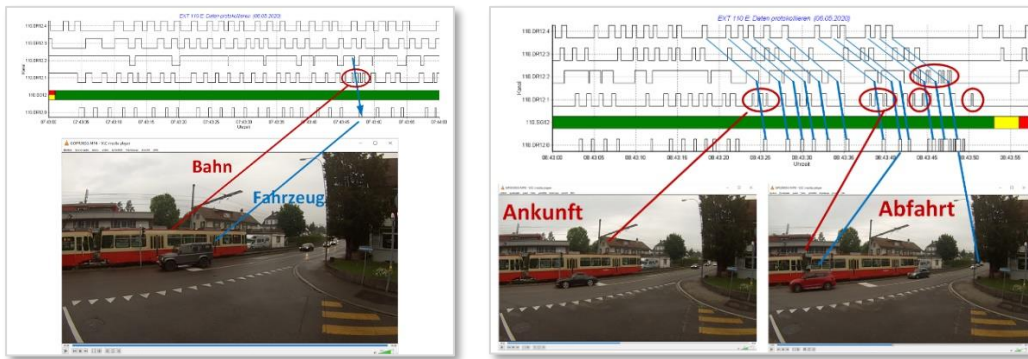


Abb. 231 Störungen durch stadtauswärts fahrende Forchbahn am Knoten [110](#) (E)

VII.1.2 Knoten 032

In der West-Zufahrt (stadtauswärts) sind die Geradeaus-Detektoren 17.1 und 17.2 von Störungen durch stadtauswärts fahrende Züge betroffen, in der Ost-Zufahrt (stadteinwärts) alle Detektoren (ausser 12.0 und 16.0) für stadtauswärts fahrende Züge und für stadteinwärts fahrende Züge der Geradeaus-Detektor 16.1.

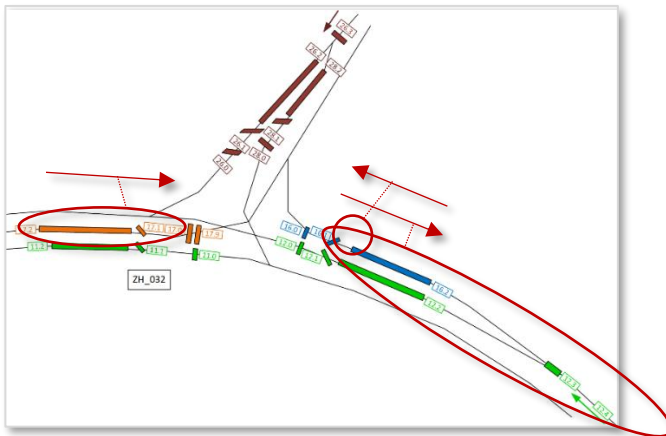


Abb. 232 Detektorschema für Störungen durch die Forchbahn am Knoten [032](#)

Zufahrt West

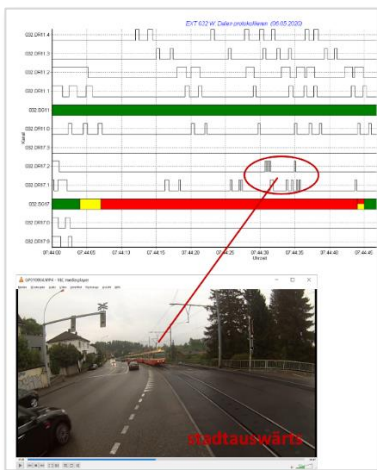


Abb. 233 Störungen durch stadtauswärts fahrende Forchbahn am Knoten [032](#) (W)

Zufahrt Ost

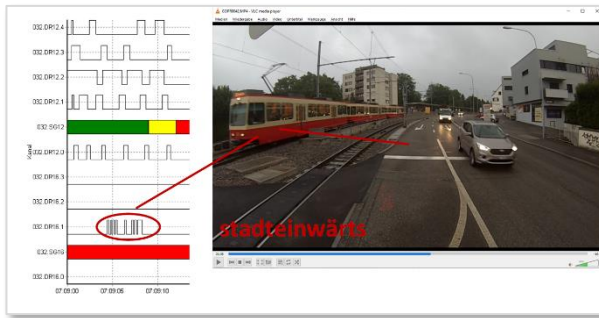


Abb. 234 Störungen durch stadteinwärts fahrende Forchbahn am Knoten [032](#) (E)

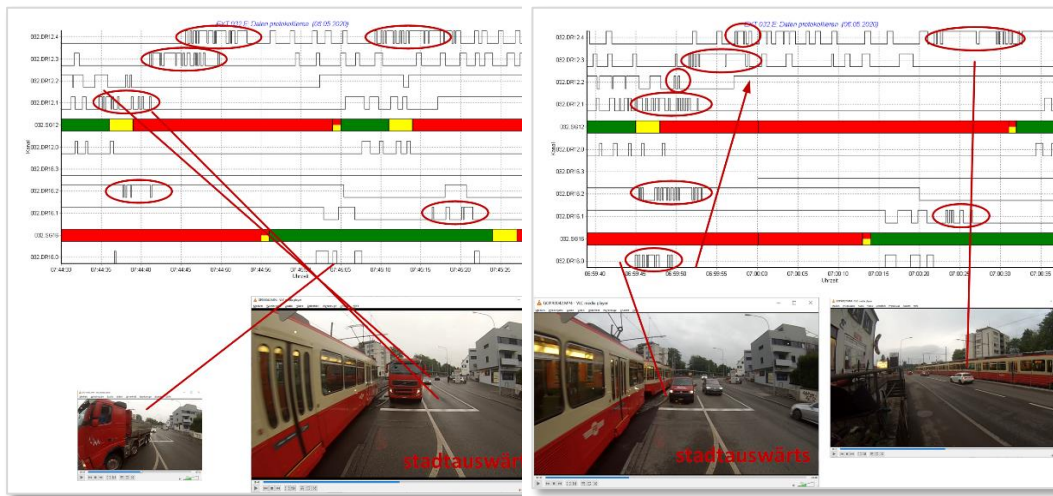


Abb. 235 Störungen durch stadtauswärts fahrende Forchbahn am Knoten [032](#) (E)

VII.1.3 Knoten 141

Nur der Geradeaus-Detektor 12.1 in der Ostzufahrt wird manchmal von stadtauswärts fahrenden Zügen gestört.

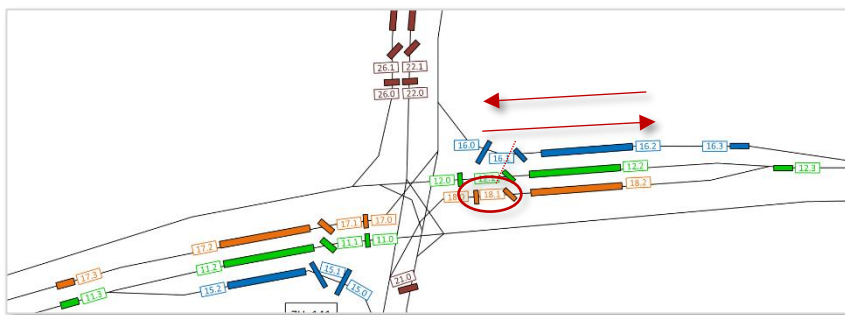


Abb. 236 Detektorschema für Störungen durch die Forchbahn am Knoten [141](#)

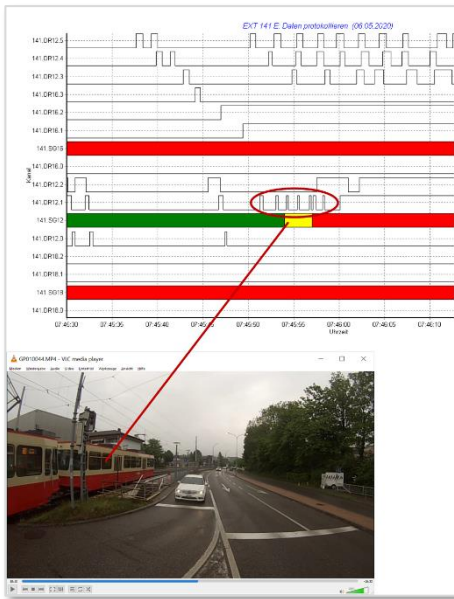


Abb. 237 Störungen durch stadtauswärts fahrende Forchbahn am Knoten [141 \(E\)](#)



Abb. 238 Störungen durch stadteinwärts fahrende Forchbahn am Knoten [141 \(E\)](#)

In der nächsten Abbildung blau markiert ist eine Detektion, welche von der Forchbahn ausgelöst worden ist und am Ende von einem vorbeifahrenden Fahrzeug um 07:31:42 gelöscht wird.

