

**ÜBERPRÜFUNG UND VERBESSERUNG DER
QUALITÄT VON AUTOMATISCH ERHOBENEN
DATEN AN LICHTSIGNALANLAGEN**

**Von der Fakultät für
Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Universität Hannover
zur Erlangung des Grades einer Doktorin der
Ingenieurwissenschaften
Dr.-Ing.
genehmigte Dissertation**

**von
Dipl.-Ing. Nicola Lehnhoff
geboren am 11.01.1974, in Hameln**

2005

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Friedrich, Uni Hannover

Koreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Boltze, TU Darmstadt

Tag der Promotion: 22. April 2005

Kurzfassung

Die Qualität der grundlegenden Daten ist von besonderer Wichtigkeit für die Qualität moderner Verkehrssteuerungs- und Managementsysteme. Um die Datengrundlage zu erweitern, ist es sehr interessant, Daten bereits bestehender Systeme in die für weitergehende Zwecke zu nutzen. Insbesondere verkehrsabhängig gesteuerte Lichtsignalanlagen bieten hier vielfältige Möglichkeiten, da die zugehörigen Detektoren, Informationen über die Verkehrsstärke auf jedem Fahrstreifen sammeln und somit eine nahezu flächendeckende Erfassung von Verkehrsstärken realisiert ist. Sind die Lichtsignalanlagen über einen Verkehrsrechner miteinander verbunden, ist es relativ einfach, Zugang zu den Daten zu erhalten.

Hauptsächlich auf Grund finanzieller Randbedingungen, ist es nicht möglich, eine flächendeckende Qualitätskontrolle zu realisieren. Weiterhin bestehen nur sehr geringe Kenntnisse zu der Qualität der so erhobenen Daten. Aus diesem Grund wurden empirische Untersuchungen durchgeführt, bei denen die relevanten Ströme mittels der Videotechnik beobachtet wurden. Anhand des Abgleichs der so erhaltenen tatsächlichen Verkehrsstärken mit den detektierten und in Signalprogrammprotokollen festgehaltenen Werten, kann eine Beurteilung der Datenqualität vorgenommen werden.

Die Ergebnisse lassen sich zusammenfassend so beschreiben, dass in etwa ein Drittel der Detektoren mit einer sehr hohen Genauigkeit von mehr als 90 % arbeitet, es aber auch einen fast genauso großen Anteil gibt, der mit einer Genauigkeit von unter 40 % zählt. Diese Werte beruhen auf dem Zusammenspiel von vier verschiedenen Fehlertypen, die jeweils zeitlich begrenzt oder während der gesamten Untersuchungsdauer auftraten. Am bedeutsamsten für die Genauigkeit der Daten an innerstädtischen Knotenpunkten scheint die Erfassung von Fahrzeugen auf den Nachbarfahrstreifen und die nur teilweise Erfassung der Fahrzeuge des betrachteten Stroms zu sein. Diese Fehler treten in fast allen Beispielen in unterschiedlicher Stärke auf. Dabei gilt der Grundsatz, dass höher belastete Detektoren tendenziell auch mit einer höheren Genauigkeit zählen als niedrig belastete Detektoren.

Für die Überprüfung und Verbesserung der Daten wurde ein neues Verfahren entwickelt, welches speziell auf die Randbedingungen an innerstädtischen lichtsignalisierten Knotenpunkten abgestimmt ist. Dieses Verfahren beruht ausschließlich auf den an einem einzelnen Knotenpunkt erhobenen Daten. Es handelt sich also um ein sehr handliches Verfahren, welches mit einem nicht allzu großen Aufwand umzusetzen ist.

Grundlegende Idee des Verfahrens ist die Fusion verschiedener Informationen. Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen der Verkehrsstärke an einer verkehrabhängig geschalteten Lichtsignalanlage und deren Schaltzuständen, ist es möglich, für jedes Aggregationsintervall die mögliche Verkehrsstärke des einem Detektor zugeordneten Stroms einzugrenzen.

Insbesondere die Erfassung benachbarter Verkehrsströme sowie die Folgen von Ausfällen des Detektors, bei denen keine Fehlermeldung, sondern der Wert Null übermittelt wird, können durch das Verbesserungsverfahren deutlich verringert werden. In vielen Fällen sind diese Fehler bedeutende Fehlerquellen, so dass insgesamt vor allem eine Verbesserung der besonders schlecht beurteilten Datenreihen erzielt werden kann.

Die Auswirkungen der fehlerhaften Detektion werden anschließend anhand zweier Beispiele untersucht. Zum einen erfolgt die genaue Analyse der Auswirkungen auf die Lichtsignalsteuerung als bedeutendstes Beispiel für die online-Nutzung der Daten und zum anderen werden die Auswirkungen auf die offline-Anwendung der Schätzung von Herkunft-/Zielbeziehungen und auf die daraus resultierende Verteilung des Verkehrs im Netz betrachtet.

Hinsichtlich der Lichtsignalsteuerung zeigt sich, dass insbesondere Steuerungen, die ohne eine feste Umlaufzeit arbeiten, anfällig auf Fehldetektionen reagieren. Bereits bei Fehldetektionen von 25 % zeigen sich bei Bemessungsdetektoren in Abhängigkeit von deren Lage signifikante Änderungen in der Qualität des Verkehrsablaufs. Ist der Steuerung eine feste Umlaufzeit hinterlegt, verlängert sich die durchschnittliche Verlustzeit einzelner Ströme auch durch besonders extreme Fehlmessungen um nicht mehr als 10 %.

Die Schätzung der Herkunft-/Zielbeziehungen wird in sehr viel stärkerem Maß von einer schlechten Detektionsqualität beeinflusst. Es zeigt sich, dass die Qualität der geschätzten Matrix wesentlich schlechter ist, wenn nicht qualitätsgeprüfte Verkehrsstärken in die Betrachtung integriert werden, als wenn die Schätzung nur auf den bekannten Quell- und Zielverkehrsstärken beruht. Durch die Verwendung des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens zur Datenverbesserung kann eine Verbesserung der Qualität der Schätzung der Herkunft-/Zielbeziehungen und damit auch der auf diesen Daten basierenden weiteren Anwendungen vorgenommen werden.

Abstract

The quality of the basic data is of fundamental importance to the quality of modern traffic control and traffic management systems. In order to widen the data basis, it is very interesting to integrate data of already existing systems. Traffic actuated signal systems as part of modern traffic control and management systems provide good data sources because they use loop detectors that collect information about the traffic volume on each lane. Using the supervising traffic control computer of the traffic signal system, it is easy to get access to the data.

Mainly because of financial restrictions, it is not possible to implement an area wide quality control of this data and the knowledge about the data's quality is very low. Because of this, some empirical research has taken place, in which the single streams are video surveyed and compared to the automatically detected data.

The absolute number of measured vehicles at all detectors shows that one third of the detectors works with a very high accuracy of more than 90 %. On the other hand, there is nearly the same amount of detectors that work with an irregularity of more than 60 % according to the measured data. Four different types of errors which are responsible for this inaccuracy are explored. First, there are several detectors counting not only the relevant stream but also the neighbouring ones. Secondly, these vehicles can be public transport vehicles and are not only counted as one but for several vehicles. Thirdly, most detectors do not count all of the passing vehicles. Fourthly, there are very few examples in which non-existing vehicles, so called phantom vehicles are counted in addition.

Based on this lack of quality, an approach for improving the quality of the data is developed. This approach is confining itself to data collected at the same traffic signal system. It is not necessary to integrate data of neighbouring intersections or historical data of the analysed intersection. The fundamental idea for the improvement of the data for further use is the fusion of different information. Because of the interdependency of the traffic volume and the signal state, it is possible to border the possible traffic volume of each traffic stream.

Altogether, the procedure is very simple to implement at all kinds of fully traffic-actuated intersections and a significant improvement of the data quality can be achieved. Especially by analysing the classes with a very low accuracy it is easy to see that using the approach for improving the data can reduce the number of detectors belonging to these classes.

The impact of faulty data is examined in two case studies. On the one hand, a detailed analysis of the impact on signal control as an important example for the online purposes takes place. On

the other hand, the impact on offline purposes on the estimation of origin destination matrices and the resulting distribution of the traffic in the whole network is analysed.

Regarding the signal control it is proven that especially control strategies which work without a fixed cycle time react susceptibly to faulty measurements. Already 25 % of faulty measurements cause significant changes in the quality of the traffic flow. If the control strategy is based on a fixed cycle time, the average extension of the loss time does not exceed more than 10 % even if the faulty measurements are extreme.

The estimation of the origin destination matrices is influenced much stronger by a low detection quality. It can be shown that the quality of the estimated matrix is even worse by using non quality-proofed data than by using only the originating and terminating traffic. By using the newly developed approach for improving the automatically detected data an improvement of the quality of the origin destination estimation can be achieved.

Schlagworte

Verkehrsmanagement, Lichtsignalanlagen, Datenfusion

Key words

Traffic management, traffic control, data fusion techniques

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Methodik.....	2
2 Stand der Technik.....	5
2.1 Induktivschleifendetektoren.....	5
2.2 Anwendungsfälle	7
2.3 Beschreibung der Datenqualität.....	8
2.4 Verfahren zur Datenüberprüfung und -verbesserung	9
2.4.1 Vorgehen entsprechend des Richtlinienwerks	9
2.4.2 Vorgehen entsprechend weiterer Verfahren aus der Forschung	13
2.5 Ergebnisse bestehender Untersuchungen zur Datenqualität.....	16
2.6 Auswirkungen von Fehlern auf die Anwendungen.....	18
2.7 Fazit	19
3 Datenerfassung und -aufbereitung	21
3.1 Technische Beschreibung der Erfassungseinrichtungen	21
3.2 Datenaufbereitung.....	22
3.3 Statistik.....	24
4 Analyse der Datenqualität.....	27
4.1 Vorgehen.....	27
4.2 Definition von Qualitätskriterien	27
4.2.1 Zugänglichkeit.....	28
4.2.2 Aktualität	28

4.2.3	Zuverlässigkeit.....	28
4.2.4	Vollständigkeit	29
4.2.5	Genauigkeit	29
4.3	Beurteilung der Datenqualität	30
4.3.1	Beurteilung der Zugänglichkeit	30
4.3.2	Beurteilung der Aktualität.....	30
4.3.3	Beurteilung der Zuverlässigkeit	30
4.3.4	Beurteilung der Vollständigkeit	31
4.3.5	Beurteilung der Genauigkeit	32
5	Möglichkeiten der Datenüberprüfung und -verbesserung für die offline-Nutzung.....	47
5.1	Vorgehen	47
5.2	Anwendungsmöglichkeiten verschiedener Verfahren.....	47
5.2.1	Verfahren nach MARZ.....	47
5.2.2	Fundamentaldiagramm.....	48
5.2.3	Ganglinienanalyse	48
5.2.4	Längs- und Quervergleich	51
5.3	Entwicklung eines neuen Verfahrens für die Datenüberprüfung und -verbesserung.....	55
5.3.1	Einführung	55
5.3.2	Grundlegende Idee und benötigte Daten.....	55
5.3.3	Verfahrensbeschreibung	57
5.3.4	Kalibrierung und Validierung.....	66
5.3.5	Anwendung des Verfahrens	66
5.3.6	Offene Probleme	71
5.4	Fazit	72
6	Auswirkung auf die Signalsteuerung	75
6.1	Aufbau der Untersuchung	75
6.2	Implementierung der Detektorstörungen	76
6.3	Analyse der real existierenden Fehler	77
6.4	Systematische Analyse relevanter Parameter	79
6.4.1	Größe des auftretenden Fehlers.....	79
6.4.2	Verkehrsstärkeverhältnis	81
6.4.3	Detektorlage	82
6.5	Empfehlungen für die Verringerung der Auswirkungen auf die Signalsteuerung	83
6.6	Festlegung eines Qualitätsmaßstabs für die Genauigkeit der Daten für die Signalsteuerung	84

6.7 Fazit	85
7 Auswirkung auf die netzweite Analyse.....	87
7.1 Aufbau der Untersuchung	87
7.2 Implementierung der Detektorstörungen.....	90
7.3 Analyse der Auswirkungen auf die Schätzung von Herkunft-/Zielbeziehungen	91
7.4 Analyse der Auswirkungen auf die Umlegung	93
7.5 Festlegung eines Qualitätsmaßstabs für die Genauigkeit der Daten für die Schätzung von Herkunft-/Ziel-Beziehungen.....	94
7.6 Fazit	94
8 Zusammenfassung und Ausblick	95
Literatur.....	99
Abbildungsverzeichnis	105
Tabellenverzeichnis	109

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Verkehrsstärken, die mit Hilfe von Detektoren innerstädtischer Lichtsignalanlagen erhoben werden, dienen zunehmend nicht mehr nur für die Steuerung der Lichtsignalanlagen sondern werden auch für weitergehende Zwecke genutzt. Dazu gehören praktisch alle Bestandteile moderner Verkehrsmanagementsysteme. Dies hat insbesondere für die Betreiber dieser Systeme den Vorteil, dass sehr viel Geld für die Einrichtung der notwendigen Infrastruktur in Form von Erfassungseinrichtungen gespart werden kann, da mittlerweile in vielen Städten die Lichtsignalanlagen zumindest entlang des Hauptverkehrsstraßennetzes verkehrsabhängig gesteuert sind und somit eine nahezu flächendeckende Erfassung von Verkehrsstärken realisiert ist. Prinzipiell wird davon ausgegangen, dass die an den Lichtsignalanlagen gewonnenen Daten zuverlässig und genau sind, da es sich um Schleifen handelt, die für den Dauerbetrieb eingebaut sind, und die bei auftretenden Störungen entweder eine Fehlermeldung liefern müssten oder die Steuerung der Lichtsignalanlage negativ beeinflussen würden.

Es gibt jedoch verschiedene Probleme, die daraus resultieren, dass nicht bekannt ist, ob und in welchem Maß sich fehlerhafte Daten auf die Lichtsignalsteuerung auswirken. Es kann also auch bei einer gut funktionierenden Lichtsignalanlage nicht zweifelsfrei davon ausgegangen werden, dass die erhobenen Daten fehlerfrei sind. Genauso wie Fehlfunktionen der Signalsteuerung entweder auf Fehler in der Logik oder auf Fehler in den grundlegenden Daten zurückzuführen sind, kann auch die einwandfreie Funktion der Lichtsignalanlage entweder in guten Daten oder in einer wenig fehleranfälligen Logik begründet sein. Sowohl zu der Qualität von Detektoren an Lichtsignalanlagen als auch zu letzterem Aspekt existieren nur wenige Untersuchungen. Dies liegt daran, dass für die Eruierung systematischer Fehler, die entweder über einen gewissen Zeitraum oder über eine gewisse Strecke auftreten, der Vergleich mit realen Daten unabdingbar erscheint und daher ein nicht unerheblicher Erhebungsaufwand zu realisieren ist. Aufgrund finanzieller und personeller Randbedingungen ist es nur in Einzelfällen möglich, diese Qualitätskontrollen durchzuführen.