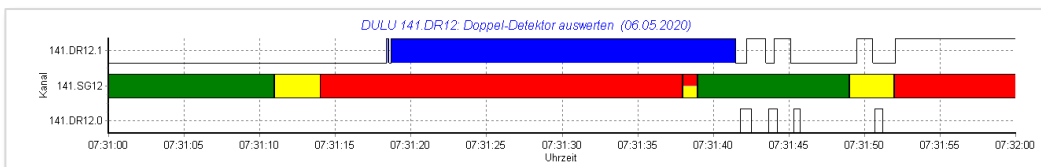


Abb. 239 Störungen durch stadtauswärts fahrende Forchbahn am Knoten [141 \(E\)](#)

VII.2 Nicht erklärbare spontane Impulse

VII.2.1 Knoten 110



Abb. 240 Nicht erklärbare Impulse von Detektor [110.DR15.1](#)

Schon in [Abb. 163](#) hat dieser Detektor seltsame Signale von sich gegeben, als ein Velo auf dem Trottoir an ihm vorbeigefahren ist.

Hier sind weitere, nicht erklärbare Fälle gezeigt, wo möglicherweise der Parallelverkehr, fahrend oder stehend, plötzlich eine Anzahl Impulse induziert.

VII.2.2 Knoten 141

Detektor [141.DR12.1](#) ist anfällig auf die Vorbeifahrt der Forchbahn, siehe [Abb. 237](#). Er schwingt aber auch gerne einmal spontan. Die nächste Abbildung zeigt ihn nach der Vorbeifahrt eines Autos mit gleichzeitigem Überholen durch ein Motorrad und Übersprechen eines Rechtsabbiegers. Der längere Impuls um 07:26:40 geht auf das Abbremsen eines Fahrzeuges zurück und ist korrekt.

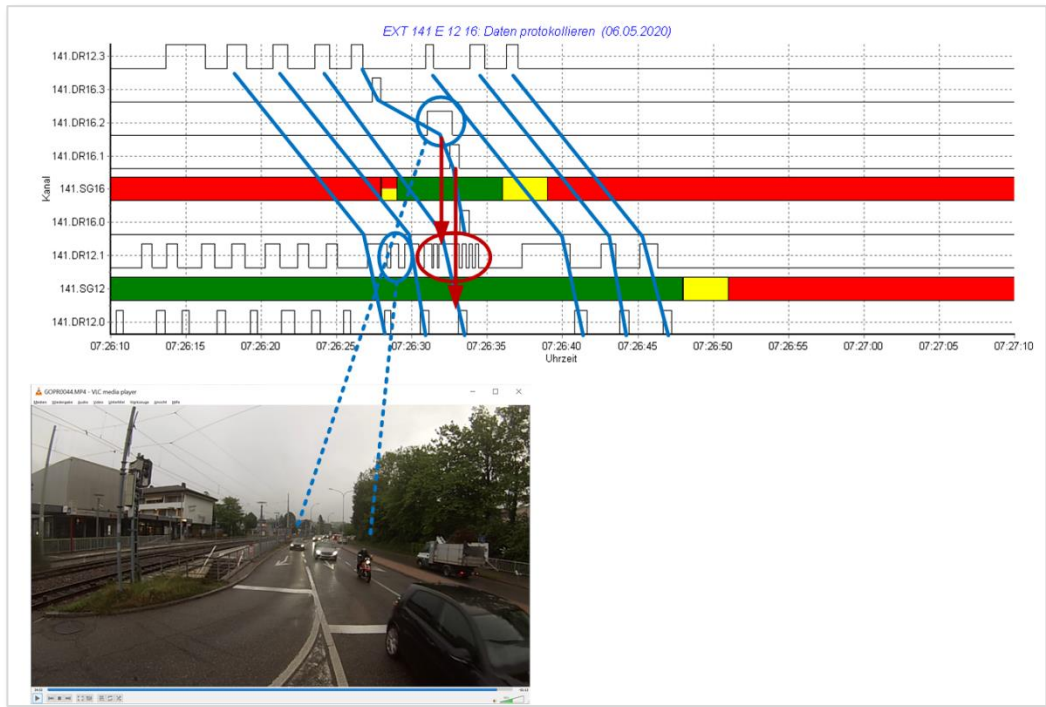
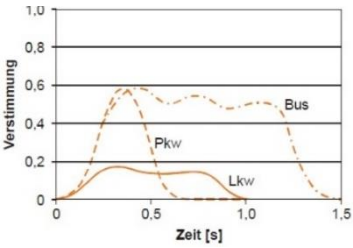
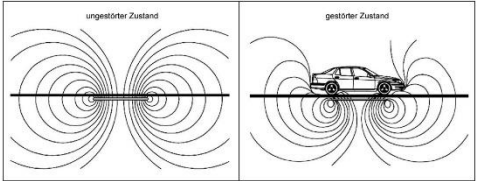


Abb. 241 Störpulse von Detektor [141.DR12.1](#)

Glossar und Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
ASTRA	Bundesamt für Strassen
Auswerteeinheit	<p>In der Auswerteeinheit einer Induktionsschleife oder eines Doppeldetektors wird die gemessene Verstimmung (auch Magnetfelddifferenz) ausgewertet und vornehmlich anhand von negativen und positiven Schwellwerten und zugehörigen Hysteresen in ein binäres Signal umgewandelt, welcher «0» für «nicht belegt» und «1» für «belegt» bedeutet.</p> <p>(Graphik: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV))</p>
	
Bruttozeitlücke	Die Zeit zwischen zwei gleichen Flanken eines Detektorsignals, also zwischen den beiden steigenden (Motorhaube bis Motorhaube) oder den fallenden (Kofferraum bis Kofferraum). Üblicherweise wird zwischen den beiden steigenden Flanken gemessen.
Datenschutz	Der sichere und gesetzeskonforme Umgang mit elektronischen Daten mit Bezug zur Privatsphäre des Einzelnen.
DATEX II	Europäisches Protokoll für den Austausch von Verkehrsmessdaten, traditionell auf Intervallen basierend und somit grösstenteils für den Austausch von Verkehrsmessdaten auf Schnellstrassen verwendet. https://www.datex2.eu/datex2/about
Dilemmazone	<p>Die Dilemmazone ist ein Bereich vor einer Ampel. Das Dilemma besteht darin, dass wenn die Ampel von Grün auf Gelb schaltet und ein Autofahrer sich in dieser Zone befindet, er ein Dilemma hat, ob er noch durchfahren soll und dabei eine Rotlichtmissachtung riskieren oder stark bremsen und dabei eventuell einen Auffahrunfall des nachfolgenden Fahrzeuges in Kauf nehmen muss.</p> <p>Die Überwachung der Dilemmazone mittels eines Detektors dient somit primär der Verkehrssicherheit, sekundär aber auch der Verbesserung des Fahrgefühls des Fahrzeuges, das gerade noch bei Grün durchgelassen werden konnte und nicht anhalten musste und später wieder anfahren.</p> <p>Detektoren in der Dilemmazone werden üblicherweise Verlängerungsdetektoren genannt, da sie der Verlängerung des Grüns der zugeordneten Ampel dienen.</p>
Doppeldetektor	<p>Zwei Detektoren, die in kurzem Abstand aufeinander folgen, können algorithmisch als Doppeldetektor behandelt werden. Im Umfeld von LSA-Detektoren sind Doppeldetektoren häufig «ad hoc» zu finden, d.h. sie sind nicht als solche erstellt worden.</p> <p>Werden ihre Signale in der Auswerteeinheit gemeinsam verarbeitet, wie bei den VDE-Zählstellen, können aus Differenz der Magnetfelder zusätzliche Rückschlüsse gezogen werden, welche präzisere Aussagen bezüglich Fahrzeugklasse und Geschwindigkeit ermöglichen.</p>
FCD	Floating Car Data – Positionsdaten, üblicherweise GPS-Daten, welche von einzeln ausgerüsteten und in der Menge «mitschwimmenden» Fahrzeugen erhoben und übermittelt werden können; inzwischen spricht man häufiger von kommunizierenden Fahrzeugen (V2X), welche unter anderem auch Positionsdaten übermitteln können.
FGSV	Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen in Deutschland
GPS	Global Positioning System – Die empfangenen GPS-Signale können in Informationen zur aktuellen Position eines Fahrzeuges verwendet werden.
Induktionsschleife	<p>Die Induktionsschleife basiert auf einer Drahtschleife, die mit Hilfe des Prinzips der elektromagnetischen Induktion verwendet wird. Sie wirkt als Spule. Sie wird parallel zu einem Kondensator geschaltet und bildet so einen Schwingkreis, dessen Resonanzfrequenz von der Kapazität des fest gegebenen Kondensators und von der Induktivität der Spule (der Induktionsschleife) abhängt.</p> <p>Befindet sich ein metallischer Gegenstand (z.B. ein Fahrzeug) im Bereich der Induktionsschleife, so wird dadurch die Induktivität und die Güte der Spule verändert: Feldverdrängung und Wirbelströme verringern die Güte und die Induktivität, ferromagnetische Teile (z.B. Blech) erhöhen die Induktivität. Dadurch ändert sich die Resonanzfrequenz und die</p>
	

	Dämpfung des Schwingkreises. Dies wird von einer Elektronik ausgewertet, der so genannten Auswerteeinheit. Als Messwerte liefert sie so genannte flankengenaue Rohdaten an das Steuergerät. (zitiert aus Wikipedia, Graphik aus [5])
Kfz	Kurzform für «Kraftfahrzeug» - in Deutschland übliche Bezeichnung für ein Motorfahrzeug (MFZ)
Knoten	Kurzform für den Fachausdruck «Knotenpunkt». Er steht allgemein für eine Strassenkreuzung, wird aber meist für Strassenkreuzungen mit Lichtsignalen verwendet.
LSA-Detektor	Detektor, welcher einer Lichtsignalanlage zur Regelung des Verkehrs dient. Daneben gibt es VDE-Zählstellen, welche nur der Erfassung des Verkehrs dienen.
MFZ	Abkürzung für Motorfahrzeug
MR	Abkürzung für Motorrad
Nettozeitlücke	Die Zeit zwischen der fallenden Flanke eines Detektorsignals und der nächsten steigenden nächsten Flanke, also zwischen Kofferraum des vorderen Fahrzeuges und Motorhaube des folgenden Fahrzeugs. Es ist die Zeit, während welcher ein Detektor zwischen zwei Fahrzeuge nicht belegt ist.
OCIT	Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems: Standard, hauptsächlich zur Kommunikation zwischen Steuergeräten und Zentralen (OCIT-O bzw. OCIT-Outstations) sowie zwischen Applikationen und der Zentrale (OCIT-I bzw. OCIT-Instations) und sein Nachfolger OCIT-C bzw. OCIT-Center to Center https://www.ocit.org/de/odg/die-odg/
OCIT-I PD	Schnittstelle für die Übermittlung von Prozessdaten , genormt in OCIT-Instations; die Schnittstelle ermöglicht Ereignis-orientiert u.a. die Übertragung von Detektorflanken und Signalgruppen-Zustandswechseln mit einer üblichen Auflösung von 1/10 s. Auch Intervalldaten können übertragen werden. Ausserhalb des Zentralen-Umfelds wird dafür aber üblicherweise DATEX II verwendet. OCIT-I PD ist in OCIT-C integriert worden.
OZS	Offene Zentralen-Schnittstelle: Proprietäre Schnittstelle der FESA Logik GmbH zwischen Steuergeräten und Zentralen [25]
Poisson-Verteilung	Die Poisson-Verteilung ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, mit der die Anzahl von Ereignissen modelliert werden kann, die bei konstanter mittlerer Rate unabhängig voneinander in einem festen Zeitintervall eintreten. Vereinfacht kann man sagen, dass eine Poisson-Verteilung eine asymmetrische Gauss-Verteilung ist, insbesondere hat sie nie negative Werte.
Regelung	Die Regelung ist ein Begriff der Regelungstechnik und damit Teil der Automatisierungstechnik. Sie beschreibt den Vorgang der Einflussnahme auf ein System, welche anhand von Messungen im System stattfindet. In diesem Zusammenhang spricht man auch vom geschlossenen Regelkreis: Messen im System – Vergleich mit dem Sollwert – Veränderung der Regelgrößen für das System, und dann wieder von vorn, bis der Vergleich mit dem Sollwert zufriedenstellend ist.
Rohdaten	Unter flankengenaue Rohdaten verstehen wir in diesem Forschungsbericht Daten von Zustandswechseln. Sie werden primär von Detektoren erzeugt («1» für belegt und «0» für nicht belegt), aber auch von Signalgruppen («Grün», «Gelb», «Rot», «Rot-Gelb»). Sie haben typischerweise eine Auslösung von 1/10s. Dies ist im Gegensatz zu aggregierten Daten, welche statistische Werte über konstante oder variable Intervalle enthalten (z.B. Zählraten über ein Intervall von 3 Minuten).
Signalgruppe	Eine Signalgruppe kann mehrere Signalgeber eines Knotens zusammenfassen, welche immer zusammen geschaltet werden.
Signalzeitenplan	Die graphische Darstellung der Zustandswechsel von Signalgruppen (üblicherweise rot, rot-gelb, grün, gelb) und optional auch der steigenden und fallenden Flanken der Rohsignale von Detektoren («1» für belegt, «0» für frei) und von Meldepunkte der Fahrzeuge des Öffentlichen Verkehrs. In Abb. 69 ist ein solcher Signalzeitenplan dargestellt.
Staudetektor	Ein Staudetektor ist ein etwas länger gebauter Detektor, um zuverlässig Stau zu erkennen. Er muss so lang gebaut sein, dass er sicher stehenden Verkehr erkennt, auch wenn er zwischen zwei Fahrzeugen zu liegen kommt.
Steuerung	Die Steuerung ist ein Begriff der Steuerungstechnik und Teil der Automatisierungstechnik. Im Gegensatz zur Regelung setzt sie historisch eine offene Steuerkette voraus, um sich von der Regelungstechnik mit geschlossenem Regelkreis abzugrenzen. Mit dem Aufkom-

	men der digitalen Steuerungstechnik, in welcher auch geschlossene Regelkreise vorkommen, hat sich die Grenze zwischen der Begriffsverwendung von Regelung und Steuerung etwas verwischt. Im Englischen gibt es für Steuerung und Regelung nur ein einziges Wort: Control.
Steuergerät	Das Steuergerät schaltet die Ampeln auf Rot und auf Grün. An ihm sind die Detektoren angeschlossen, welche von ihm zur Ausführung der Steuerung bzw. Regelung des Knotenpunkts verwendet werden.
Übersprechen	Der Begriff des «Übersprechens» wird hier im übertragenen Sinn gebraucht: es findet kein Übersprechen im elektronmagnetischen Sinn statt, sondern Übersprechen bedeutet, dass der Detektor Fahrzeuge auch ausserhalb des geometrischen Bereichs misst, für den er eigentlich gedacht ist.
V	Abkürzung für Velo, auf Hochdeutsch auch Fahrrad genannt
V2X	Vehicle-to-everything – das «X» kann für «V» für «Vehicle» oder «I» für «Infrastruktur» stehen. In diesem Bericht ist V2I interessant, die Möglichkeit von Fahrzeugen, mit der Infrastruktur – sprich dem Steuergerät – zu kommunizieren und ihm beispielsweise Positionsdaten des Fahrzeugs zu übermitteln oder Navigationsinformationen oder weitere Details wie Blinkrichtung, Nebel- oder Abblendlicht usw.
verkehrstechnischer Zustand	einer Signalgruppe: damit bezeichnet man allgemein den Zustand «frei» für «Fahren erlaubt» und «gesperrt» für «Fahren nicht erlaubt». Zu «frei» zählt man üblicherweise das Grün und das Gelb, zu «gesperrt» das Rot und das Rot-Gelb.
VDE-Zählstelle	Detektor, welcher der Erfassung des Verkehrs dient (Zählwert, Längenkategorie, evtl. Geschwindigkeit, Belegungszeit)
Verlängerungsdetektor	Ein Verlängerungsdetektor dient dem Verlängern von Grün. Er überwacht den Nahbereich vor dem Lichtsignal mit dem Ziel, sein Grün so lange beizubehalten, wie es effizient vom zufließenden Verkehr genutzt werden kann. Die Dilemmazone kann mit einem Verlängerungsdetektor überwacht werden.
Videodetektor	Unter Videodetektor verstehen wir in diesem Bericht eine Videokamera, welche die Anwesenheit (und Abwesenheit) von Fahrzeugen optisch feststellt und in Signale in Form von flankengenauen Rohdaten an das Steuergerät liefert, wie wenn sie von Induktionsschleifen kommen würden, also als Zustandswechsel nach «0» und «1». Dazu rechnen wir auch optische Geräte, welche das Infrarotlicht mit auswerten (z.B. FLIR).
VPD	Vehicle Protocol Data : proprietäres Protokoll der Adaptive Traffic Control AG und der Verkehrs-Systeme AG zur Aufzeichnung von Messdaten aus dem Strassenverkehr [24]. Komprimiert und mit einem Index versehen, trägt es die Endung VPX
VS-pCoq	Protection of Control Quality – ein Programm zur verkehrstechnischen Qualitätsanalyse. Die Rechte liegen bei der Adaptive Traffic Control AG in Winterthur, und das Programm wird und wurde teilweise exklusiv von der Verkehrs-Systeme AG in Muttenz vertrieben (daher das Präfix «VS»). Das Programm basiert auf der Erkenntnis, dass die beste Regelung [2] ohne gute Beobachtung [1] nicht gut sein kann und dass es wichtig ist, die Beobachtung und Beobachtbarkeit des Strassenverkehrs anhand seiner Messdaten zu beherrschen. Die Verwendung zur Qualitätsanalyse liegt dabei auf der Hand. Das Programm ist käuflich erwerblich und ist inzwischen zu einer Programmfamilie angewachsen. Es eignet sich auch gut zur Unterstützung von Forschungen.
VS-VPDB	Verkehrs-Protokoll-Datenbank – ein Programm zur Organisation von VPD-Dateien. Die Rechte liegen bei der Adaptive Traffic Control AG in Winterthur, und das Programm wird und wurde teilweise exklusiv von der Verkehrs-Systeme AG in Muttenz vertrieben (daher das Präfix «VS»). Im Gegensatz zu den meisten Zentralen-Lösungen sind die Verkehrsmessdaten hier nicht an eine Datenbank gebunden, sondern liegen portabel in Dateien und können platzsparend in Archiven organisiert werden. Üblicherweise werden sie nach Knoten und Tagen abgelegt. Der typische Datenbedarf eines Tages liegt zwischen 1 MB und 5 MB. Das Programm verfügt über viele Import- und Exportmöglichkeiten und ermöglicht es, dass das VPD-Format als Basis beispielsweise auch von Forschungsarbeiten verwendet werden kann.
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
Zeitbedarfswert	Der Bedarf am Zeit pro Fahrzeug zum Überfahren eines bestimmten Punktes. Er entspricht der Bruttozeitlücke. Üblicherweise wird ein gemittelter Zeitbedarfswert verwendet, welcher sich aus dem üblichen Zeitbedarfswert errechnet oder als solcher angenommen wird. Der Zeitbedarfswert ist eine wichtige Kenngrösse für die Leistungsfähigkeit der Kreuzung. Der Zeitbedarfswert sollte periodisch experimentell ermittelt werden.
Zustandswechsel	einer Signalgruppe: damit bezeichnet man allgemein das Umschalten auf ein neues Signalbild, also beispielsweise von Rot auf Rot-Gelb oder von Grün auf Gelb. Dieser Begriff darf nicht mit dem verkehrstechnischen Zustand verwechselt werden.