Weiterhin ist davon auszugehen, dass es für unterschiedliche Anwendungen auch unterschiedliche Anforderungen an die Qualität der Daten gibt. Im Zusammenspiel mit der Tatsache, dass der Betreiber der Lichtsignalanlagen nicht unbedingt identisch mit dem Betreiber weiterführender Verkehrsmanagementsysteme ist, führt dies dazu, dass der Betreiber der Lichtsignalanla-

gen wenig Interesse an der Organisation und der Finanzierung von Qualitätsmanagement- und Instandhaltungsmaßnahmen hat, die für die optimale Funktion der Lichtsignalsteuerung von keiner bzw. von untergeordneter Bedeutung sind.

Basierend auf einer detaillierten Analyse der Qualität der in Hannover an innerstädtischen Lichtsignalanlagen automatisch erhobenen Verkehrsstärken, verfolgt diese Arbeit damit die folgenden Ziele:

- Abschätzung der Möglichkeiten der Datenüberprüfung und -verbesserung mit verschiedenen Verfahren,
- Entwicklung eines Verfahrens für die Verbesserung der Qualität von an Lichtsignalanlagen erhobenen Verkehrsdaten,
- Analyse der Auswirkungen fehlerhafter Daten auf die Qualität der Lichtsignalsteuerung und
- Analyse der Auswirkungen fehlerhafter Daten auf die Qualität der netzweiten Analyse als Beispiel für die offline-Verwendung der Daten.

1.2 Methodik

Das methodische Vorgehen der Arbeit ist in Bild 1.1 dargestellt. Wie dort ersichtlich ist, erfolgt zuerst die Beschäftigung mit dem Stand der Technik. In diesem Abschnitt werden sowohl grundlegende Informationen zu der Funktionsweise von Induktivschleifendetektoren gegeben als auch auf bekannte Probleme bei der Verwendung von Detektoren hingewiesen. Weiterhin werden die aus verschiedenen Richtlinien und aus der Forschung bekannten Verfahren für eine Überprüfung der Daten vorgestellt und es werden bestehende Untersuchungen bezüglich der Auswirkungen fehlerhafter Detektordaten vorgestellt.

Darauf folgend wird das Vorgehen bezüglich der Datenerfassung und -aufbereitung für die weitere Untersuchung detailliert beschrieben. Dazu gehört einerseits die Behandlung der Randbedingungen, die durch die Architektur des Verkehrsrechnersystems Hannover und durch die Formatierung der Daten für deren Speicherung vorgegeben sind und andererseits eine kurze Einführung in die statistischen Verfahren, die im weiteren Verlauf Anwendung finden.

Der Kern der Arbeit beginnt mit der Definition von Qualitätskriterien, um die Ausgangsdaten und die im weiteren Verlauf der Arbeit veränderten Datensätze systematisch beurteilen und vergleichen zu können. Sofern möglich, werden für diese Kriterien Maßstäbe festgelegt, anhand derer sie beurteilt werden sollen. In einigen Fällen ist dies jedoch erst nach weiteren Untersuchungen sinnvoll und erfolgt daher an späterer Stelle.

Die Grundlage für die gesamte Untersuchung bilden umfangreiche empirische Untersuchungen, die im Stadtgebiet von Hannover an 52 verschiedenen Detektoren durchgeführt wurden. Die Untersuchungsdauer erstreckte sich in den meisten Fällen über einen Zeitraum von 6 Uhr bis 19 Uhr. Parallel zu der automatischen Erfassung der Fahrzeuge mit Induktivschleifendetektoren wurde der Verkehrsablauf gefilmt. In der späteren Auswertung war damit ein direkter Vergleich der automatisch erhobenen und der tatsächlich vorhandenen Verkehrsstärke möglich.

Bei der Analyse der Daten wird auf die zuvor geschilderten Qualitätskriterien zurückgegriffen. Das Hauptaugenmerk der Analyse liegt dabei auf der Betrachtung der Genauigkeit. Es werden verschiedene Fehlertypen definiert und deren Häufigkeit betrachtet. Aus der Gesamtheit aller Untersuchungsstellen lassen sich Abhängigkeiten der Qualität der Daten von verschiedenen Merkmalen erkennen.

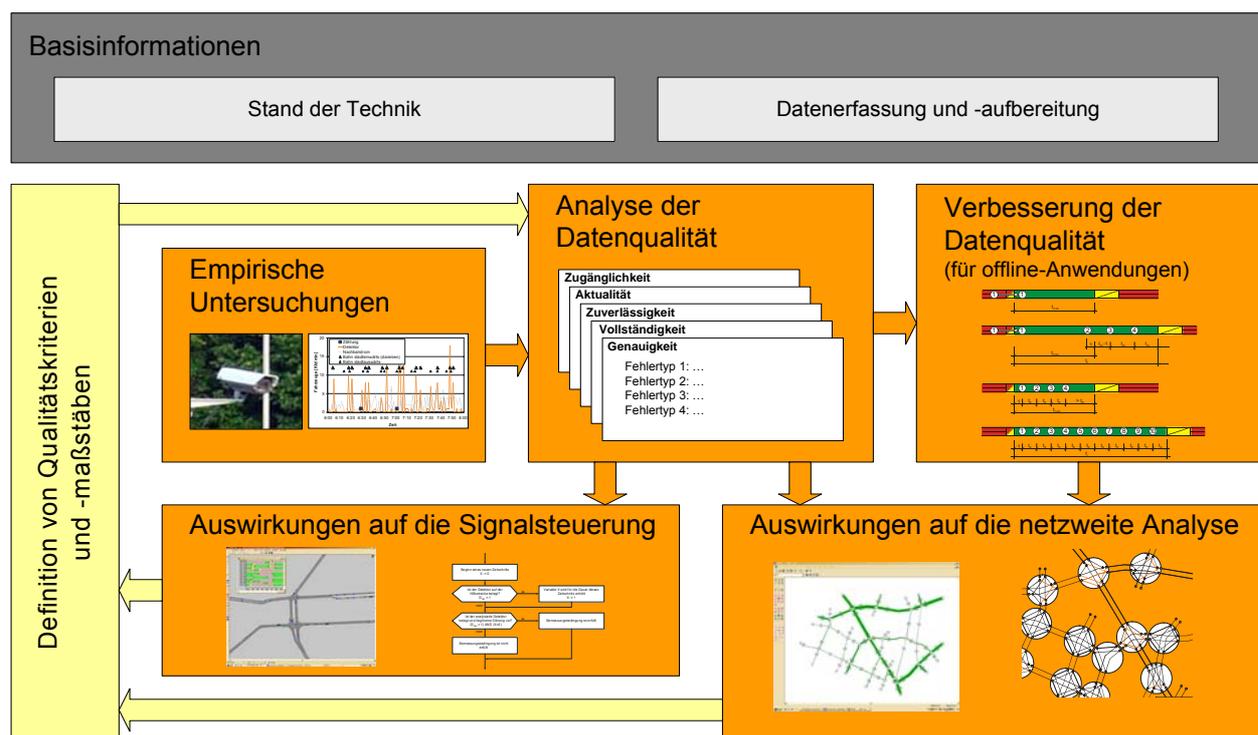


Bild 1.1: Methodisches Vorgehen

Anschließend werden verschiedene aus den Richtlinien und aus der Forschung bekannte Verfahren für die Überprüfung und Verbesserung der Datenreihen hinsichtlich ihres Potenzials für die hier untersuchte Fragestellung untersucht. Aufbauend auf den so getroffenen Erkenntnissen wird im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren entwickelt, mit dem die Qualität der an Lichtsignalanlagen gewonnenen Daten verbessert werden kann. Die Besonderheit an diesem Verfahren ist, dass keinerlei Daten benötigt werden, die über die grundlegenden Projektierungsdaten an einer einzelnen Lichtsignalanlage bzw. über die an dieser Lichtsignalanlage gemessenen Verkehrsstärken hinausgehen.

Anschließend werden die Auswirkungen fehlerhafter Messungen auf die Signalsteuerung als online-Anwendung und auf die netzweite Analyse des Verkehrsaufkommens als Beispiel für eine offline-Anwendung untersucht. Ersteres erfolgt mit Hilfe der mikroskopischen Simulationssoftware VISSIM. In verschiedenen Beispielknotenpunkten werden die Steuerungen so manipuliert, dass die Einspeisung fehlerhafter Detektordaten und damit dann die genaue Analyse der resultierenden Auswirkungen möglich ist. Für die Untersuchung der Auswirkungen sowohl der fehlerhaften Detektordaten als auch der mithilfe des zuvor geschilderten Verfahrens verbesserten Daten auf die Schätzung von Herkunft-/Zielbeziehungen wird zum einen auf die makroskopische Simulationssoftware VISUM und zum anderen auf ein am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau entwickeltes Programm zur Schätzung von Herkunft-/Zielbeziehungen zurückgegriffen. Am Beispiel eines realen Netzes werden Planfälle mit unterschiedlichen Randbedingungen hinsichtlich der Menge und der Qualität der Eingangsdaten nachgebildet und die Auswirkungen sowohl auf die so entstehende Matrix als auch auf die mit dieser Matrix erfolgte Umlegung untersucht. Mit den Erkenntnissen, die im Rahmen der Bearbeitung dieser beiden Arbeitsschritte gewonnen werden, ist es nun möglich, anwendungsspezifische Maßstäbe für die Beurteilung der Qualitätskriterien festzulegen.

2 Stand der Technik

2.1 Induktivschleifendetektoren

Trotz zahlreicher neuer Entwicklungen hinsichtlich der Detektorarten dominieren weiterhin sowohl bei bestehenden als auch bei neu zu errichtenden Systemen Induktivschleifendetektoren, da es sich um eine Technologie handelt, die sich vielfach bewährt hat und gegenüber anderen Erfassungsmethoden bedeutende Vorteile vorweisen kann, wie z. B. die sehr viel geringere Anfälligkeit gegenüber Witterungseinflüssen. Bemängelt wird jedoch, dass Reparatur- und Instandhaltungsarbeiten mit einem hohen organisatorischen und finanziellen Aufwand verbunden sind. Weiterhin wird vereinzelt das Problem gesehen, dass moderne Fahrzeuge einen immer geringeren Metallanteil haben, was zu einer schlechteren Detektion führt. [5][14][20]

Im Sinne des Merkblatts über Detektoren im Straßenverkehr [21] gehören Induktivschleifendetektoren entsprechend ihrer physikalischen Arbeitsweise zu den magnetischen Wechselfelddetektoren, die die metallischen Eigenschaften der Kraftfahrzeuge ausnutzen und aktiv auf die dadurch erzeugten Änderungen des Magnetfelds reagieren. Sie bestehen aus einer in der Fahrbahn verlegten Drahtschleife definierter Länge und Windungszahl, einer Auswerteschaltung und der zugehörigen Stromversorgung (vgl. Bild 2.1). Die Drahtschleife wird von einem Wechselstrom, der mit einer externen Stromversorgung mit Oszillator erzeugt wird, mit Frequenzen zwischen 20 kHz und 150 kHz durchflossen. Dadurch entsteht ein magnetisches Feld, das den Erfassungsbereich der Schleife repräsentiert. Bewegt sich ein Fahrzeug in diesem Bereich, erwirken dessen metallische Bauteile eine Änderung der Induktivität des Magnetfelds und des Verlustwiderstands der Schleife wie in Bild 2.2 dargestellt. Dieser auch als „Verstimmung“ bezeichnete Vorgang wird durch eine Auswerteschaltung des Detektors registriert und ausgewertet und die so gewonnenen Informationen werden weitergegeben.

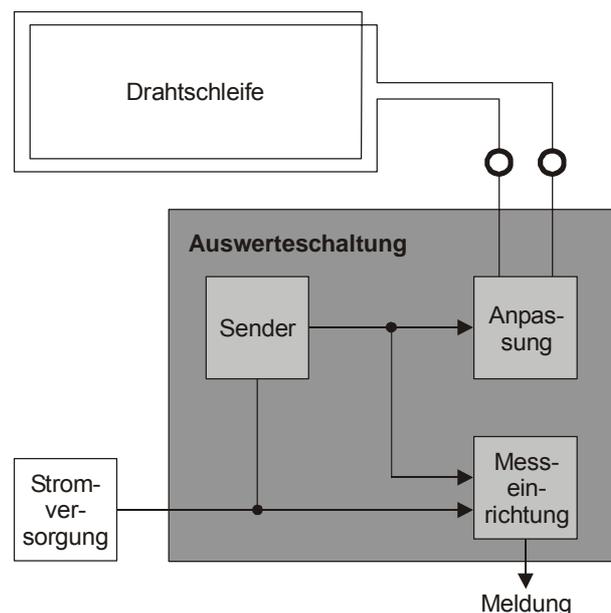


Bild 2.1: Aufbau eines Induktivschleifendetektors (nach [21])

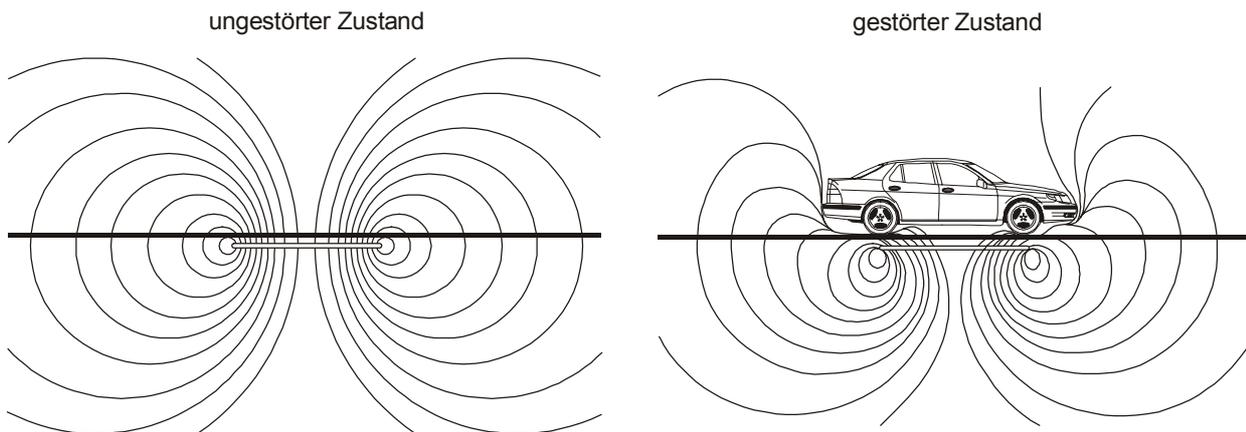


Bild 2.2: Funktionsweise von Induktivschleifendetektoren (nach [21])

Die Schleifeninduktivität bestimmt sich aus der Windungszahl und der Schleifengröße. Die Windungszahl beträgt in den meisten Fällen zwei bis fünf Windungen. Dabei steigt mit zunehmender Windungszahl die Ansprechempfindlichkeit der Schleife. Optimal ist eine Empfindlichkeit, die ein sicheres Erkennen aller den Detektor überfahrenden Fahrzeuge ermöglicht, ohne dass gleichzeitig Fahrzeuge auf den benachbarten Fahrstreifen miterfasst werden. Hinsichtlich der Schleifengröße hat sich herausgestellt, dass die größte und damit am zuverlässigsten zu detektierende Verstimmung erreicht wird, wenn die Schleife in etwa den Umrissen des Fahrzeugs entspricht.