Glossaire et abréviations

Terme	Signification
armoire	Terme utilisé pour l'installation de régulation d'un carrefour, principalement pour le hardware mais aussi le logiciel de contrôle. Allemand : Steuergerät
créneau inter-véhiculaire	Temps nécessaire par véhicule pour passer un certain point, souvent la ligne d'arrêt devant un feu. Cela correspond au créneau intervéhiculaire brut. Le créneau intervéhiculaire moyen est un paramètre important pour la performance d'un carrefour. Le créneau inter-véhiculaire moyen doit être mesuré périodiquement, voir temps requis par véhicule.
DATEX II	Protocole européen d'échange de données pour les mesures de données de trafic, traditionnellement basé sur l'intervalle et donc largement utilisé pour le comptage du trafic et d'autres échanges de valeurs sur les autoroutes. https://www.datex2.eu/datex2/about
détecteur armoire	Détecteur utilisé dans un système de régulation de circulation d'un carrefour par une armoire. Il existe également des stations de comptage qui servent uniquement à compter le trafic.
détecteur double	Deux détecteurs qui se succèdent à courte distance peuvent être traités de manière algorithmique comme un détecteur double. Dans le cadre de détecteurs armoire, on trouve souvent des détecteurs doubles «ad hoc», c'est-à-dire qu'ils n'ont pas été créés avec cette intention.
diaphonie	Le terme « diaphonie » est ici utilisé au sens figuré : il n'y a pas de diaphonie au sens électromagnétique mais la diaphonie signifie que le détecteur mesure également les véhicules en dehors de la plage géométrique à laquelle il est effectivement destiné.
groupe de feux	Un groupe de feux peut combiner plusieurs boîtes à feux d'un carrefour qui sont toujours commutés ensemble.
M	Abréviation pour moto
OCIT	Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems: Standard, principalement pour la communication entre armoire et poste central (OCIT-O resp. OCIT-Outstations) ainsi qu'entre applications et le poste central (OCIT-I resp. OCIT-Instations) et son successeur OCIT-C resp. OCIT-Center to Center) https://www.ocit.org/de/odg/die-odg/
OCIT-I PD	Interface de données pour les données de processus générées par les systèmes de régulation de trafic; l'interface transmet des événements de changement d'état, par exemple des fronts de détecteurs ou des changements d'état de groupes de feux (rouge, jaune, vert) avec une résolution habituelle de 1/10 s. Les données d'intervalle peuvent également être transmises. Normalement, DATEX II est utilisé à cette fin en dehors des postes centraux. Le protocole OCIT-I PD a été intégré dans OCIT-C.
plan de feux	Affichage graphique de tous les changements d'état des groupes de feux (généralement rouge, rouge-jaune, vert, jaune) et éventuellement des fronts montants et descendants des signaux bruts du détecteur (« 1 » pour occupé, « 0 » pour libre) et des points d'annonce du transport en commun. La figure « Abb. 69 » montre un exemple de plan de feux. Allemand: Signalzeitenplan
temps requis par véhicule	Le temps requis par véhicule est un créneau intervéhiculaire moyen et est un paramètre important pour la performance d'un carrefour. Allemand : Zeitbedarfswert
V	Abréviation pour vélo
VM	Abréviation pour véhicule à moteur

Glossary and abbreviations

Term	Meaning
B	Abbreviation for bicycle
DATEX II	European data exchange protocol for traffic data measurements, traditionally interval-based and thus widely used for traffic count and other value exchanges on motorways. https://www.datex2.eu/datex2/about
double detector	Two detectors that are close together can algorithmically be treated as a single double detector. Within the groups of intersection detectors, double detectors can often be found «ad hoc», i.e. they were not created with such intention.
headway	English term for "Bruttozeitlücke" and thus "Zeitbedarfswert", also called "gross time gap". Usually, it is measured as the time distance from the tip (front end) of one vehicle to the tip of the next one behind it. Other definitions like space instead of time or "net time gap" instead of "gross time gap" also exist. The average headway indicates the expected time required by one vehicle for passing an intersection and therefore is a crucial parameter for intersection capacity that should be experimentally verified. <i>(partly cited from Wikipedia)</i> German : Zeitbedarfswert
intersection detector	Detector used in a traffic control system to regulate traffic. For count purposes usually dedicated traffic counting stations are used that measure counts in intervals, often enriched by aggregated occupancy and speed measurements
MC	Abbreviation for motorcycle
MV	Abbreviation for motor vehicle
OCIT	Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems: Standard, mainly for communication between controller and control center (OCIT-O or OCIT-Outstations) as well as between applications and the control center (OCIT-I or OCIT-Instations) and its successor OCIT -C or OCIT-Center to Center) https://www.ocit.org/de/odg/die-odg/
OCIT-I PD	Data interface for process data generated by traffic control systems; the interface transmits state change events, e.g., of detector slopes or signal group state changes (red, yellow, green) with a usual resolution of 1/10 s. Interval data can be transmitted as well. Normally DATEX II is used for this purpose outside traffic centers. The OCIT-I PD protocol has been integrated into OCIT-C.
signal group	A signal group can consist of several signal heads that are always switched together.
signal timing plan	Graphical display of all signal groups state changes (usually red, red-yellow, green, yellow) and optionally of the rising and falling slopes of the raw detector signals ("1" for occupied, "0" for free), and of public transport call points. Figure " Abb. 69 " shows an example signal timing plan. German: Signalzeitenplan