Ein weiterer beim Einbau der Induktivschleifendetektoren zu beachtende Aspekt ist die Einbautiefe. Diese muss so groß sein, dass Sicherheit gegen oberflächennahe Beschädigungen und Abnutzungen der Fahrbahn gegeben ist, aber die Induktivität der Schleife an der Fahrbanoberfläche nicht zu stark abgemindert ist. In Asphaltfahrbahnen gelten 15 cm als unkritischer Wert. Bei armiertem Betonoberbau oder anderen Metallteilen wie Kanaldeckel, Rohren oder Schienen in der Fahrbahn sollte der Abstand zu diesen störenden Einbauten mindestens 30 cm betragen. Weiterhin nimmt die auswertbare Verstimmung mit zunehmender Länge der Leitung zwischen Schleife und Stromversorgung ab. Bei Mehrwindungsschleifen erreicht diese Zuleitung ab einer Länge von ca. 200 m die gleiche Induktivität wie die Schleife selbst.

Letzte wesentliche Parameter sind die Kenngrößen der zu erfassenden Fahrzeuge. Entscheidend sind hierbei vor allem die Bodenfreiheit sowie die Materialart und -masse des Fahrzeugunterbaus. Fahrräder erzeugen wegen ihrer niedrigen Masse an elektrisch leitfähigen Materialien sehr niedrige Verstimmungen, während Busse und Pkw die Detektoren am stärksten beeinflussen. Aufgrund ihrer meist größeren Bodenfreiheit beträgt die Verstimmung von Lkw nur etwa 25 % der von Pkw hervorgerufenen Verstimmung. In Bild 2.3 sind einige typische Verstimmungsverläufe dargestellt.

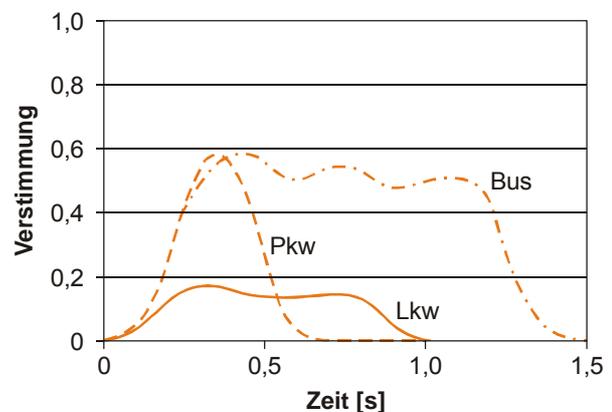


Bild 2.3: Fahrzeugunterscheidung anhand typischer Verstimmungskurven (nach [21])

Form, Größe und Anordnung der Detektoren richtet sich im Wesentlichen nach der verkehrstechnischen Aufgabenstellung. Als Standard werden Schleifen bezeichnet, die bei einer ungefähren Breite von 2 m eine Länge von 1 m bis 3 m haben. Aufgrund der recht kurzen Länge können auch dicht hintereinander fahrende Fahrzeuge unterschieden werden und neben der reinen Erfassung der Anwesenheit ist auch ein Zählen der Fahrzeuge möglich. Längere Schleifen von bis zu 30 m dienen in den meisten Fällen der Stauraumüberwachung.

2.2 Anwendungsfälle

Prinzipiell sind bei der Verwendung von an Lichtsignalanlagen detektierten Daten zwei Gruppen zu unterscheiden: Anwendungen, die mit einer sekundlichen Genauigkeit auf die Rohdaten zugreifen und auf das gemessene Verkehrsgeschehen reagieren, also die Daten online weiterverwenden, und Anwendungen, die bereits aufbereitete und gespeicherte Daten offline als Informationsquelle nutzen. Innerhalb der verschiedenen Bereiche des Verkehrsmanagements (vgl. Bild 2.4) bestehen demzufolge zahlreiche Möglichkeiten und Bedürfnisse, die Daten zu nutzen.

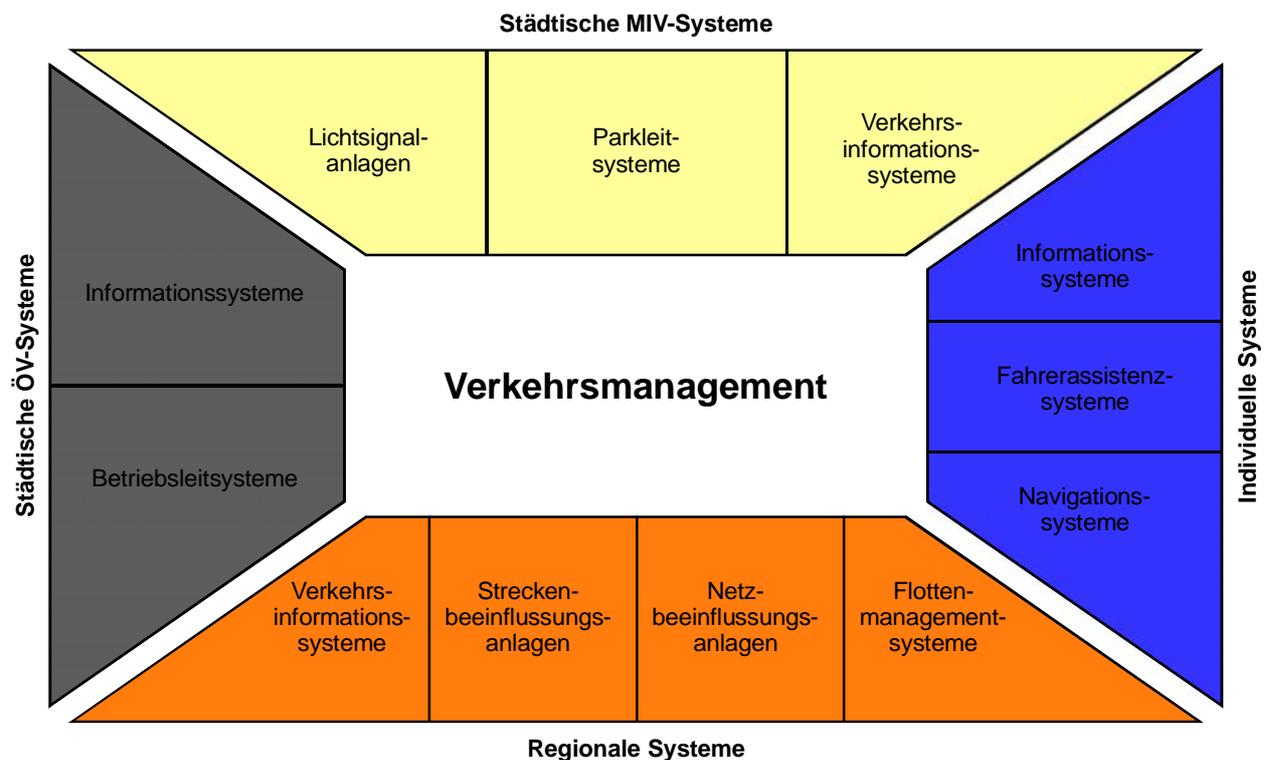


Bild 2.4: Aufgaben und Systeme des Verkehrsmanagements

Bei den Anwendungen, die die Daten online weiterverwenden, handelt es sich im Wesentlichen um verkehrsabhängig gesteuerte Lichtsignalanlagen. Sind diese logikbasiert, reagieren sie direkt aufgrund von Bemessungs- und Anforderbedingungen der einzelnen Detektoren auf das Verkehrsgeschehen. Werden die Lichtsignalanlagen adaptiv gesteuert, werden die Belegungsinformationen der einzelnen Detektoren an ein im Hintergrund laufendes Verkehrsmodell weitergegeben, welches aus diesen Informationen den günstigsten Schaltzustand ermittelt.

Ein weiteres Beispiel für die online-Verwendung der Daten ist die Stauererkennung. In den letzten Jahren wurden sowohl von BERNHARD und RIEDEL [4] als auch von MÜCK [43] Algorithmen

entwickelt, die mit Hilfe der Belegungsinformationen haltliniennaher, kurzer Detektoren eine Abschätzung der Staulänge vornehmen. Das Verfahren von BERNHARD und RIEDEL, welches in Zürich eingesetzt wird, verfügt laut Angabe der Autoren über ein Modul, welches die Funktionsweise der angeschlossenen Detektoren überprüft [4]. Es sind jedoch keine weiteren Informationen über die Steuerung dieses Moduls veröffentlicht.

Die offline-Nutzung der Daten ist für alle in Bild 2.4 dargestellten Systeme von Bedeutung. Innerhalb des städtischen MIV-Systems werden an Detektoren erhobene Daten beispielsweise zu historischen Ganglinien weiterverarbeitet und fließen dann in die Steuerung des Parkraums mit ein. Von besonderem Interesse sind die Daten für die Verkehrslenkung. Beispiele, die dies bereits praktizieren, sind z. B. das Verkehrsmanagementsystem VAMOS in Dresden [36], stadtfoköln [54] und CITY-TRAFFIC Bonn [34].

Werden die Daten offline genutzt, ist es für die Beschreibung der daraus resultierenden Anforderungen und der aufgrund von Messfehlern bestehenden Qualitätsdefizite ohne weitere Bedeutung, ob die Daten zeitnah direkt nach ihrer Erhebung aggregiert werden oder erst nach ihrer eventuellen Weiterverarbeitung in Datenbanken oder Ähnlichem.

2.3 Beschreibung der Datenqualität

Für die Beurteilung der Qualität von Daten jeder Art ist es unabdingbar zu wissen, für welche Zwecke die Daten im Weiteren verwendet werden sollen. Die für alle Anwendungen bestmögliche Bereitstellung von Daten ist aus technischen und finanziellen Gründen in der Regel nicht möglich, so dass sich auf die Optimierung der relevanten Aspekte beschränkt werden muss. Weiterhin müssen projektbezogene Bewertungsmaßstäbe für die einzelnen Kriterien entwickelt werden, da diese in Abhängigkeit von der späteren Anwendung sehr unterschiedlich sein können. Aus diesem Grund werden in der Literatur auch keine Empfehlungen für die Maßstäbe der Bewertung gegeben.

TURNER [51] stellte im Rahmen eines Workshops zur Datenqualität verschiedene Ansätze für die Beurteilung der Datenqualität zusammen und entwickelt darauf aufbauend eigene Empfehlungen, die er in einem so genannten „White Paper“ zusammenfasste. Im Kern handelt es sich dabei um sechs verschiedene Aspekte, die betrachtet werden sollten:

- Genauigkeit: Wie hoch ist der Grad der Übereinstimmung zwischen den Daten und einem Datensatz, der mit der Realität gleichgesetzt wird?
- Vollständigkeit: Werden die richtigen Kennwerte erhoben?
- Plausibilität: Sind die Daten realistisch und stimmen mit Erfahrungen überein?
- Aktualität: Liegen die Daten zeitnah bzw. rechtzeitig für die betrachtete Anwendung vor?
- Zuverlässigkeit: Werden die Daten zeitlich und räumlich konstant erhoben?
- Zugänglichkeit: Wie leicht können die Daten eingesehen bzw. weiterverarbeitet werden?

Die im Rahmen dieser Arbeit genutzten Qualitätskriterien werden in Abschnitt 4.2 näher erläutert.

2.4 Verfahren zur Datenüberprüfung und -verbesserung

2.4.1 Vorgehen entsprechend des Richtlinienwerks

In Deutschland bestehen mehrere Richtlinien, Merkblätter und Hinweispapiere, die sich entweder in Teilbereichen oder hauptsächlich mit der Beurteilung verkehrstechnischer Daten befassen. Im Folgenden werden die darin enthaltenen Aussagen und vorgestellten Verfahren kurz vorgestellt.

Laut dem Merkblatt über Detektoren für den Straßenverkehr [21] gibt es vier verschiedene Fehlerarten, die die Qualität von Messungen negativ beeinflussen können. Dabei handelt es sich um zeitliche Messfehler, um räumliche Messfehler, um lage- und formbedingte Messfehler sowie um umfeldbedingte Messfehler. Für die hier behandelte Fragestellung haben die zeitlichen Messfehler keine Bedeutung, da sich diese im Wesentlichen auf die Belegzeit- oder Geschwindigkeitsmessung auswirken. Räumliche Messfehler beziehen sich auf die Ansprech- und Abfallpunkte des Detektors, die durch Variation der Verstimmung und der Empfindlichkeit beeinflusst werden. Bei der gleichen Geschwindigkeit können aufgrund dieses Fehlers gleich lange Fahrzeuge bei Belegzeitmessungen unterschiedlich lange Meldungen abgeben. Dieser Effekt wirkt sich insbesondere auf die Unterscheidung verschiedener Fahrzeugarten aus. Wie in Kapitel 4 ausführlich behandelt wird, sind besonders häufig lage- und formbedingte Messfehler zu berücksichtigen. Diese entstehen z. B. wenn Fahrzeuge auf Nachbarfahrstreifen zu nah an der betrachteten Schleife vorbeifahren. Insbesondere die so genannten Langschleifen mit einer Länge von mindestens 4 m sind dafür empfindlich. Bei der zuletzt genannten Fehlerart, also den umfeldbedingten Fehlern, handelt es sich um die am schwierigsten zu systematisierenden Fehler. Sie können z. B. aufgrund einer schlechten Isolierung oder aufgrund von elektrischen oder magnetischen Störquellen in der Nähe der Schleife auftreten.

Die Qualitätsüberwachung bezieht sich im Wesentlichen auf die Überprüfung von eindeutig erkennbaren Disfunktionalitäten, wie sie unter anderem durch einen Schleifenbruch entstehen können. Aus diesem Grund soll neben der in der DIN VDE 0832 [13] vorgeschriebenen jährlichen Funktionskontrolle eine regelmäßige bauliche Kontrolle und die regelmäßige Messung des Isolationswiderstands erfolgen. Auf eine Nachjustierung wird explizit verzichtet, da davon ausgegangen wird, dass langsame Veränderungen zu einem Selbstabgleich führen. [21]

Neben der Meldung eines Totalausfalls kann mittels einfacher logischer Grenzwertabfragen sichergestellt werden, dass sich Störungen nicht gravierend auf die Signalsteuerung auswirken. Im Merkblatt über Detektoren für den Straßenverkehr [21] werden dazu die folgenden Abfragen vorgeschlagen:

- Ist die Anzahl der Meldungen pro Zeiteinheit kleiner als „normal“?
- Ist die Anzahl der Meldungen im Vergleich zu äquivalenten Fahrstreifen oder Folgedetektoren zu hoch bzw. zu niedrig?
- Haben die Zeitlücken die zu erwartende Länge oder sind sie unrealistisch kurz?
- Ist die Anwesenheitszeit plausibel oder werden zu lange oder zu kurze Zeiten übermittelt?
- Ist die gemessene Geschwindigkeit realistisch oder sind die übermittelten Werte zu hoch?