Literaturverzeichnis

Publikationen

-
- [1] Riedel, Th. (1994), **Processing detector signals for dynamic traffic control**, *Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Transportations Systems*, Tianjin, China
-
- [2] Riedel, Th., Brunner U. (1994), **Traffic control using graph theory**, *Control Engineering Practice, Volume 2, Issue 3, June 1994, Pages 397-404*, Elsevier, DOI: 10.1016/0967-0661(94)90776-5
-
- [3] Petty, K. F., Bickel, P., Ostland, M., Rice, J., Schoenberg, F., Jiang, J., Ritov, Y. (1998), **Accurate estimation of travel times from single-loop detectors**. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 32(1), Seiten 1-17, [https://doi.org/10.1016/s0965-8564\(97\)00015-3](https://doi.org/10.1016/s0965-8564(97)00015-3)
-
- [4] Bernhard, J., Riedel, Th. (1999), **Erkennung von Stau mit kurzen Schleifendetektoren**, *Heureka-Kongress 1999*, Karlsruhe, Deutschland
-
- [5] Lehnhoff, N. (2005), **Überprüfung und Verbesserung der Qualität von automatisch erhobenen Daten an Lichtsignalanlagen**, *Dissertation an der Universität Hannover*, Deutschland
-
- [6] Dittrich, C. (2011), **Rückstaulängenschätzung zur verbesserten Geschwindigkeitsempfehlung im Fahrzeug**, *Heureka-Kongress 2011 "Optimierung in Verkehr und Transport"*, Deutschland
-
- [7] Riedel, Th., Oda, T., Koga, M. (2014), **Estimating time-varying O/D information on the base of detector pulse data and FCD measurements**, *21st ITS World Congress*, Detroit, USA
-
- [8] Riedel, Th., Erni, K. (2015), **Do my loop detectors count correctly? A set of functions for detector plausibility testing**, *22nd ITS World Congress*, Bordeaux, Frankreich
Als Langversion publiziert im "Journal of Traffic and Transportation Engineering, (English Edition)"
-
- [9] Zhang, X., Riedel Th. (2016), **Urban Traffic Control: Present and the Future**, publiziert im "International Journal of Urban Sciences", Korea
-
- [10] Riedel, Th., Oda, T., Koga M. (2016), **Merging FCD and detector data: testing and improving the new VICS algorithm**, *23rd ITS World Congress*, Melbourne, Australien
-
- [11] Riedel, Th., Huber, C., Oda, T. (2017), **Calculating time loss by impulse detector data for transport quality measurement**, *24th ITS World Congress*, Montréal, Kanada
-
- [12] Chang, D., Saito, M., Schultz, G., Eggett, D. (2017), **Use of Hi-resolution data for evaluating accuracy of traffic volume counts collected by microwave sensors**, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), Volume 4, Issue 5*, ISSN 2095-7564, <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.06.002>.
-
- [13] Riedel, Th. (2018), **Handling local traffic-actuated intersection control with V2I data**, *25th ITS World Congress*, Kopenhagen, Dänemark
-
- [14] Riedel, Th., Huber, C. (2019), **Finding traffic quality measures with signal change data only**, *26th ITS World Congress*, Singapur
-
- [15] Loder, A., Ambühl, L., Menendez, M., Axhausen, W. (2019), **Understanding traffic capacity of urban networks**, In: *NatureResearch*, <https://www.nature.com/articles/s41598-019-51539-5>
-

Berichte

-
- [16] Riedel, Th. (1997), **Die Auswirkung der Länge der Grünphase auf den Fluss des Verkehrs**, *Bericht Nr. 97-01 der Adaptive Traffic Control*, im Auftrag der Stadt Zürich
-
- [17] Engemann, S. (2009), **Data Mining zur Analyse von Verkehrsdaten**, *Diplomarbeit an der TU Braunschweig*, Deutschland
-
- [18] Schmietendorf, G. (2010), **Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs in städtischen Netzen**, *Studienarbeit an der TU Dresden und am DLR*, Deutschland
-
- [19] Lavrenz, S., Day, Ch., Grossman, J., Freije, R., and Bullock, D. (2016), **Use of High Resolution Signal Controller Data to Identify Red Light Running**, *Lyles School of Civil Engineering Faculty Publications. Paper 23*, <http://docs.lib.purdue.edu/civeng/23>
-
- [20] Al-Abbas, N. (2018), **Exploring High-Resolution Data Obtained from ASC/3 Controller of Intersection SE Division St & SE 122nd Ave, Portland, Oregon**, *Civil and Environmental Engineering Master's Project Reports*. 39, <https://doi.org/10.15760/CEMP.38>
-
- [21] Vinogradova, Ks. (2021), **Analyzing Traffic Flow Data Using Sensors at Signalized Intersections**, *Master Thesis*, TU München, Deutschland
-

VSS- und FGSV-Publikationen

-
- [22] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2010), **Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen**, VSS 1320.
-
- [23] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement (2019), **Hinweise zu Detektionstechnologien im Strassenverkehr**, FGSV 312.
-

Dokumentationen

- [24] Adaptive Traffic Control AG und Verkehrs-Systeme AG (Riedel, Th. 2003-2020), **Das VPD-Datenformat: Beschreibung der Datenstruktur – Anleitung für die Programmierung**, *Version 00-01-06 – 06/2020*
- [25] FESA Logik GmbH (Erb, Th., Inauen, R. 2019), **Offene Zentralen-Schnittstelle OZS – Schnittstelle OZS2 und OZS3 – Signalbeschreibungen**, *Version 1.10*
http://www.fesa.ch/assets/downloads/OZS_Signalbeschreibung_V1.10.pdf
- [26] Forschung im Strassenwesen des UVEK (Zwischenbericht dieses Projekts), **Verkehrsdatenerfassung über Sensoren von LSA: Grundlagen und Theorie**, *Projekt VSS2019/126 (04/2020)*
- [27] Forschung im Strassenwesen des UVEK (Zwischenbericht dieses Projekts), **Verkehrsdatenerfassung über Sensoren von LSA: Feldversuche 1 – Zollikon (ZH)**, *Projekt VSS2019/126 (09/2020)*
- [28] Forschung im Strassenwesen des UVEK (Zwischenbericht dieses Projekts), **Verkehrsdatenerfassung über Sensoren von LSA: Feldversuche 2 – Zuchwil und Solothurn**, *Projekt VSS2019/126 (01/2021)*
-

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Qualitätsklassen für Verkehrsmesswerte	8
Abb. 2	Wichtigste Detektoren und ihre Rollen in einer Zufahrt	10
Tab. 3	Typische Zähl-Genauigkeiten von Detektoren in einer Zufahrt	10
Abb. 4	Gemessenes Signal eines einzelnen Detektors	13
Abb. 5	Gemessene Signale eines Doppeldetektors.....	14
Abb. 6	Gemessene Signale zweier nebeneinander liegender Detektoren	15
Abb. 7	Gemessene Signale zweier benachbarter, verschobener Detektoren	15
Abb. 8	Beispielhaftes Anfahrverhalten in einer Zufahrt	16
Abb. 9	Geschwindigkeit auf einer Doppelschleife	16
Tab. 10	Classes de qualité pour les mesures de trafic.....	18
Fig. 11	Les détecteurs les plus importants et leurs rôles lors d'une approche	20
Tab. 12	Précisions typiques de comptage des détecteurs lors d'une approche	20
Fig. 13	Signal mesuré pour un seul détecteur.....	23
Fig. 14	Signaux mesurés provenant d'un détecteur double	24
Fig. 15	Signaux mesurés de deux détecteurs en parallèle	25
Fig. 16	Signaux mesurés de deux détecteurs en parallèle, légèrement déplacés	25
Fig. 17	Comportement de démarrage dans une approche exemple.....	26
Fig. 18	Vitesse sur une boucle double	26
Tab. 19	Quality classes for traffic measurements.....	28
Fig. 20	Most important detectors and its roles in a driveway	30
Tab. 21	Typical counting precisions of detectors in a driveway	30
Fig. 22	Measured signal from a single detector.....	33
Fig. 23	Measured signals from a double detector	34
Fig. 24	Measured signals from two parallel detectors located next to each other	35
Fig. 25	Measured signals from two neighboring, slightly displaced detectors	35
Fig. 26	Drive-away behavior in an example approach	36
Fig. 27	Speed on a double loop.....	36
Abb. 28	Kameraplan für Knoten 032 in Zollikon.....	48
Abb. 29	Lageplan zur Verfolgung von Fahrzeugen am Knoten 032 (E)	50
Abb. 30	Aufzeichnungen zur Verfolgung von Fahrzeugen am Knoten 032 (E)	50
Abb. 31	Zählwerte pro 3 Umläufe in der Zufahrt 12 am Knoten 032 (E).....	51
Abb. 32	Zählwerte pro 3 Umläufe in den Zufahrten 12 und 16 am Knoten 032 (E).....	51
Abb. 33	Detektoren für Messung des Anfahrverhaltens	60
Abb. 34	Reaktionszeiten in der Zufahrt von Osten (ZUCH_10)	61
Abb. 35	Verteilung aller Bruttozeitlücken bzw. des Zeitbedarfswerts	61
Abb. 36	Kolonnenverhalten bei üblicher Koordination	62
Abb. 37	Kolonnenverhalten bei unterbrochener Koordination	62
Abb. 38	Vergleich der Zählwerte in Zufahrt SOLO_16 1.....	63
Tab. 39	Zähl-Eigenschaften der Detektoren in Zufahrt SOLO_16 1	63
Tab. 40	Zählgenauigkeit der Detektoren in Zufahrt SOLO_16 1	64
Tab. 41	Erhöhte Zählgenauigkeit der Detektoren in Zufahrt SOLO_16 1	64
Abb. 42	Verteilungsfunktionen der Nettozeitlücken in Zufahrt SOLO_16 1	65
Tab. 43	Zähl-Eigenschaften der Detektoren in Zufahrt SOLO_16 1	65
Abb. 44	Vergleich der Zählwerte in Zufahrt SOLO_16 3.....	66
Tab. 45	Zähl-Eigenschaften der Detektoren in der Zufahrt SOLO_16 3	66
Tab. 46	Zählgenauigkeit der Detektoren in Zufahrt SOLO_16 3	66
Tab. 47	Erhöhte Zählgenauigkeit der Detektoren in Zufahrt SOLO_16 3	67
Abb. 48	Verteilungsfunktionen der Nettozeitlücken in Zufahrt SOLO_16 3	67
Tab. 49	Zähl-Eigenschaften der Detektoren in der Zufahrt von ZUCH_10 West	67