Die Grenzwerte für diese Abfragen sind sorgfältig und für unterschiedliche Belastungssituationen differenziert festzulegen. Als einfaches Beispiel für die Integration in die verkehrsabhängige Steuerung ist die Überprüfung der Anwesenheitszeiten in Bild 2.5 dargestellt.

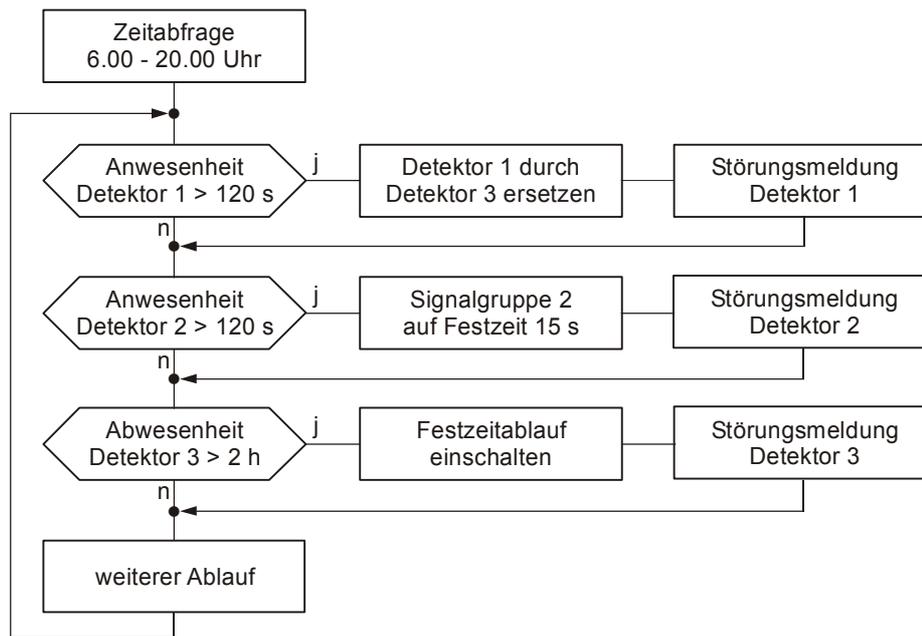


Bild 2.5: Beispiel einer automatisierten Fehlerbehandlung [21]

In den Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA) [22] wird nicht auf die Qualität der Daten eingegangen, um einerseits Redundanzen mit dem Merkblatt über Detektoren für den Straßenverkehr zu vermeiden und da andererseits die Bedeutung dieser Fragestellung bisher nur bedingt untersucht wurde. Die zunehmende Fokussierung auf Qualitätssicherung und Qualitätsmanagement, die in der Verkehrstechnik ebenso wie in anderen Bereichen zu beobachten ist, hat jedoch dazu geführt, dass in der Teilfortschreibung der RiLSA [23] ein Abschnitt über die Qualitätssicherung enthalten ist. Im Wesentlichen bezieht sich dieser Abschnitt allerdings auf die Projektierung und Implementierung der Steuerung. Im laufenden Betrieb ist laut Teilfortschreibung vor allem zu überprüfen, ob sich die grundlegenden Voraussetzungen für die Steuerung geändert haben. Hinsichtlich der Messdaten wird lediglich konstatiert, dass die Steuerung robust sein soll, also bei Detektorstörungen nicht vollständig versagen oder unbestimmte Zustände einnehmen darf, und dass die Messdaten auch über eine längere Betriebsdauer zuverlässig sein sollen. Kontrollmechanismen werden jedoch nicht behandelt.

Weitere Qualitätskontrollen sollen in der übergeordneten Ebene der Lichtsignalsteuerung, also in den Verkehrsrechnerzentralen, stattfinden. Im Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ) [6] wird detailliert auf diese Qualitätskontrollen eingegangen. Das Merkblatt bezieht sich im Wesentlichen auf Streckenstationen an Bundesfernstraßen, die Daten im Format entsprechend den Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS) [7] liefern. Mindestanforderung nach den TLS ist die getrennte Erhebung von Pkw-Verkehrsstärken und Lkw-Verkehrsstärken. Bereits diese Anforderung wird bei Detektoren an Lichtsignalanlagen in der Regel nicht erfüllt, so dass die Qualitätskontrollen, die sich auf das Zusammenspiel von Pkw, Lkw und Kfz stützen (z. B. $q_{Kfz} = 0 \rightarrow (q_{Lkw} = 0 \text{ und } q_{Pkw} = 0)$) nicht verwendbar sind.

Unter anderem um diese Lücke zu schließen, wurde von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) eine Arbeitsgruppe gegründet, deren Ziel die Erstellung der Hinweise zur Datenvervollständigung und Datenaufbereitung in verkehrstechnischen An-

wendungen [19] war. Diese sind im August 2003 erschienen und beschäftigen sich mit Daten, die sowohl für verkehrstechnische Anwendungen außerorts als auch für verkehrstechnische Anwendungen innerorts notwendig sind. Als grundlegender Schritt werden die einzusetzenden Verfahren vier verschiedenen in Bild 2.6 dargestellten Fusionsebenen zugeordnet. Die erste Fusionsebene beschreibt dabei lediglich die Fehlerkorrektur in einzelnen Quellen. Dazu gehört sowohl die Ersatzwertbildung als auch die Glättung der Messreihen, um damit den Einfluss von Ausreißern und Fehlmessungen zu verringern. Eingangsdaten für diese Ebene sind die Rohdaten und eventuell historische Informationen der einzelnen Messstellen. Werden die korrigierten Daten an die Fusionsebene 2 weitergegeben und liegen darüber hinaus Daten benachbarter Messstellen vor, kann aus dem Zusammenschluss dieser Daten eine weitere Erhöhung der Datenqualität vorgenommen werden. In diesem Schritt konzentriert sich die Analyse auf einzelne Strecken. Für die netzweite Betrachtung der Daten in der Fusionsebene 3 müssen in der Regel weit reichende Kenntnisse über das Verkehrssystem vorliegen. Aus diesem Grund ist die Einbeziehung historischer Informationen über das gesamte Netz an dieser Stelle unverzichtbar. Der letzte Schritt in dieser Hierarchie beschreibt die zusätzliche Berücksichtigung anderer Verkehrssysteme. Da dieser Schritt jedoch zum Zeitpunkt der Drucklegung des Hinweisepapiers noch in der Diskussion war, wird nur ansatzweise auf die vierte Ebene eingegangen.

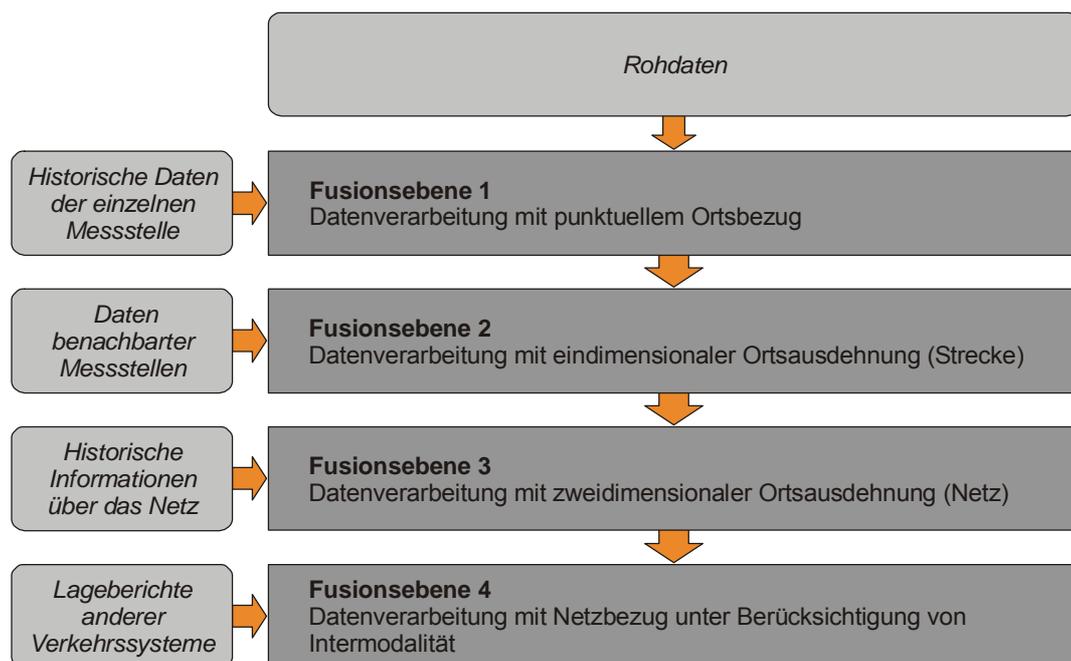


Bild 2.6: Fusionsebenenhierarchie (nach [19])

Im Rahmen der ersten Fusionsebene erfolgt zunächst eine Messwertersetzung. Da sich diese nicht nur auf fehlende Daten konzentriert, sondern auch fehlerhafte Werte ersetzt, werden in diesem Hinweisepapier die bereits oben genannten Plausibilitätskontrollen entsprechend des MARZ [6] empfohlen. Alternativ dazu werden Verfahren, die mit typisierten zeit- oder ereignis-abhängigen Ganglinien (vgl. Abschnitt 2.4.2) arbeiten, erwähnt aber nicht weiter vorgestellt. Für die Berechnung sinnvoller Ersatzwerte können bei nur einem Erfassungsquerschnitt je Richtung die Messwerte der vorangegangenen Intervalle extrapoliert werden oder es können Ersatzwerte aus typisierten Ganglinien übernommen werden. Liegt mehr als ein Fahrstreifen vor, sollten auch die entsprechenden Werte der Nachbarfahrstreifen in die Betrachtung eingehen.

Die ebenfalls zur ersten Fusionsebene zählenden Ausgleichsverfahren sind insbesondere an Lichtsignalanlagen unverzichtbar, da die systembedingten Schwankungen der Verkehrsstärke sehr groß sind (z. B. passieren bei einem 120 s-Umlauf und Auswertintervallen von 1 min immer abwechselnd viele und wenige Fahrzeuge den Detektor). Als geeignete Verfahren werden die einfache arithmetische, die gleitende arithmetische, die gewichtete, gleitende arithmetische und die exponentielle Mittelwertbildung vorgestellt. In der Praxis besonders bewährt hat sich der gewichtete, gleitende arithmetische Mittelwert, bei dem der Mittelwert aus mehreren Messwerten, die mit einem Koeffizienten entsprechend ihrer Aktualität gewichtet werden, berechnet wird. Alternativ zu dieser Mittelwertbildung oder auch als Ergänzung dazu, bietet es sich an, die Verkehrsstärkewerte in Zeitintervallen von z. B. 15 min zu aggregieren, mit repräsentativen Ganglinien derselben Messstelle zu vergleichen und so fehlende Werte zu ersetzen.

Für die streckenbezogene Fusionsebene 2 kann die Datenaufbereitung z. B. aufgrund einer Schätzung der Fahrtrichtungsanteile erfolgen. Am zuverlässigsten ist diese Schätzung für den Regelfall, dass die Detektoren in den Zufahrtstreifen eines Knotenpunkts liegen, und zudem jeder Detektor nur einer Fahrtrichtung zugeordnet ist. In diesem Fall können die dort gemessenen Verkehrsströme direkt dieser Richtung zugeordnet werden und müssen an der nächsten Messstelle wieder verzeichnet werden. Ist dies nicht der Fall und fahren mehrere Fahrzeugströme über einen Detektor, müssen sinnvolle Annahmen getroffen werden. Diese beruhen auf den Erfahrungen aus der Vergangenheit, können aber durch algorithmische Verfahren verfeinert werden.

Die netzweite Fusionsebene 3 beruht im Wesentlichen auf Modellrechnungen. Soll jedoch die aufwändige Versorgung der Modelle vermieden werden, bieten auch regelbasierte Ansätze eine Lösung. Dafür wird mittels logischer Regeln und Schwellwertbetrachtungen auf den Verkehrszustand nicht gemessener Streckenabschnitte geschlossen. Verfeinert wird dieses Verfahren zum einen über die Kenntnis historischer Daten bezüglich der Verkehrsverteilung und zum anderen über die so genannte Messwertpropagierung. Damit ist gemeint, dass sich die an einem Messquerschnitt gemessene Verkehrsstärke aus verschiedenen Strömen zusammensetzt und sich in der Regel hinter diesem Messquerschnitt wieder auf verschiedene Strecken aufteilt. Aus dieser Kenntnis heraus, kann also aus den Ergebnissen eines jeden Messquerschnitts sowohl eine Vorwärts- als auch eine Rückwärtsschätzung durchgeführt werden. In der Regel entstehen damit für alle Streckenabschnitte zwei unterschiedliche Schätzwerte. Zur Ermittlung des endgültigen Schätzwerts werden diese beiden Werte dann unter Berücksichtigung ihrer Zuverlässigkeit gemittelt.

Derzeit noch nicht veröffentlicht sind die Hinweise zur Qualitätsanforderung und Qualitätssicherung der lokalen Verkehrsdatenerfassung [20], die von einem Arbeitskreis der FGSV (AK 3.5.20) erarbeitet werden. Anlass für dieses Hinweispapier war eine Arbeit von BALMBERGER et al [1], die eine Überprüfung der Dauerzählstellen im Autobahnnetz der Autobahndirektion Nordbayern vorgenommen haben und dabei feststellten, dass die Qualitätsanforderungen gemäß den TLS [7] bei weitem nicht eingehalten werden. Dementsprechend bezieht sich das Hinweispapier auch im Wesentlichen auf Daten, die auf Außerortsstraßen entsprechend der Anforderungen der TLS erfasst werden. Das Hinweispapier bezieht sich sowohl auf Grundlagen zu der Thematik als auch auf detaillierte einzelne Fragestellungen. Insgesamt wird die komplette Thematik von der Beschreibung der Erfassungseinrichtungen bis zu der Auswertung der Daten behandelt.

Große Abschnitte des Hinweispapiers beschäftigen sich mit der Definition notwendiger Anforderungen und mit der Beschreibung möglicher Fehler und Fehlerquellen. Hinsichtlich der Induktivschleifendetektoren werden die vier verschiedenen Fehler zu große Fahrzeuganzahl, zu geringe Fahrzeuganzahl, falsche Klassifizierung und falsche Geschwindigkeitswerte unterschieden. Für die im Rahmen dieser Arbeit interessierenden Fehler zu große und zu geringe Fahrzeuganzahl werden als Fehlerquellen externe Störquellen, defekte Schleifen bzw. Zu- oder Ableitungen, fehlerhafte Erdung bzw. Blitzschutz, Schrägfahrer oder eine falsche Schleifengeometrie genannt. Zusätzlich können Lkw mit hoher Deichsel als zwei Pkw gezählt werden und so für die Ermittlung einer zu großen Fahrzeuganzahl verantwortlich sein, und ein zu geringer Fahrzeugabstand oder Stau kann dazu führen, dass zu wenige Fahrzeuge gezählt werden.