Abb. 50 Vergleich der Zählwerte in der Zufahrt von ZUCH_10 West	68
Tab. 51 Zähl-Eigenschaften der Detektoren in den Zufahrten von ZUCH_10 Nord und Süd	68
Abb. 52 Vergleich der Zählwerte in der Zufahrt von ZUCH_10 Süd	69
Abb. 53 Staudetektoren in der Zufahrt von ZUCH_10 Süd.....	70
Abb. 54 Unterkannte Fahrzeuge	70
Abb. 55 Schwingen von Z4.3 bei Dauerbelegung.....	70
Abb. 56 Vergleich der Zählwerte in der Zufahrt von ZUCH_10 Nord.....	71
Abb. 57 RL13 verschluckt Folgefahrzeuge von Lastwagen	71
Abb. 58 RL13 detektiert Zugfahrzeuge	72
Abb. 59 RL13 detektiert Anhänger und vergisst Folgefahrzeug	72
Tab. 60 Zähl-Eigenschaften der Detektoren in der Zufahrt von ZUCH_10 Ost	73
Abb. 61 Vergleich der Zählwerte in der Zufahrt von ZUCH_10 Ost.....	73
Abb. 62 Prellender Verlängerungs-Videodetektor	74
Abb. 63 Fahrerkabine auf Verlängerungs-Videodetektor.....	74
Abb. 64 Dreifaches Echo eines Sattelschleppers auf Schleifendetektor	74
Abb. 65 Detektion von Anhängern	75
Tab. 66 Zähl-Eigenschaften der Induktionsschleifen an den Brückenenden	75
Abb. 67 Vergleich der Zählwerte auf der Brücke und an den Brückenenden	75
Abb. 68 Detektionssequenzen in Zufahrt 3	76
Abb. 69 Fahrzeugverfolgung in Zufahrt 110.11, 6.5.2020 07:00 bis 07:03.....	76
Tab. 70 LSA-Detektor 11.4 und VDE-Zählstelle 1288, 6.5.2020 07:00:20 bis 07:02:25..	77
Abb. 71 Fahrzeugverfolgung in Zufahrt 110.11, 6.5.2020 07:06 bis 07:09.....	77
Tab. 72 LSA-Detektor 11.4 und VDE-Zählstelle 1288, 6.5.2020 07:05:30 bis 07:06:56..	77
Abb. 73 Korrekte Intervall-Zählwerte eines Detektors mit spontanem Spitzenverkehr....	79
Abb. 74 Korrekte Verteilung von Bruttozeitlücken eines Detektors	79
Abb. 75 Flanken eines Detektors und Zustandswechsel einer Signalgruppe.....	79
Abb. 76 Fehlerhafte Zählwerte eines Detektors mit spontanem Spitzenverkehr.....	80
Abb. 77 Spontanes Schwingen eines Detektors	80
Abb. 78 Bruttozeitlücken bei spontanem Schwingen eines Detektors.....	80
Abb. 79 Detektorprotokoll von 092.D6.281	81
Abb. 80 Impulsfolge mit spontaner Dauerbelegung	81
Abb. 81 Ostzufahrt des Knotens BS_217	81
Abb. 82 Normale Verteilungen der Belegungsdauern für Detektoren	82
Abb. 83 Normale Verteilungen der Bruttozeitlücken für Detektoren	82
Abb. 84 Abnormale Verteilungen der Belegungsdauern für Detektoren.....	83
Abb. 85 Abnormale Verteilungen der Bruttozeitlücken für Detektoren	83
Abb. 86 Schwingende Detektoren in der Ostzufahrt von BS_217	84
Abb. 87 Normale Verteilungen der Belegungsdauern für Detektoren 217.D*_8	84
Abb. 88 Abnormale Verteilungen der Belegungsdauern für Detektoren.....	85
Abb. 89 Normale Entwicklung der Verteilungen der Belegungsdauern	85
Abb. 90 Abnormale Entwicklung der Verteilungen der Belegungsdauern	86
Abb. 91 Verteilungen der Belegungsdauern für die Verlängerungs-Detektoren.....	86
Abb. 92 Verteilungen der Belegungsdauern für die Haltelinien-Detektoren	87
Abb. 93 Verteilungen der Belegungsdauern für die Anmelde-Detektoren.....	87
Abb. 94 Hoch auflösende Verteilung der Belegungsdauern für Detektor 217.D6_8	88
Abb. 95 Belegungs-Sequenz für Detektor 217.D6_8	88
Abb. 96 Signalplanschreiber für Detektor 217.D6_8 rund ums Übersprechen	88
Abb. 97 Übersprechen um die Fahrspur 217.7 (mittlere Spur)	89
Abb. 98 Übersprechen auf Detektor 217.D6_8.....	90
Abb. 99 Grenzwerte für 111.12	90
Tab. 100 Erkennungsgüte von Fahrzeugklassen mit Doppelschleife 111.12	90

Abb. 101 Grenzwerte für 141.12	91
Tab. 102 Erkennungsgüte von Fahrzeugklassen mit Doppeldetektor 141.12.....	91
Tab. 103 Erkennungsgüte von Fahrzeugklassen in Zufahrt ZUCH_10.1.....	91
Tab. 104 Erkennungsgüte von Fahrzeugklassen in Zufahrt ZUCH_10.2.....	92
Tab. 105: Erkennungsgüte von Fahrzeugklassen in Zufahrt ZUCH_10.3.....	92
Abb. 106 Geschwindigkeit auf Doppelschleife 111.12	92
Abb. 107 Geschwindigkeit auf Doppeldetektor 141.12	92
Abb. 108 Geschwindigkeit in Zufahrt ZUCH_10 Zufahrt 1	93
Abb. 109 Geschwindigkeit in ZUCH_10 Zufahrt 2.....	93
Abb. 110 Geschwindigkeit in ZUCH_10 Zufahrt 3.....	93
Abb. 111 Fahrzeugverfolgung auf der Forchstrasse nachts	94
Abb. 112 Fahrzeugverfolgung am Knoten 111 frühmorgens	95
Abb. 113 Ausschnitt des Knotens BS_145.....	95
Abb. 114 Erkennung von Gegenverkehr am Knoten BS_145.....	96
Abb. 115 Detektoren der Westzufahrt von BS_145	97
Abb. 116 Verfolgung von Velos und Autos am Knoten BS_145	97
Abb. 117 Verfolgung von Velos und Autos (2) am Knoten BS_145.....	98
Abb. 118 Geradeaus- und Abbiegeverkehr von Osten am Knoten 111, abends.....	99
Abb. 119 Gegenseitiges Übersprechen von Fahrzeugen	99
Abb. 120 Verteilung des Zeitbedarfs in der Zufahrt von Osten (ZUCH_10)	100
Abb. 121 Anfahrverhalten in der Zufahrt von Osten (ZUCH_10)	100
Abb. 122 Verteilung des Zeitbedarfs in der Zufahrt von Süden (ZUCH_10).....	101
Abb. 123 Anfahrverhalten in der Zufahrt von Süden (ZUCH_10)	101
Abb. 124 Abstand zwischen zwei anfahrenden Fahrzeugen im Zürich der 90er-Jahre.	101
Abb. 125 Beispiel einer Zufahrt («Frankfurt 1228 Nord»)	110
Abb. 126 Signalplanmitschnitt der Zufahrt «Frankfurt 1228 Nord»	110
Abb. 127 Signalplanmitschnitt der Zufahrt «1228 Nord», nachts.....	110
Abb. 128 Beispiel einer Zufahrt («1201 Nord»).....	111
Abb. 129 Signalplanmitschnitt der Zufahrt «1201 Nord»	111
Abb. 130 Signalplanmitschnitt der Zufahrt «1201 Nord» (etwas später)	111
Abb. 131 Bruttozeitlücken der Haltelinien-nahen Detektoren am Knoten 032 (E)	113
Abb. 132 Direkte und korrigierte Zählwerte von Detektoren am Knoten 032 (E).....	113
Abb. 133 Stundenwerte und Differenz von Detektoren am Knoten 032 (E)	114
Abb. 134 Fehler bezüglich dem Mittelwert am Knoten 032 (E).....	114
Tab. 135 Matrix der Phänomene	117
Abb. 136 Knotenabfolge mit Satellitenbild in Zollikon	118
Abb. 137 Luftbild und Detektorschema für Knoten 110	119
Abb. 138 Luftbild und Detektorschema für Knoten 032	119
Abb. 139 Luftbild und Detektorschema für Knoten 141	120
Abb. 140 Luftbild und Detektorschema für Knoten 111	120
Abb. 141 Luftbild für Knoten ZUCH_10.....	121
Abb. 142 Detektorschema für Knoten ZUCH_10 (westliche, linke Seite)	121
Abb. 143 Detektorschema für Knoten ZUCH_10 (östliche, rechte Seite)	122
Abb. 144 Luftbild für Knoten SOLO_16.....	122
Abb. 145 Detektorschema für Knoten SOLO_16	122
Abb. 146 Einfachdetektion von Gegenverkehr am Knoten 032	123
Abb. 147 Einfachdetektion von Gegenverkehr durch Abbiegen am Knoten 110.....	123
Abb. 148 Mehrfachdetektion von Gegenverkehr am Knoten 032	124
Abb. 149 Mehrfachdetektion von Gegenverkehr durch Abbiegen am Knoten 110.....	124
Abb. 150 Übersprechen eines Busses auf die Nebenfahrbahn am Knoten 032.....	125
Abb. 151 Übersprechen am Ende auf die Nebenfahrbahn am Knoten 032.....	125
Abb. 152 Ausholen eines Autos beim Abbiegen von Spur 141.17.....	126

Abb. 153	Ausholen von Bus und Lieferwagen beim Abbiegen von Spur 141.17	126
Abb. 154	Übersprechen eines Autos auf die Nebenfahrbahn am Knoten 032	126
Abb. 155	Detektion eines Velos auf der Spur 032.11	127
Abb. 156	Detektion eines Velos auf der Spur 032.17	128
Abb. 157	Detektion von Velo und Auto auf Spur 032.17	128
Abb. 158	Velo und schnelleres Motorfahrzeug in Zufahrt SOLO_16 1 bei wenig Verkehr	129
Abb. 159	Velo und Autos in Zufahrt SOLO_16 1 (1).....	130
Abb. 160	Velo und Autos in Zufahrt 1 (2).....	130
Abb. 161	Velo wird auf Spur 111.12 nach der Haltelinie überholt	131
Abb. 162	Überholendes Fahrzeug fährt zu weit links auf Spur 111.12.....	132
Abb. 163	Velo auf Trottoir neben Spur 032.15	132
Abb. 164	Velo auf Fussgängerstreifen vor Spur 141.21	133
Abb. 165	Velo bei Rot auf Abwegen zwischen Spur 141.11 und 15	133
Abb. 166	Detektion von Velo, Auto und noch einem Velo für Spur 032.17	134
Abb. 167	Velo an der falschen Haltelinie für Spur 032.12	134
Abb. 168	Detektion eines Motorrads auf Spur 032.12	135
Abb. 169	Detektion eines Motorrads auf Spur 032.16	135
Abb. 170	Detektion eines Velos auf Spur 032.16	135
Abb. 171	Doppeltes Ansprechen an der Haltelinie von der Spur 032.17	136
Abb. 172	Schwingendes Ansprechen an der Haltelinie der Spur 032.17	137
Abb. 173	Schwingendes Ansprechen mit Löschen an der Haltelinie der Spur 032.11	137
Abb. 174	Schwingender Impuls auf Spur 141.12.....	138
Abb. 175	Schwingen von Z4.3 bei Dauerbelegung.....	138
Abb. 176	Prellen des Verlängerungsdetektors D11.2 (ZUCH_10 West)	139
Abb. 177	Mehrere Abfälle der Spur 141.16.....	140
Abb. 178	Mehrere Abfälle der Spur 111.12.....	140
Abb. 179	Einzelner Abfall der Spur 141.17	140
Abb. 180	Phantom-Ansprechen mit Löschen an der Haltelinie der Spur 032.17	141
Abb. 181	Phantom-Impuls an der Haltelinie der Spur 141.12.....	142
Abb. 182	Vergessenes Ansprechen der Spur 141.12.....	142
Abb. 183	Unvollständig erkanntes Fahrzeug auf Spur 141.17	143
Abb. 184	Systematische Spurwechsel auf Spur 032.16	143
Abb. 185	Spontaner Spurwechsel an der Haltelinie von Spur 032.17	144
Abb. 186	Spontaner Spurwechsel an der Haltelinie von Spur 032.17	144
Abb. 187	Motorrad überholt auf Spur 111.12 nach der Haltelinie.....	145
Abb. 188	Motorrad überholt auf Spur 111.12 vor der Haltelinie.....	146
Abb. 189	Zwei Motorräder überholen auf Spur 111.12 vor der Haltelinie.....	146
Abb. 190	Motorrad stellt sich bei Rot an die Spitze der Spur 111.12	147
Abb. 191	Bus hält auf Spur 110.15	148
Abb. 192	Bus hält auf Spur 110.15 mit zugehörigen ÖV-Detektoren	148
Abb. 193	Rotfahrende Velos auf Spur 141.12	149
Abb. 194	Rotfahrendes Auto auf Spur 110.11	149
Abb. 195	Motorrad als Lücke auf Verlängerungsdetektor von Spur 141.12	150
Abb. 196	Ambulanz auf Spur 110.12	150
Abb. 197	Einbiegen auf Spur 032.17	151
Abb. 198	Ausbiegen von Spur 032.11	151
Abb. 199	Abbiegender Verkehr über Verlängerungsdetektor 141.DR21.2.....	152
Abb. 200	SUV mit Anhänger auf Spur 032.11	153
Abb. 201	Zwei Kleinlastwagen mit Anhänger auf Spur 032.11.....	153
Abb. 202	Lieferwagen mit Anhänger und Lastwagen auf Spur 032.12	153
Abb. 203	Lastwagen auf Spur 032.12.....	154

Abb. 204	Sattelschlepper auf Spur 032.12.....	154
Abb. 205	Zwei eng aufschliessende Fahrzeuge auf Spur 032.12.....	154
Abb. 206	Fahrzeuge auf Spur 110.12	155
Abb. 207	Fahrzeuge auf Spur 110.12	155
Abb. 208	Langer Lastwagen auf Spur 110.12.....	156
Abb. 209	Lastwagen auf Spur 110.12	156
Abb. 210	2 Fahrende Motorräder und Roller auf Spur 110.12.....	156
Abb. 211	2 Fahrendes Velo auf Spur 110.12	156
Abb. 212	Verschiedene Typen von Fahrzeugen auf Spur 141.12	157
Abb. 213	Verschiedene Typen von Fahrzeugen auf Spur 141.11	157
Abb. 214	Roller und Anhängerzüge in der Zufahrt von Westen.....	158
Abb. 215	RL13 in der Zufahrt von Norden detektiert Zugfahrzeuge	158
Abb. 216	Fahrerkabine auf Verlängerungs-Videodetektor in Zufahrt von Osten	159
Abb. 217	Dreifaches Echo eines Sattelschleppers auf Schleifendetektor	159
Abb. 218	Detektion von Anhängern	159
Abb. 219	Eine abgeschlossene Gruppe von gezählten Fahrzeugen	160
Abb. 220	Fahrzeugverfolgung in Zufahrt 141.12, 6.5.2020 07:10:30 bis 07:13:30	161
Abb. 221	Fahrzeugverfolgung in Zufahrt 141.12, 6.5.2020 07:13:10 bis 07:16:10	162
Abb. 222	Eilige Fahrzeuge um 07:15:00 und 07:15:25 an Knoten 141	162
Abb. 223	Geschwindigkeiten der eiligen Fahrzeuge um 07:15:00 und 07:15:25.....	162
Abb. 224	Fahrzeugverfolgung in Zufahrt 141.12, 6.5.2020 07:16:00 bis 07:17:00	163
Abb. 225	Fahrzeugverfolgung in Zufahrt 141.12, 6.5.2020 07:18:50 bis 07:22:00	164
Tab. 226	Zählwerte in Zufahrt 141.12.....	164
Tab. 227	Korrigierte Zählwerte in Zufahrt 141.12	165
Tab. 228	Verbleibende Zählfehler in Zufahrt 141.12	165
Abb. 229	Detektorschema für Störungen durch die Forchbahn am Knoten 110	166
Abb. 230	Störungen durch stadtauswärts fahrende Forchbahn am Knoten 110 (W)	166
Abb. 231	Störungen durch stadtauswärts fahrende Forchbahn am Knoten 110 (E)	167
Abb. 232	Detektorschema für Störungen durch die Forchbahn am Knoten 032	167
Abb. 233	Störungen durch stadtauswärts fahrende Forchbahn am Knoten 032 (W)	167
Abb. 234	Störungen durch stadteinwärts fahrende Forchbahn am Knoten 032 (E)	168
Abb. 235	Störungen durch stadtauswärts fahrende Forchbahn am Knoten 032 (E)	168
Abb. 236	Detektorschema für Störungen durch die Forchbahn am Knoten 141	168
Abb. 237	Störungen durch stadtauswärts fahrende Forchbahn am Knoten 141 (E)	169
Abb. 238	Störungen durch stadteinwärts fahrende Forchbahn am Knoten 141 (E)	169
Abb. 239	Störungen durch stadtauswärts fahrende Forchbahn am Knoten 141 (E)	169
Abb. 240	Nicht erklärbare Impulse von Detektor 110.DR15.1	170
Abb. 241	Störimpulse von Detektor 141.DR12.1	171