Bezüglich der Prüfung der Daten werden verschiedene Stufen vorgeschlagen: Als erstes erfolgt die generelle Überprüfung eines Geräts eines Gerätetyps, die so genannte Musterprüfung, bei der die Tauglichkeit für die gewünschte Anwendung nachgewiesen wird. Im Anschluss daran erfolgen Prüfungen im Betrieb, die jedoch bei der Betrachtung von Induktivschleifen zumeist davon ausgehen, dass Doppelschleifen verwendet werden und sich eine Kontrolle der Genauigkeit dadurch erübrigt.

Abschließend werden verschiedene Prüfungen vorgestellt, die auf den bereits aggregierten Daten basieren. Dabei handelt es sich einerseits um die Qualitätsüberprüfung laut MARZ [6] und andererseits um Ganglinienvergleiche und den Vergleich mit Erwartungsbereichen, die in verschiedenen Forschungsarbeiten thematisiert wurden und im folgenden Abschnitt aufgegriffen werden. Kritisch wird in den Hinweisen jedoch darauf hingewiesen, dass letztere Verfahren weniger geeignet sind für eine online-Überprüfung als für ihre eigentliche Bestimmung, die Prognose.

2.4.2 Vorgehen entsprechend weiterer Verfahren aus der Forschung

Bei den hier vorgestellten und angewendeten Verfahren muss prinzipiell zwischen zwei Gruppen unterschieden werden: zum einen Arbeiten, die sich auf theoretische Ansätze stützen, und zum anderen Arbeiten, die die Datenqualität mittels Referenzdaten beurteilen und eventuell verbessern. Da sich Letzteres jedoch als sehr aufwändig herausgestellt hat, überwiegen die auf theoretischen Ansätzen beruhende Testverfahren.

Ein Beispiel für den Vergleich von Daten mit Referenzdaten ist das Verkehrsmanagementsystem VAMOS [36], welches im Rahmen des BMBF-Leitprojekts „intermobil Region Dresden“ entwickelt und prototypisch im Ballungsraum Dresden realisiert wurde. Ziel dieses Projekts ist die Steuerung des Verkehrs und die Beeinflussung des Verkehrsverhaltens der Verkehrsteilnehmer mittels systematischer Managementmaßnahmen und Verkehrsinformationen. Als grundlegende Daten laufen sowohl Verkehrsdaten, die aus Induktivschleifen gewonnen werden, als auch ausgewertete Live-Kamera-Bilder in einen Rohdatenpool auf. Aus der Verschneidung dieser Daten wird die aktuelle Verkehrslage ermittelt. Genaue Informationen, wie diese Verschneidung erfolgt und welches System der Datenerhebung als das zuverlässigere betrachtet wird, sind jedoch nicht veröffentlicht.

Auch für den außerörtlichen Bereich gibt es ähnliche Systeme. So werden Daten aus verschiedenen Quellen (z. B. Induktivschleifen, Floating Car Data) von der Bonner DDG (Gesellschaft für Verkehrsdaten) genutzt, um als Eingangsparameter eines Verkehrsmodells möglichst genaue Verkehrsprognosen für das Bundesfernstraßennetz zu realisieren. Entsprechend der

eingangs vorgestellten Differenzierung werden also verschiedene Daten als gegenseitige Referenz erhoben und dann modellbasiert verschiedenen Testverfahren unterzogen. [16]

Im Rahmen seiner Arbeit zu zellularen Automaten hat sich ESSER [15] mit der Qualität von Detektordaten beschäftigt, da diese in aggregierter Form minütlich in die Simulation einfließen sollen, um so eine möglichst realistische Abbildung des momentanen Verkehrsablaufs zu ermöglichen. ESSER stützt sich auf eine Veröffentlichung von LANGE und LENZEN [37], die Fehlerquellen für unzureichende Messungen benennen, aber keine Quantifizierung der Zuverlässigkeit vornehmen. Mit dem Ziel, die schwerwiegendsten Fehler auszuschließen, wählt ESSER ein Verfahren, bei welchem Detektoren, die offensichtlich falsche Daten liefern, wie z. B. Nullmessungen über mehrere Tage oder unrealistisch hohe Verkehrsstärken, aus der Betrachtung ausgeschlossen werden. Eine weitergehende Analyse der verbleibenden Daten erfolgt nicht.

Weitreichende theoretische Überlegungen zur statistischen Analyse von Zähldaten werden von CHROBOK im Rahmen seiner Arbeit [9] getätigt. Ziel dieser Arbeit ist das Erkennen von Regelmäßigkeiten in automatisch erhobenen Datensätzen, um aus dem Vergleich dieser Regelmäßigkeiten mit aktuell erhobenen Verkehrsdaten die Prognosequalität verbessern zu können. Alle Analysen erfolgen sowohl für die inner- als auch für die außerörtliche Anwendung. In einem ersten Schritt werden die Datensätze hinsichtlich ihrer Plausibilität geprüft. Dies erfolgt über eine erste optische Kontrolle sowie über die Gegenüberstellung der Verkehrsdichte und der Verkehrsstärke im Fundamentaldiagramm. Die als plausibel erachteten Ergebnisse werden daraufhin zu Ganglinien zusammengefasst und statistischen Betrachtungen unterzogen. Dafür haben sich vier charakteristische Klassen von Ganglinien ergeben: Montag bis Donnerstag, Freitag, Samstag sowie Sonn- und Feiertage. Alle Analysen bis zu diesem Punkt beziehen sich auf die Gesamtheit aller untersuchten Detektoren. Da bei dieser Betrachtung naturgemäß der Richtungsbezug verloren geht, können die Ergebnisse nur für großräumige Prognosen genutzt werden. Aus diesem Grund werden Betrachtungen für einen einzelnen Streckenabschnitt mit starkem Richtungsbezug je nach Tageszeit ergänzt. Neben dieser zeitlichen Betrachtung ist auf dem Streckenabschnitt natürlich auch eine räumliche Betrachtung möglich, die jedoch dadurch erschwert wird, dass innerstädtisch in der Regel keine geschlossenen Systeme vorliegen und Abbiegebeziehungen an Knotenpunkten nur geschätzt werden können. Insgesamt ergibt sich für die Erkennung von Mustern an einzelnen Strecken, Knotenpunkten oder gar Detektoren eine sehr viel niedrigere Zuverlässigkeit als bei der Analyse des gesamten Untersuchungsgebiets.

Ein ähnliches Vorgehen wurde von einer Forschergruppe des U. S. DEPARTMENTS OF TRANSPORTATION angestrebt. Aufbauend auf einer Analyse verschiedener Verfahren für die Messung der Datenqualität wurde seit der Mitte der 90-er Jahre ein eigenes regelbasiertes Verfahren entwickelt. Bei den Regeln handelt es sich sowohl um einfache Abfragen bezüglich der Vollständigkeit jedes Datensatzes als auch um den Vergleich mit historischen Ganglinien. Die Forschergruppe hat einen Prototyp erstellt, der in einem Feldversuch in Minnesota getestet wurde. Dabei haben sich verschiedene Schwachstellen herausgestellt, die anschließend an den Feldversuch durch entsprechende Maßnahmen beseitigt wurden. Aufgrund organisatorischer und finanzieller Rahmenbedingungen hat jedoch kein erneuter Test des inzwischen weiterentwickelten Prototyps stattgefunden. [17]

Im Gegensatz zu dieser Arbeit hat sich FREUDENBERGER [24] schwerpunktmäßig mit der Analyse von innerstädtischen Induktivschleifendetektoren beschäftigt. Im Rahmen des Forschungsprojekts MOBINET wurde ein dynamisches Modell zur Verkehrsschätzung entwickelt.

Dieses Modell basiert auf den an verschiedenen innerstädtischen Querschnitten erhobenen Verkehrsdaten. Unter anderem wird dabei auch auf Verkehrsdaten, die an Lichtsignalanlagen erhoben werden, zurückgegriffen. Da sich die Qualität der grundlegenden Daten nach Einschätzung des Autors sehr stark auf die Qualität der Verkehrsschätzung auswirkt, ist eine Plausibilitätskontrolle der Daten im Vorfeld sehr wichtig. Die Daten sind in Intervalle von 15 min aggregiert und beinhalten Angaben zu der Belegung und der Verkehrsstärke. Eine Differenzierung nach Fahrstreifen ist in den meisten Fällen nicht möglich. Auch eine Differenzierung nach Pkw und Lkw wird nicht vorgenommen, so dass die Verfahren laut MARZ nicht anwendbar sind. Aus diesem Grund wird hauptsächlich der so genannte „Fundamentaldiagrammtest“ verwendet, bei dem die Geschwindigkeit und die Verkehrsstärke in Abhängigkeit gesetzt werden, wobei die Geschwindigkeit aus der Belegung und einer fiktiven durchschnittlichen Fahrzeuglänge von 5 m errechnet wird. Werte, die sich entweder bei Gegenüberstellung der Ganglinien verschiedener Tage eines Messquerschnitts oder bei der Analyse der Fundamentaldiagramme von den restlichen Werten deutlich unterscheiden, werden als fragwürdig eingestuft und nicht in die weitere Betrachtung integriert.

Sowohl FREUDENBERGER als auch CHROBOK beschränken sich im Wesentlichen auf den Vergleich mit historischen Daten eines bestimmten Detektors. Diese Vorgehensweise wird von CHEN et al [8] um die Einbeziehung historischer Daten benachbarter Schleifen erweitert. Als benachbart gelten dabei alle Schleifen, die entweder auf einem anderen Fahrstreifen des gleichen Querschnitts oder in einem direkt vorangehenden oder folgenden Querschnitt angeordnet sind. Dieses Vorgehen wird durch die sehr hohe Übereinstimmung der Ganglinien benachbarter Detektoren gerechtfertigt. In Bild 2.7 ist beispielhaft der direkte Vergleich der Verkehrsstärken zweier Messreihen dargestellt. In Bild 2.8 wird der gleiche Zusammenhang in Form einer Häufigkeitsverteilung für alle Detektoren im Großraum Los Angeles ($n = 5377$) dargestellt.

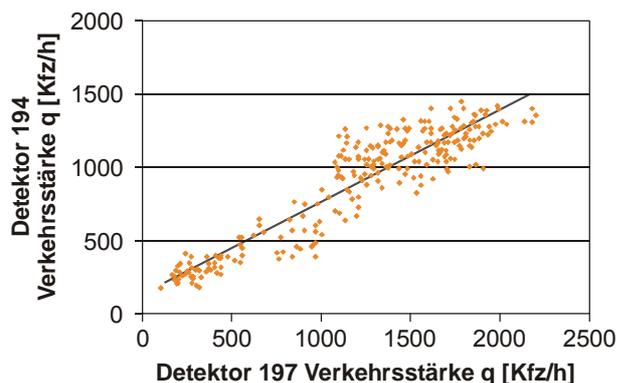


Bild 2.7: Vergleich der Messreihen der Detektoren 194 und 197 (nach [8])

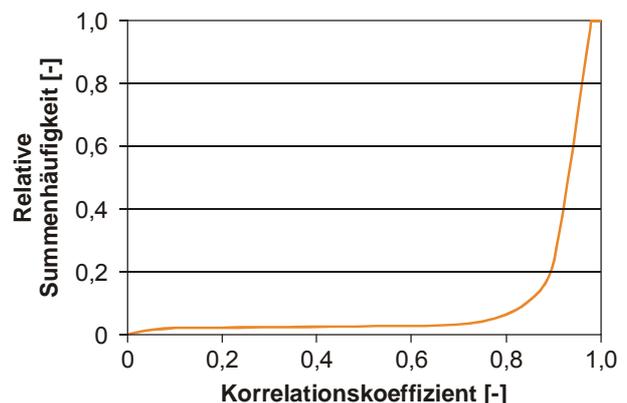


Bild 2.8: Häufigkeitsverteilung für an benachbarten Detektoren auftretende Korrelationskoeffizienten (Bewertungsgröße: Verkehrsstärke) (nach [8])

Ein Mittelweg zwischen der theoretischen Betrachtung und dem Vergleich mit Referenzdaten wird von HORTER et al [33] gewählt. Das Prinzip der gewählten Vorgehensweise ist die Fusion von Daten aus zwei verschiedenen Quellen. Als Beispiel zeigt HORTER die Fusion von Detektordaten und Floating Car Data. Wichtig ist, dass die Genauigkeit der einzelnen Messreihen bekannt sein muss, damit eine Gewichtung der Ergebnisse stattfinden kann. Statistische Effekte

wie das so genannte „Rauschen“ werden über die Verwendung von makroskopischen Modellen verringert. Letztendlich dienen die gewonnenen Daten zur Steuerung einer Verkehrsbeeinflussungsanlage.

Vor allem in den USA gibt es weitere Veröffentlichungen, die sich mit der Qualität von Detektordaten beschäftigen (z. B. [11][12][35]). Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind jedoch zum einen weitestgehend in den hier vorgestellten Arbeiten aufgegriffen. Zum anderen hat es sich gezeigt, dass aufgrund anderer technischer Randbedingungen nur eine sehr geringe Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die in dieser Arbeit behandelte Fragestellung besteht. Die wesentlichen Unterschiede sind die Lage der Detektoren, da in den meisten Arbeiten Detektoren auf Autobahnen bzw. autobahnähnlichen Straßen behandelt werden, und die erhobenen Kennwerte. Verfahren wie von JACOBSEN und NIHAN [35], die die Daten in Fundamentaldiagrammen darstellen und aus dieser Darstellung Aussagen ableiten, sind für Detektoren an Lichtsignalanlagen, die nur Verkehrsstärken erheben, nicht übertragbar und werden daher an dieser Stelle nicht weiter erläutert.

2.5 Ergebnisse bestehender Untersuchungen zur Datenqualität

Erste Untersuchungen bezüglich der Qualität automatischer Verkehrsdatenerfassung in Deutschland wurden von HOFSAß und SCHLUMS [31] in den 60-er Jahren durchgeführt. Im Vorfeld zu diesen Untersuchungen wurden die Kenntnisse aus Deutschland, dem europäischen Ausland und den USA über alle derzeit verfügbaren Messgeräte für die automatische Verkehrszählung in einer sehr umfangreichen Sammlung zusammengestellt. Bezüglich der Induktivschleifendetektoren wurden die mit dieser Erfassungsmethode an einer Versuchszählstelle erhobenen Daten denen einer manuellen Zählung gegenübergestellt. Die Versuchszählstelle befand sich an einer vierstreifigen Außerortsstraße in der Nähe von Stuttgart. Die Untersuchungsdauer betrug 11,5 h und die Daten wurden in Intervallen von der Länge einer Stunde aggregiert. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass die Qualität der Untersuchungsergebnisse insbesondere von der Einbauqualität der Induktivschleifendetektoren abhängig ist. Unter den Randbedingungen der Versuchsmessungen wurden einzelne Intervalle mit Abweichungen von bis zu 7 % beobachtet. Prinzipiell waren die Autoren des Berichts jedoch der Ansicht, dass bei dieser Messung ein besonders ungünstiges Ergebnis erzielt wurde und dass bei optimalen Bedingungen Genauigkeiten von 100 % erreicht werden.

Auch im Anschluss an dieses Projekt gab es mehrere Untersuchungen zur Datenqualität, die häufig als Orientierungshilfe für die Entscheidung zwischen mehreren Systemen gedacht waren. In der Regel beschäftigten sich diese Untersuchungen in erster Linie mit der Funktionstüchtigkeit der Detektoren unter verschiedenen Bedingungen. So gab es z. B. mit bestimmten Detektoren Probleme mit der Temperaturstabilität, so dass insbesondere bei Sonneneinstrahlung Störungen verzeichnet wurden. [49][50]

Wendet man sich neueren Untersuchungen zur Datenqualität automatischer Verkehrszählungen zu, erhält man ein ähnliches Bild: Veröffentlichungen, die als Hauptthema die Qualität der Verkehrsdaten haben oder sich mit dieser als Randbedingung beschäftigen, beziehen sich meist auf Detektoren auf Autobahnen und beschränken sich in den meisten Fällen auf Störungen, bei denen eine offensichtliche Disfunktionalität der Schleifen vorliegt. Dies kann z. B. bei einem kurzfristigen Ausfall der Datenübermittlung der Fall sein oder wenn neben den verkehrlichen Daten auch der Betriebszustand der Detektoren (gestört / ungestört) übermittelt wird.

So haben HOOPS et al [32] im Rahmen einer Arbeit, die sich im Wesentlichen mit der automatischen Störungserkennung beschäftigt, in drei verschiedenen Testfeldern die Vollständigkeit der erhobenen Daten überprüft (vgl. Bild 2.9). Es hat sich herausgestellt, dass keine verallgemeinernde Aussage bezüglich der Fehlerhäufigkeit zu treffen ist. Während das Messfeld auf der A1 weitestgehend vollständige Datensätze liefert, fehlen bei dem Messfeld auf der A9 bereits 3,4 % der Daten und in 8,5 % der Fälle liegen Unplausibilitäten vor. Dabei handelt es sich um Werte, bei denen eine nicht außergewöhnlich niedrige oder hohe Verkehrsstärke gemessen wird, aber bei denen die parallel erhobenen Geschwindigkeiten mit 0 km/h protokolliert werden.

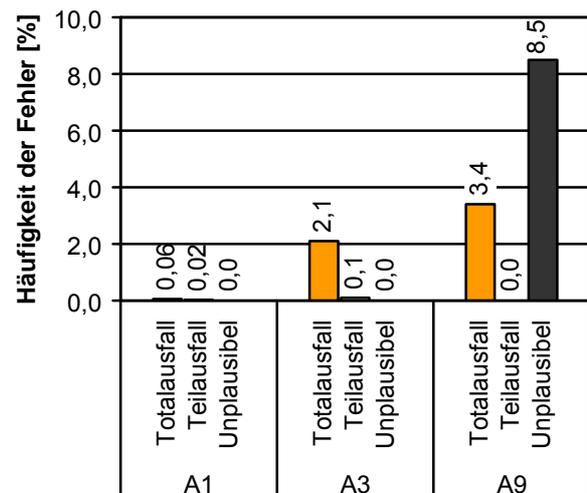


Bild 2.9: Häufigkeit der Fehler in verschiedenen Testfeldern (nach [32])

LANGE und LENZEN [37] haben eine Beurteilung der Qualität von Induktivschleifendetektoren anhand eines Vergleichs der Daten von drei hintereinander angeordneten Messquerschnitten vorgenommen. Die Messquerschnitte wurden auf einer Rheinbrücke angeordnet, so dass keine Abbiegemöglichkeiten bestanden und alle Fahrzeuge, die den ersten Messquerschnitt passierten auch an den folgenden Messquerschnitten erfasst werden mussten. Die Messung erfolgte über einen Zeitraum von 24 h und die Ergebnisse wurden in Intervallen von jeweils 15 min aggregiert. Die Ganglinien der drei Messungen weisen auf den ersten Blick eine sehr große Ähnlichkeit auf. Dies wird durch die geringe Abweichung der absoluten Zählwerte voneinander, die geringer als 5 % ist, bestätigt. Die genauere Analyse zeigt jedoch für mehrere Intervalle relative Abweichungen von mehr als 20 % bezogen auf den Mittelwert der drei Messreihen. Diese Differenzen treten zu allen Tageszeiten und bei verschiedenen Verkehrsstärken auf. Als mögliche Ursachen werden die unzureichende Detektion spezieller Fahrzeuge und Fahrstreifenwechsellvorgänge zwischen den Detektoren innerhalb eines Messquerschnitts vermutet.

Eine detaillierte Untersuchung über die Genauigkeit der Induktivschleifendetektoren auf der A5 wurde im Jahre 1991 von WIEDEMANN et al veröffentlicht. Inhalt dieser Untersuchung war ein Vergleich der mit den Induktionsschleifen gemessenen Verkehrsstärke mit der durch zwei Referenzsysteme (Radar und Video) erfassten Verkehrsstärke. Als Ergebnisse wurde festgehalten, dass die Abweichungen teilweise sehr groß sind, aber die Zählfehler keiner speziellen Tendenz folgen und sich über längere Bezugsintervalle ausgleichen. Besonders schlechte Ergebnisse für die Qualität der Messwerte wurden bei geringen Geschwindigkeiten erzielt. [57]

Ähnlich zu dieser Vorgehensweise wurde auch von NIHAN et al ein Vergleich der detektierten Verkehrsstärke mit einem Referenzsystem durchgeführt [45]. Dabei wurde sich ebenfalls auf autobahnähnliche Straßen beschränkt. Bei den Detektoren handelt es sich um jeweils zwei Detektoren, die in geringem Abstand zueinander liegen, um so eine genauere Messung der Fahrzeuglänge durchführen zu können. Es hat sich gezeigt, dass die einzelnen Schleifen geringfügig zu viele Fahrzeuge zählen, aber insgesamt eine zu niedrige Verkehrsstärke ermittelt wird. Dies liegt daran, dass Fahrzeuge, die im Bereich der Schleifen einen Fahrstreifenwechsel

durchführen, von zwei Schleifen verschiedener Schleifenpaare gezählt werden. Die Plausibilitätskontrolle filtert diese Fahrzeuge dann aus beiden Datensätzen heraus, so dass die Gesamtzahl der erhobenen Fahrzeuge niedriger ist als die tatsächliche. Wesentlich größere Probleme ergeben sich bei der Längenbestimmung, die eine grundlegende Überarbeitung der verwendeten Algorithmen notwendig erscheinen lassen.

Verschiedene weitere Untersuchungen aus den USA werden von MARTIN et al [38] zusammengefasst. Ziel ist die Entwicklung von Handlungsempfehlungen, unter welchen Randbedingungen welche Detektorarten am besten zu verwenden sind. Dafür wird neben der Betrachtung der Kosten auch eine Analyse der Genauigkeit durchgeführt. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass Induktivschleifendetektoren zu den genauesten Detektoren gehören. Sie stützen sich dabei zum einen auf verschiedene Untersuchungen von MIDDLETON et al [40] [41], die Detektoren in Bezug auf die Zählung von Fahrzeugen eine Genauigkeit von 98 % bescheinigen. Zum anderen stützen sie sich auf eine Untersuchung des MINNESOTA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION [42], die diesen sehr guten Wert relativiert, in dem sie eine Unterscheidung zwischen auf autobahnähnlichen Straßen und an Knotenpunkten erhobenen Daten trifft. Für den hier interessierenden Fall der Knotenpunkte wird ein Zählfehler zwischen 2,8 und 8,6 % ermittelt.

Ein anderer Ansatz für die Analyse der Genauigkeit von Detektordaten wurde von HAMM und WOODS [29] gewählt. Im Rahmen eines Feldversuchs wurden Detektoren unterschiedlicher Form in verschiedenen Tiefen eingebaut und gezielt hinsichtlich der Erfassung von besonders leichten und kleinen bzw. von besonders großen Fahrzeugen untersucht. Für jede Fahrzeugart wurden optimale Randbedingungen für ihren Einsatz definiert. Werden diese optimalen Randbedingungen beim Einbau gewährleistet, können die Schleifen jeweils die Fahrzeugart, für welche sie optimiert sind, unter Testbedingungen mit 100-prozentiger Genauigkeit messen. Nicht erfasst wurden mittels dieser Methodik im Betrieb auftretende Wechselwirkungen zwischen Detektoren, das Abweichen der Fahrzeuge von der Spur innerhalb des Fahrstreifens sowie Verschleißerscheinungen und andere im Test nicht vorhersehbare Quellen für Ungenauigkeiten.

2.6 Auswirkungen von Fehlern auf die Anwendungen

Der Frage, inwiefern sich fehlerhafte Messungen der Detektoren auf die Signalsteuerung auswirken, wurde bisher nur ansatzweise nachgegangen. Die Arbeit von HOFFMANN und GLATZ [27] widmet sich dieser Frage, betrachtet wurden jedoch nur die Fehlfunktionen „Daueranforderung“ und „ausbleibende Anforderung“. In die im Anhang der Richtlinien für Lichtsignalanlagen von 1992 [23] enthaltenen konkreten Beispiele wurden diese Fehlfunktionen implementiert und mithilfe mikroskopischer Verkehrsflusssimulation bewertet. Fazit dieser Arbeit ist, dass davon abgeraten wird, mikroskopische Steuerungen, die mit Bedarfsphasenanforderung arbeiten und über keine Algorithmen zur Fehlererkennung verfügen, einzusetzen. Hier besteht ansonsten die Gefahr, dass aufgrund von ausbleibenden Anforderungen eine Phase nicht signalisiert wird und Verkehrsteilnehmer gezwungen sind, ein rotes Signal zu überfahren. Unnötiges Signalisieren von Phasen aufgrund von Dauermeldungen ist hingegen störend, aber nicht gefährlich für die Verkehrssicherheit. In einer zusammenfassenden Betrachtung kommen HOFFMANN und GLATZ zu dem Schluss, dass mit zunehmender Flexibilität des eingesetzten Steuerungsverfahrens gleichzeitig die Auswirkungen von Detektorstörungen zunehmen, da sich die Toleranz gegenüber diesen Störungen verringert. Werden jedoch Maßnahmen zur Fehlererkennung und

Qualitätssicherung getroffen, erscheint die Messgenauigkeit von Induktivschleifendetektoren an verkehrsabhängig gesteuerten Lichtsignalanlagen als ausreichend.

Als Beispiel für die offline-Verwendung der Daten untersuchen MATSCHKE et al [39] die Auswirkungen fehlerhafter Detektordaten auf die Qualität der Schätzung von Herkunft-/Zielbeziehungen. Dafür wird ein beispielhaftes Netz betrachtet, in dem unterschiedliche Planfälle hinsichtlich der Eingangsdaten für die Schätzung abgebildet werden. In drei dieser Planfälle werden von den insgesamt 37 Kanten des Untersuchungsnetzes drei mit fehlerhaften Daten versorgt. Dabei werden in den meisten Fällen zu geringe und in einem Fall zu hohe Verkehrsstärken angenommen. Die Abweichungen schwanken zwischen 25 % zu wenig erfasstem Verkehr bis zu der Detektion der fünffachen Verkehrsstärke auf der am geringsten belasteten Kante. In allen Szenarios ist das Ergebnis unter Beachtung der fehlerhaften Daten besser, als wenn auf diese Zusatzinformationen verzichtet worden wäre.

2.7 Fazit

Aus der Literaturanalyse haben sich bezüglich des Stands der Technik die folgenden Erkenntnisse ergeben:

- Induktivschleifendetektoren sind trotz verschiedener neuer Entwicklungen immer noch die am häufigsten eingesetzten Detektoren und gelten als besonders zuverlässig.
- Die Qualität automatisch erhobener Verkehrsdaten wurde lange Zeit generell als sehr zuverlässig und gut angesehen. Während der letzten Jahre hat sich jedoch das Bewusstsein gebildet, dass dies nicht immer vorausgesetzt werden kann. Aus diesem Grund wird die Qualitätssicherung stärker in die entsprechenden Richtlinien, Hinweise und weitere Veröffentlichungen der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen eingebunden.
- Datenqualität lässt sich anhand verschiedener Qualitätskriterien beurteilen. Dabei ist darauf zu achten, welche dieser Kriterien für die Fragestellung relevant sind. Weiterhin, können sich insbesondere die Schwellenwerte für die Erreichung einer ausreichenden Datenqualität für unterschiedliche Anwendungen deutlich unterscheiden.
- Angaben zu der Genauigkeit von Detektoren in Bezug auf die Anzahl detektierter Fahrzeuge schwanken zwischen 80 % und 100 %. Dabei handelt es sich meist um Untersuchungen, die an Autobahnen oder autobahnähnlichen Straßen vorgenommen wurden. Zu der Datenqualität an innerstädtischen Knotenpunkten liegen nur wenige empirische Untersuchungen vor.
- Forschungsansätze zur Verbesserung der Datenqualität sehen vor allem ein Potenzial in dem Vergleich mit historischen Ganglinien oder mit weiteren automatisch erhobenen Daten.
- Die Auswirkungen mangelhafter Datenqualität auf die Signalsteuerung wurden in einer Arbeit untersucht. Dabei wurde gezeigt, dass auch bei den besonders gravierenden Detektorstörungen „Daueranforderung“ und „Totalausfall“ die Auswirkungen auf die Qualität des Verkehrsablaufs bei beispielhaften Steuerungen nicht gravierend sind. Es wird jedoch festgestellt, dass die Auswirkungen bei zunehmenden Freiheitsgraden der Steuerung ebenfalls zunehmen.
- Werden die Daten als Beispiel für die offline-Nutzung in die Schätzung der Herkunft-/Zielbeziehungen eingebunden, können sich auch bei einer geringen Datenqualität positive

Auswirkungen auf das Ergebnis ergeben, die jedoch wiederum noch nicht abschließend untersucht sind.

3 Datenerfassung und -aufbereitung

3.1 Technische Beschreibung der Erfassungseinrichtungen

Die Stadt Hannover verfügt über ein Verkehrsrechnersystem, welches anlässlich der EXPO 2000 aufgebaut wurde. Insgesamt gibt es, wie in Bild 3.1 dargestellt ist, acht Verkehrsrechner, an welche über 500 Lichtsignalanlagen verschiedener Hersteller angeschlossen sind. Von den zehn Bedienterminals kann auf das System in unterschiedlicher Weise zugegriffen werden. Zum einen kann die korrekte Funktion der Lichtsignalanlagen online überwacht werden, indem die jeweiligen Anforderungs- und Schaltzustände grafisch veranschaulicht werden. Auch direkte Eingriffe in die Steuerung können erfolgen. Dabei können alle nicht sicherheitsrelevanten Parameter geändert werden. Lediglich ein Eingriff in die Phasenübergänge ist auf diesem Weg nicht möglich. Zum anderen werden alle die Lichtsignalanlagen betreffenden Daten zwei Wochen lang in einer Datenbank gespeichert, auf die ebenfalls von den Bedienrechnern zugegriffen werden kann.

Die Erfassung der Kraftfahrzeuge an den Lichtsignalanlagen erfolgt über fest installierte Induktivschleifen-Detektoren. Diese haben entsprechend ihrer Funktion verschiedene Abmessungen: für die Erfassung von Anforderungen sowie die Bemessung von Zeitlücken werden Schleifen mit einer Länge von 3 m verwendet, die entweder nur eine dieser beiden oder aber beide Funktionen gleichzeitig erfüllen. In einigen Fällen gibt es spezielle Schleifen für die Detektion von Stau. Diese haben eine Länge von 8 m. Die Breite beider Schleifentypen ist von der Fahrstreifenbreite abhängig. Sie ergibt sich aus einem geforderten Abstand von 0,6 m zu den seitlichen Begrenzungen. Beide Schleifentypen verfügen über 4 bzw. 5 Windungen.

Die am oberen Ende der Länge von „Standard-Schleifen“ angeordneten Schleifen mit 3 m Länge haben den Vorteil, dass sie im Gegensatz zu kürzeren Schleifen nicht nur der reinen An- bzw. Abmeldung dienen. Aufgrund der zeitlich längeren Verstimmung der Schleifen ist auch die Erfassung der Anwesenheitsdauer möglich, so dass prinzipiell auch die Berechnung der Geschwindigkeit erfolgen kann, was jedoch in den verwendeten Steuerungslogiken nicht genutzt wird. Als Nachteil ist zu beobachten, dass eventuell auch Nachbarströme erfasst werden.

Eher untypisch und auch abweichend von den Vorgaben des Merkblatts über Detektoren für den Straßenverkehr ist die gleiche Breite beider Schleifentypen. Da lange Schleifen eine geringe Verstimmung erfahren, wenn Sie von einem Fahrzeug überfahren werden, diese aber auch wirkt, wenn Fahrzeuge nur neben der Schleife entlang fahren, werden sie üblicherweise mit

einer Breite von 1 m ausgeführt. Damit wären sie nur ungefähr halb so breit, wie es sich bei einer Fahrstreifenbreite von etwa 3 m für die hier verwendeten Schleifen ergibt. Weiterhin ist anzumerken, dass lange Schleifen als nicht tauglich für die Zählung von Fahrzeugen angesehen werden, da sie Fahrzeuge, die in einem Abstand kleiner der Länge der Schleife hintereinander fahren, nicht unterscheiden können. [21]

Der Abstand der Induktivschleifendetektoren von der Haltlinie hängt von der individuellen Knotenpunktgeometrie und der Anforderung an die Schleifen ab. In den meisten Fällen sind sie jedoch haltliniennah mit einem Abstand von nur 3 m angeordnet. Der größte im Rahmen dieser Untersuchung auftretende Abstand beträgt 40 m. Sowohl Abmessungen als auch Lage der Detektoren werden bei der Analyse der Datenqualität berücksichtigt.

Zusätzliche Erfassungseinrichtungen wie z. B. Anforderungstaster für Fußgänger bzw. Koppelspulen und Datenfunk für die Anmeldung von Nahverkehrsfahrzeugen sind an den Knotenpunkten zwar vorhanden, aber nicht Gegenstand dieser Untersuchung, so dass sie hier nicht näher erläutert werden.

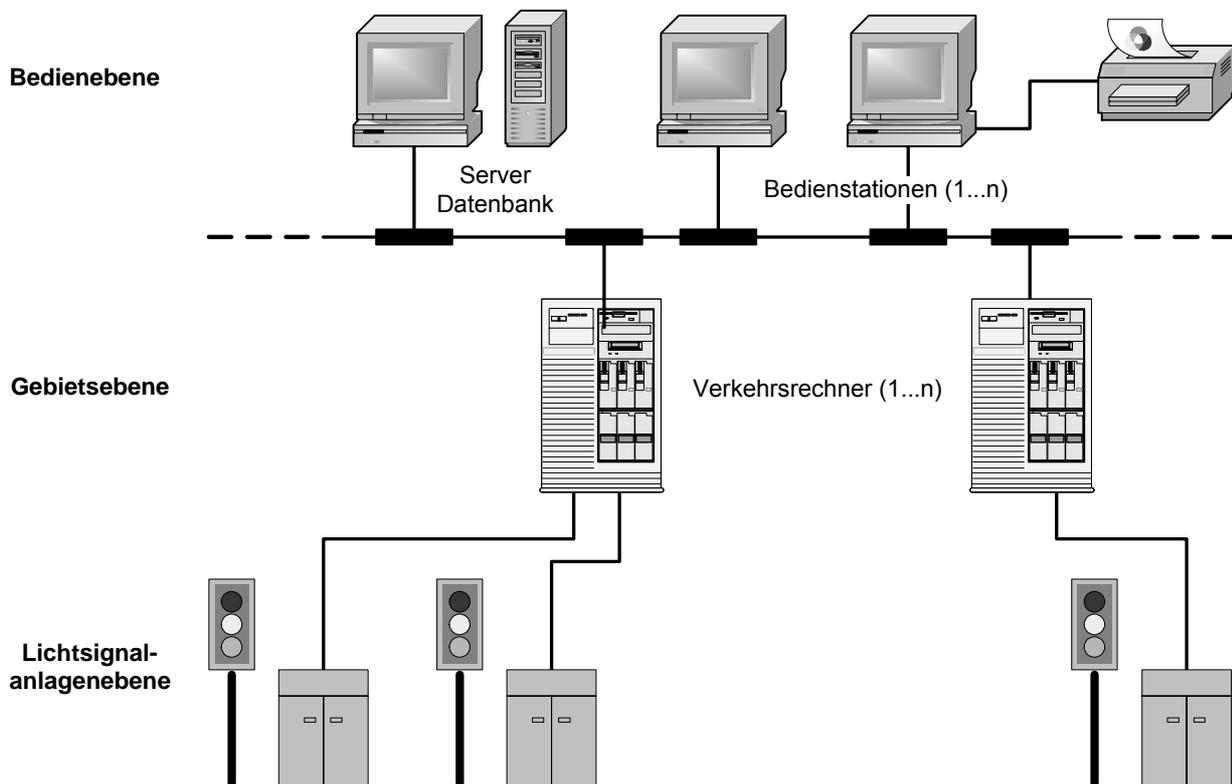


Bild 3.1: Aufbau des Verkehrsrechnersystems in Hannover (nach [52])

3.2 Datenaufbereitung

Die Signalprogrammprotokolle enthalten Informationen über den Status der einzelnen Signalgeber, die laufende bzw. angeforderte Phase, Anforderungs- und Bemessungsmerker sowie die so genannte „18-er Meldung“, auf die im Weiteren detaillierter eingegangen wird. Auf diesen Werten basieren verschiedene Statistiken zu Fahrzeitanalyse, Grün-/Rot-Verteilung, Anforderungswartezeiten, Phasenhäufigkeiten, Phasenfolgen und Verkehrsmengen. Wie HAAS und MARSMANN [28] gezeigt haben, stimmen die automatisch erzeugten Statistiken jedoch nicht

zuverlässig mit den in den 18-er Meldungen übermittelten Verkehrsstärken überein. Deshalb wurde auch in dieser Arbeit beschlossen, sich nicht auf die Statistiken zu beziehen, sondern direkt auf die originären Verkehrsstärken aus den 18-er Meldungen zurückzugreifen.

In Bild 3.2 ist ein Auszug aus einem Signalprogrammprotokoll einschließlich der 18-er Meldungen dargestellt. Die schwarzen Zeilen sind die Originalzeilen aus dem Signalprogrammprotokoll und in orange sind Erläuterungen eingefügt. Die 18-er Meldungen sind daran zu erkennen, dass in der Spalte nach der Uhrzeit eine „018“ gefolgt von weiteren, durch Kommata getrennten Zahlen steht. Aufgrund des unterschiedlichen Zeilenlayouts wie die übrigen Zeilen ist es unter anderem sehr einfach möglich, diese Informationen automatisiert auszuwerten. Die jeweils letzten vier Zahlen der 18-er Meldung geben Auskunft über die Verkehrsstärken, die von vier Detektoren gezählt wurden. Bei der fünftletzten Zahl handelt es sich um die Nummer des ersten in der Meldung aufgeführten Detektors, so dass eine Zuordnung der Angaben zu den Detektoren einfach möglich ist. Der zugehörige Knotenpunkt verfügt über neun Detektoren, deren Zählwerte in drei Meldungen für jeweils vier Detektoren zusammengefasst dargestellt werden. Aus diesem Grund sind die hinteren drei Plätze der letzten 18-er Meldung nicht belegt.

07:45:44	040	I..I.... ..I.I	4	0	1	1	1	0	0	1	0	
07:45:45	041	I..I.... ..I.I	4	0	1	1	1	1	0	1	0	
Meldung zur Verkehrsmenge (minütlich für jeweils 4 Detektoren):												
	Kennung (18)	Datum	Zeit	Detektor-Nr.	1	2	3	4				
07:45:46	018,20,05,03,07,45,000,000,001,008,003,012,005;											
07:45:46	042	I..I.... ..I.I	4	0	0	1	1	1	0	1	0	
07:45:47	043	I..I.... ..I.I	4	0	3	1	1	1	0	1	0	
07:45:48	044	I..I.... ..I.I	4	0	3	1	1	3	0	1	0	
07:45:49	045	I..I.... ..I.I	4	0	3	1	1	3	0	1	0	
07:45:50	046	I..I.... ..I.I	4	0	3	1	1	3	0	1	0	
07:45:51	047	I..I.... ..I.I	4	0	0	1	1	3	0	1	0	
				Detektor-Nr.	5	6	7	8				
07:45:52	018,20,05,03,07,45,000,000,005,005,004,010,004;											
07:45:52	048	I..I.... ..I.I	4	0	3	1	1	3	0	1	0	
07:45:53	049	I..I.... ..I.I	4	0	3	1	1	3	0	1	0	
07:45:54	050	I..I.... ..I.I	4	0	3	1	1	3	0	1	0	
07:45:55	051	I..I.... ..I.I	4	0	0	1	1	3	0	1	0	
07:45:56	052	I..I.... ..I.I	4	0	0	1	1	3	0	1	0	
07:45:57	053	I..I.... ..I.I	4	0	2	1	1	3	0	1	0	
07:45:58	054	I..I.... ..I.I	4	0	2	1	0	3	1	1	1	
				Detektor-Nr.	9	(weitere Plätze nicht belegt)						
07:45:59	018,20,05,03,07,45,000,000,009,000,000,000,000;											
07:45:59	055	I..I.... ..I.I	4	0	2	1	1	3	1	1	2	
07:46:00	056	I..I.... ..I.I	4	0	2	1	1	3	1	1	3	

Bild 3.2: Auszug aus einem Signalprogrammprotokoll – Erläuterung der 18-er Meldungen

In Tabelle 3.1 ist die Zusammenstellung der 18-er Meldungen für einen kurzen Zeitbereich dargestellt. Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit mit den empirisch erhobenen Verkehrsstärken, die zumeist in 5 min-Intervallen vorliegen, zu gewährleisten, werden die 18-er Meldungen für die entsprechenden Untersuchungsschritte in den gleichen Intervallen zusammengefasst. Für diesen Fall ist in Tabelle 3.1 eine mögliche Fehlerquelle der automatischen Aufbereitung der Daten zu sehen: Da für das Zeitintervall bis 6:06 h keine Daten der Detektoren D31, D32, D41 und D42 vorliegen, kann für das anschließende 5 min-Intervall keine Aussage bezüglich der Verkehrsstärke dieser Ströme getroffen werden. Aus diesem Grund werden die entsprechenden Intervalle nicht in die weiteren Betrachtungen einbezogen. Diese Ausfälle

$$D_{\text{ges}} = \sum_{n=1}^N (y_n - x_n) \quad (3-1)$$

$$D_{\text{rel}} = \sum_{n=1}^N (y_n - x_n) / \sum_{n=1}^N x_n \quad (3-2)$$

Korrelationskoeffizient

Der Korrelationskoeffizient r zwischen den beiden Datenreihen X und Y ist definiert als der Quotient aus deren Kovarianz und der Wurzel aus dem Produkt der beiden Varianzen. Er berechnet sich nach folgender Formel:

$$r = \frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x}) \cdot (y_n - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2 \cdot \sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y})^2}} \quad (3-3)$$

Der Korrelationskoeffizient schwankt zwischen $r = -1$ und $r = 1$. Der optimale zu erreichende Wert ist $r = 1$. Dieser Wert kennzeichnet einen vollständigen linearen Zusammenhang zwischen den beiden Messreihen. Mit $r = -1$ wird der Zustand beschrieben, dass ein vollständiger negativer Zusammenhang zwischen den Messreihen besteht und $r = 0$ zeigt, dass beide Messreihen vollkommen unabhängig voneinander sind. Dabei ist zu beachten, dass bei der Korrelationsanalyse nur die Stärke des Zusammenhangs, also die Ähnlichkeit der Messreihen, geprüft wird. Es kann dabei durchaus sein, dass die Messreihen zwar parallel verlaufen, jedoch auf einem stark unterschiedlichen Verkehrsstärkeniveau. [30]

Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler (WMQF)

Für die Bewertungsgröße „Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler“ wird zuerst der Mittelwert aller quadrierten Abweichungen gebildet und aus diesem dann die Wurzel gezogen (3-4). Dieses Verfahren bewirkt zum einen, dass sich positive und negative Abweichungen nicht gegenseitig aufheben, wie dies z. B. bei der Betrachtung der Gesamtabweichung der Fall ist. Zum anderen reagiert das Verfahren gegenüber einzelnen Ausreißern relativ stabil. Zielgröße für den Wert WMQF ist 0.

$$\text{WMQF} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N (y_n - x_n)^2} \quad (3-4)$$

Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehlerproportional (WMQFP)

Teilt man die WMQF durch den Mittelwert der Messungen, erhält man die „Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehlerproportional“ (3-5). Vorteil dieser Betrachtung ist, dass die Fehler entsprechend der Größe des eigentlichen Messwerts bewertet werden. Andererseits ergeben sich jedoch auch bei kleinen Werten sehr schnell sehr große Werte für die WMQFP, die dann einen sehr viel ungünstigeren Eindruck erwecken können, als dies anhand anderer Bewertungsgrößen der Fall ist.

$$\text{WMQFP} = \sqrt{N \cdot \sum_{n=1}^N (y_n - x_n)^2} / \sum_{n=1}^N x_n \quad (3-5)$$

4 Analyse der Datenqualität

4.1 Vorgehen

Die Analyse der Datenqualität erfolgt in mehreren Schritten. Grundlegend für die Überprüfung und damit auch für die Bewertung ist die Definition von Qualitätskriterien. Die automatisch erhobenen Verkehrsstärken werden den in einer Vergleichsmessung erhobenen realen Verkehrsstärken gegenübergestellt und anhand der definierten Qualitätskriterien miteinander verglichen und beurteilt. Die tiefer gehende Analyse dieser Daten, bei der unter anderem eine Clusterung der Detektoren anhand verschiedener Merkmale vorgenommen wird, dient der Eruierung von Randbedingungen, die besonders gute bzw. besonders schlechte Ergebnisse hinsichtlich der Genauigkeit erwarten lassen.

4.2 Definition von Qualitätskriterien

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Qualitätskriterien orientieren sich an den Ansätzen von TURNER [51] (vgl. Abschnitt 2.3), wobei jedoch auf die Betrachtung der Plausibilität verzichtet wird, da Referenzmessungen für die Beurteilung der Genauigkeit vorliegen und so eine wesentlich zuverlässigere Aussage getroffen werden kann als dies mit einer reinen Plausibilitätskontrolle der Fall ist. Für die meisten der betrachteten Kriterien werden an dieser Stelle bereits die Maßstäbe in Abhängigkeit von dem späteren Verwendungszweck der Daten definiert. Als Verwendungszwecke werden zwei Gruppen unterschieden: Einerseits die Verwendung für die Lichtsignalsteuerung also die online-Verwendung und andererseits die Verwendung für offline-Verfahren jeder Art.

Einige dieser Kriterien werden für alle Detektoren einheitlich beurteilt, da sie entweder systembedingt auftreten und daher für alle untersuchten Beispiele gleich sind oder sich eine Beurteilung erst aus dem Zusammenspiel mehrerer Detektoren ergibt. Dazu gehören die Zugänglichkeit, die Aktualität, die räumliche Zuverlässigkeit und die Vollständigkeit. Hinsichtlich der Genauigkeit wird vorerst auf die Benennung von Maßstäben verzichtet, da die Definition eines Qualitätsmaßstabs in Abhängigkeit von den zu erwartenden Auswirkungen vorgenommen werden muss. Die Auswirkungen mangelnder Genauigkeit auf verschiedene Verwendungszwecke werden in Kapitel 6 am Beispiel der Signalsteuerung und in Kapitel 7 am Beispiel der Schätzung von Herkunft-/ Zielbeziehungen als offline-Anwendung untersucht. Im Anschluss an diese Untersuchungen erfolgt dann jeweils die genaue Definition der zu erreichenden Anforderungen.

4.2.1 Zugänglichkeit

Es soll gewährleistet sein, dass die Daten ohne größeren Aufwand eingesehen und weiterverarbeitet werden können. Dieser Punkt ist für die Lichtsignalsteuerung von untergeordneter Bedeutung, da es sich bei dieser Untersuchung um Daten handelt, die primär für die Lichtsignalsteuerung erhoben werden und die direkt in die Steuerung einfließen. Die Zugänglichkeit der Daten direkt für die Lichtsignalsteuerung ist also systembedingt gewährleistet. Eine weitergehende Einsichtmöglichkeit in die Daten für die Überprüfung der Steuerung im laufenden Betrieb ist jedoch ebenfalls von Interesse.

Für die offline-Verwendung der Daten ist es relevant, ob und wie lange die Daten zwischengespeichert werden. Weiterhin hat das dabei verwendete Datenformat einen entscheidenden Einfluss auf die Zugänglichkeit. Optimal ist die Ablage der Daten in einer Datenbank, wodurch auch ein einfacher Zugriff ermöglicht wird. Ist dies nicht möglich, sollten die Daten über einen Zeitraum von mindestens zwei Wochen gespeichert werden. In diesem Fall ist dann hinsichtlich des Datenformats aus Gründen der intuitiven Verständlichkeit der Daten das ASCII-Format zu bevorzugen. Werden Daten als Binär-Code abgelegt, sind Hinweise für deren Umwandlung und eventuell unterstützende Software bereitzuhalten.

4.2.2 Aktualität

Neben der langfristigen Verfügbarkeit der Daten ist es genauso wesentlich, ob die Daten zeitnah bzw. rechtzeitig für die entsprechende Anwendung vorliegen. Genau wie die Zugänglichkeit ist auch dieser Punkt bei der Lichtsignalsteuerung systembedingt gewährleistet.

Für weitergehende offline-Anwendungen ist es in vielen Fällen erforderlich, dass die Daten quasi bei ihrer Entstehung an entsprechende Datenbanken weitergegeben werden. Dabei werden aus Kommunikations- und Datenhaltungsgründen erforderliche Aggregationsintervalle von bis zu 5 min toleriert.

4.2.3 Zuverlässigkeit

Mit der Zuverlässigkeit der Daten wird beschrieben, ob die Daten zeitlich und räumlich konstant erhoben und weitergeleitet werden. Für die Beurteilung der zeitlichen Konstanz ist einerseits von Bedeutung, ob ein stetiger Datenfluss besteht und andererseits, ob erfolgende Aggregationsintervalle immer die gleiche Länge haben. Für die räumliche Konstanz der Daten ist die Abdeckung des Untersuchungsgebiets mit Zählstellen essentiell.

Hinsichtlich der Lichtsignalsteuerung ist für den Fall einer logikbasierten Steuerung nur die Stetigkeit des Datenflusses relevant, da keine Aggregation erfolgt und bei der logikbasierten Steuerung einzelner Lichtsignalanlagen nur die Daten der entsprechenden Lichtsignalanlage betrachtet werden. Gefordert wird hier eine Zuverlässigkeit von 98 %, um eine möglichst bedarfsgerechte Steuerung zu gewährleisten.

Dieser hohe Wert muss für die offline-Verwendung nicht eingehalten werden, da in diesem Fall die in der ersten Ebene der Datenfusion mögliche Messwertersetzung und die Verwendung von Ausgleichsverfahren eine gewisse Datenglättung bewirken kann. Fehlende Werte sind demzufolge weniger relevant. Dabei ist zu beachten, dass mehrere vereinzelt fehlende Werte weniger Auswirkungen auf die Anwendungen haben als ein zusammenhängender fehlender Datenblock.

Aus diesem Grund werden zwei Schwellenwerte festgesetzt: Gefordert wird eine Zuverlässigkeit von 95 %, und es dürfen nicht mehr als 10 aufeinander folgende Datensätze fehlen.

Die Länge der Aggregationsintervalle darf nur um 0,1 % variieren. Der sich daraus ergebende zulässige Fehler ergibt sich unabhängig von der Intervalllänge nach der folgenden Formel:

$$t_{\text{Fehl,max}} = f_{\text{zul}} \cdot t_{\text{ges}} \cdot 3600 \quad (4-1)$$

mit $t_{\text{Fehl,max}}$ = maximaler Gesamtfehler [s]
 f_{zul} = maximaler Fehler [%]
 t_{ges} = Untersuchungsdauer [h]

Bei einer Untersuchungsdauer von 12 h beträgt der zulässige Fehler demzufolge 43,2 s.

Die räumliche Konstanz der Daten ist wesentlich schwieriger zu beurteilen. Ideal für die weitere Verwendung wäre in vielen Fällen die Detektion auf allen Kanten des Untersuchungsgebiets einschließlich der Abbiegebeziehungen. Dies ist jedoch in der Regel nicht gegeben, da zum einen nicht an allen Knotenpunkten Lichtsignalanlagen notwendig bzw. vorhanden sind also keine Detektion erfolgt, und zum anderen an den bestehenden Lichtsignalanlagen häufig Mischströme vorliegen, so dass die genaue Richtung der Fahrzeuge nicht zweifelsfrei bestimmt werden kann.

Eine pauschale Aussage bezüglich eines ausreichenden Anteils detektierter Kanten lässt sich nicht treffen. Stattdessen ist für jeden Anwendungsfall abzuwägen, wie hoch dieser Anteil sein muss, um mit einem vertretbaren Aufwand ein optimales Ergebnis zu erzielen.

4.2.4 Vollständigkeit

Unter Vollständigkeit wird an dieser Stelle verstanden, ob alle benötigten Kennwerte erhoben werden. Für die Lichtsignalsteuerung ist es nicht von Belang, ob beispielsweise zwischen Pkw und Lkw unterschieden wird, da die unterschiedlichen Fahrzeugtypen in der Steuerung gleichrangig behandelt werden. Lediglich die gesonderte Erhebung von Nahverkehrsfahrzeugen muss gewährleistet sein, da diese in der Regel eine Bevorrechtigung erfahren, also erkannt werden müssen. Dies geschieht jedoch in den meisten Fällen über gesonderte Erfassungseinrichtungen, wie z. B. über Funkbaken.

Für die weitere Verwendung der Daten ist es bei einigen Anwendungszwecken relevant, dass eine Unterscheidung in Pkw und Lkw vorgenommen wird. Ebenso ist die Erkennung von Nahverkehrsfahrzeugen auch hier von Bedeutung. Eine weitere Unterteilung (z. B. in kleine Lkw und in Lastzüge) ist jedoch nicht notwendig.

4.2.5 Genauigkeit

Für die Beurteilung der Genauigkeit erfolgt ein Vergleich der detektierten Daten mit einer vergleichbaren Datenreihe, die mit der Realität gleichgesetzt wird. Dies kann zum einen eine Vergleichsmessung aber zum anderen auch eine historische Ganglinie sein. Entsprechend der Erkenntnisse aus der Literaturanalyse erreichen Detektoren Genauigkeiten zwischen 80 % und 100 %, wobei sich im Wesentlichen auf die absolut erhobenen Verkehrsstärken bezogen wird. Im Rahmen dieser Untersuchung erfolgt die Beurteilung der Genauigkeit über den Vergleich verschiedener statistischer Kenngrößen. Dazu gehören sowohl die absoluten Zahlen als auch der Korrelationskoeffizient, die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler (WMQF) und die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehlerproportional (WMQFP).

4.3 Beurteilung der Datenqualität

Die Qualitätsmaßstäbe Zugänglichkeit, Aktualität, Zuverlässigkeit und Vollständigkeit können allein anhand der technischen Beschreibung der Erfassungseinrichtungen und mit Hilfe der ausgewerteten Signalprogrammprotokolle beurteilt werden. An verschiedenen Knotenpunkten in Hannover fanden zudem Videobeobachtungen statt, um somit realistische Messreihen für die Überprüfung der Genauigkeit zu erhalten. Die Dauer der Videobeobachtungen betrug zwischen neun und dreizehn Stunden.

Bei einem direkten Vergleich von Messreihen besteht bei kleinen Intervallen die Möglichkeit, dass Fahrzeuge auf Grund des räumlichen Abstands der Messeinrichtungen und geringen Zeitabweichungen unterschiedlichen Intervallen zugeordnet werden. Andererseits ergibt sich bei größeren Messintervallen eine stärkere „Unschärfe“ der Ergebnisse, da positive Abweichungen negative ausgleichen. Aus diesem Grund werden in fast allen Fällen die Verkehrsstärken in 5 min-Intervallen und die dazugehörigen gleitenden 30 min-Mittelwerte betrachtet. Eine Ausnahme davon bilden einzelne Detailuntersuchungen, die auf in 1 min-Intervallen aggregierten Daten basieren.

Insgesamt wurden im Rahmen dieser Untersuchung 52 Detektoren analysiert. Bei einer Länge der Auswertintervalle von 5 min ergeben sich damit auch unter Berücksichtigung fehlender Intervalle aufgrund von Störungen der Lichtsignalanlage oder Wechsel der Videokassetten insgesamt 7117 betrachtete Intervalle. Eine Übersicht über die analysierten Detektoren und die zugehörigen Einzelergebnisse findet sich im Anhang.

4.3.1 Beurteilung der Zugänglichkeit

Die Daten werden entsprechend Bild 3.1 in einer Datenbank gespeichert. Von den einzelnen Bedienstationen, die bei den verschiedenen für die Lichtsignalanlagen verantwortlichen Behörden und Unternehmen positioniert sind, ist der Abruf der Daten problemlos möglich. Die Daten liegen in dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen Format vor, so dass sie nach einer kurzen Einführung einfach verständlich sind.

Fazit

Die Zugänglichkeit der Daten ist gewährleistet.

4.3.2 Beurteilung der Aktualität

Auch ein direktes Abgreifen der Daten ist möglich, erfordert allerdings einen etwas größeren Aufwand, da in diesem Fall eine Auswerteeinheit zwischen die Lichtsignalanlage und den Verkehrsrechner oder zwischen den Verkehrsrechner und die Datenbank geschaltet werden muss. Das Aggregationsintervall beträgt bei allen in der empirischen Untersuchung betrachteten Detektoren 1 min, kann jedoch variieren. Aus diesem Grund ist bei der Auswahl der zu untersuchenden Detektoren sicherzustellen, dass ausreichend kleine Aggregationsintervalle gebildet werden.

Fazit

Die Aktualität der Daten ist bei den hier untersuchten Detektoren gewährleistet.

4.3.3 Beurteilung der Zuverlässigkeit

Für die Zuverlässigkeit wurde definiert, dass die Verfügbarkeit der Daten in 95 % der Fälle für die offline-Verwendung und in 98 % der Fälle für die online-Verwendung gegeben sein muss.

Dabei sollen maximal 10 aufeinander folgende Datensätze fehlen. An dieser Stelle wird nur die offline-Verwendung getestet, da für die online-Verwendung keine aggregierten Datensätze verwendet werden. Ergeben sich Fehler in der Aggregation ist damit nicht nachgewiesen, dass diese Fehler auch in den Ausgangsdaten auftreten. Es zeigt sich, dass die Datensätze von 18 von 52 untersuchten Detektoren komplett sind. Damit wird die größte Gruppe repräsentiert. Ein besonders negatives Beispiel hinsichtlich der Zuverlässigkeit ist ein Detektor, bei dem 11,5 % der Datensätze fehlen. Bei allen anderen Untersuchungsstellen fehlen maximal 2,1 % der Daten. Damit beträgt der Erwartungswert für den Anteil fehlender Datensätze 0,86 % bei einer Varianz von 2,88 %. Führt man die gleiche Betrachtung ohne die Berücksichtigung der Untersuchungsstelle mit dem maximalen Fehler durch, sinkt der Erwartungswert bei einer Varianz von 1,28 % auf 0,65 %.

Die maximale Länge der fehlenden Datensätze beträgt an den meisten Untersuchungsstellen 1 bis 7 min. Lediglich in einem Beispiel ist dieser Wert mit 90 min wesentlich höher. Dieses ist der Wert, der für den Anteil von 11,5 % fehlender Daten verantwortlich ist. Extrahiert man ihn wiederum aus der Betrachtung beträgt der