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 25.05.2021

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2019/126

Projekttitel: Verkehrsdatenerfassung über Sensoren von LSA

Enddatum: 31.07.2021

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Die Forschung hat untersucht, wie gut man mit LSA-Detektoren Fahrzeuge zählen kann, also mit Detektoren, die für die verkehrsabhängige Regelung von Knotenpunkten installiert worden sind und nicht mit der Absicht, Fahrzeuge zu zählen. Die Messungen der Detektoren liegen als Rohdaten vor, flanken-genau alle Zehntelsekunden. Meist sind die Detektoren Induktionsschleifen, selten Videodetektoren. Die Forschung konzentriert sich auf Motorfahrzeuge. Am Rand wird auch versucht Motorräder und Velos zu erkennen, sowie Lastwagen von Personenkraftwagen zu unterscheiden.

Solche Detektoren können durchaus recht genau zum Zählen geeignet sein und dürfen für Verkehrszählungen verwendet werden. Es müssen aber gewisse Voraussetzungen erfüllt sein. Der Bericht entwickelt darum Leitlinien

- zur Auswahl der Detektoren,
- zur Überwachung der Genauigkeit der Messungen und
- zur Vorverarbeitung der Messungen zur Erhöhung der Zählgenauigkeit.

Damit kann eine Zählgenauigkeit mit Fehlern von unter 1 % erreicht werden.

Weiter geht der Bericht der Frage nach, welche weiteren nützlichen Grössen aus qualitätsgesicherten Detektordaten errechnet werden können.

Zählen: Mit welchen LSA-Detektoren kann man mit welcher Zählgenauigkeit zählen und wie erreicht man die bestmögliche Zählgenauigkeit?

Genauigkeit: Wie kann man die Fehler eines Detektors entdecken und quantifizieren? Und wie kann man sie korrigieren, nur durch die Beobachtung im System selbst?

Unabhängigkeit: Die Erkenntnisse sind weitestgehend unabhängig von der Detektionstechnologie. Sie spielt auch keine Rolle für eine eventuelle Vorverarbeitung der Messdaten.

Zusatznutzen: Qualitätsgesicherte Detektor-Messungen haben einen hohen Zusatznutzen zur Bestimmung und Überwachung von Modellparametern, beispielsweise des Zeitbedarfs, des Fahrverhaltens oder von Quell-Ziel-Beziehungen, aber auch zur Ermittlung regelungstechnisch relevanter Grössen wie Staulängen und Verlustzeiten.

Statistische Anforderungen: Für eine landesweite Statistik oder auch den internationalen Vergleich müssen die Zählwerte – und allgemein alle Messwerte – den folgenden drei Kriterien genügen:

- Vergleichbarkeit: Die Messungen müssen untereinander vergleichbar sein.
- Kontinuität: Die Messungen müssen über die Zeit miteinander vergleichbar sein.
- Qualität: Die Messungen müssen bezifferbaren Qualitätsanforderungen genügen.

Die Forschungsarbeit beschreibt das Vorgehen, um diese Anforderungen sicherzustellen.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Folgende Ziele gemäss Projektbeschrieb sind erreicht worden:

- Berechnung von Zählwerten mit Konfidenzwerten
- Formalisierung der Doppelschleife "ad hoc" um die Haltelinie herum
- Mit induktiven Schleifen oder optischen Sensoren können kurz vor oder kurz nach der Haltelinie Zähl-Fehlerraten von unter 3% ohne Vorverarbeitung und von unter 1% mit Vorverarbeitung des Detektorsignals erreicht werden.
- Dank qualitätsgesicherter Detektorsignale können Verkehrszustände auf Einzel- und Doppelschleifen errechnet werden, was zu statistischen Angaben über Stautunden und auch zu diskretisierten Staulängen führt. Es können auch Reisezeiten geschätzt werden. Auch der Zeitbedarfswert kann quasi online ermittelt werden.

Folgende Ziele sind nur teilweise erreichbar gewesen:

- Ermittlung von Fahrzeugklassen: bedingt durch die Detektionstechnologie können nur einfache Unterscheidungen gemacht werden wie "langes Fahrzeug" (Lastwagen) oder "kurzes Fahrzeug" (Personenwagen) oder Velo, Motorrad.
- In Ermangelung anderer eingesetzter Technologien sind nur Detektoren auf induktiver und optischer Basis untersucht worden.

Folgerungen und Empfehlungen:

Mit den meisten LSA-Detektoren darf gezählt werden. Es braucht ein systematisches Vorgehen für die Auswahl der Detektoren und die Überwachung ihrer Zählgenauigkeit.

Zur Steigerung der Zählgenauigkeit wird eine Vorverarbeitung der rohen gemessenen Flankensignale empfohlen.

Auf diese Art qualitätsgesicherte Detektor-Messdaten können zusätzlich zur Berechnung weiterer interessanter Grössen verwendet werden, wie Zeitbedarfswert, Reisezeiten, Staulängen.

Es wird empfohlen, die Erkenntnisse möglichst rasch in der Praxis zu validieren, in erster Priorität anhand der Zählwerte, in zweiter anhand zusätzlicher Grössen. Es wird auch empfohlen, solche "nützliche zusätzliche Grössen" weiter zu formalisieren und in Planung und Qualitätsüberwachung zu verankern und sie Planern und Betreibern in standardisierter Form zur Verfügung zu stellen.

Zur Erleichterung des Einstiegs für Nicht-Projektteilnehmer wird die Erstellung einer "Schweizer Guideline" vorgeschlagen.

Publikationen:

- keine
- geplant: "Schweizer Guideline"

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Fischer

Vorname: Jan

Amt, Firma, Institut: Marty + Partner Ingenieurbüro AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Forschungsstelle konnte im Rahmen des Forschungsprojekts die Qualität von an Lichtsignalanlagen erfassten Daten konsequent und systematisch definieren, aufzeigen dass die Qualität jeder Anlage individuell ist und ein Vorgehen zur Bestimmung dieser individuellen Qualität vorgeben.

Im weiteren wurde als Grundlage für die gewonnenen Erkenntnisse und Schlussfolgerungen eine Vielzahl von Phänomenen erkannt, beschrieben und erklärt.

Dadurch wird der Forschungsbericht ein Grundlagendokument, um die Verkehrsdaten von LSA als gerechtfertigte, qualitativ brauchbare, zusätzliche Datenquelle zu nutzen und einzusetzen.

Umsetzung:

Das Kapitel "Empfehlung für die Umsetzung in die Praxis" beschreibt im Detail, wie die Resultate umgesetzt werden können. Dadurch wird allen Strassenverantwortlichen ein wichtiges Werkzeug in die Hand gegeben, um diese Umsetzung einheitlich durchzuführen und damit das Optimum aus den an LSA's gewonnenen Rohdaten zu bekommen.

weitergehender Forschungsbedarf:

Diverse potentielle weitere Forschungsprojekte auf der Basis qualitätsgesicherter Detektorflanken wurden als resultierender Forschungsbedarf vorgeschlagen, insbesondere:

- Auswertung des anfahren Verkehrs zur Ermittlung des (zeitvarianten) Zeitbedarfswertes, leistungsbestimmend besonders für den kritischen Knoten
- Berechnung von Staulänge und Reisezeit in Zufahrten und insbesondere der immissionsrelevanten Anzahl Halte
- und als Erweiterung davon Beobachtung von (vermeidbaren) Koordinationsbrüchen zwischen Knoten

Einfluss auf Normenwerk:

Eine SN für die "Empfehlung für die Umsetzung in die Praxis" zu definieren ist nicht gerechtfertigt. Wir prüfen die Freigabe als "Schweizer Guideline". Die Empfehlung wird damit stärker formalisiert und ein offizieller Leitfaden. Darin wird das Wesentliche aus dem Forschungsbericht extrahiert, veröffentlicht und somit besser verfügbar gemacht. Dadurch wird die Gefahr entschärft, dass die Empfehlung am Ende des Forschungsberichts verloren und vergessen geht.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Amstad

Vorname: Kurt

Amt, Firma, Institut: Tiefbauamt Kanton Zürich

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: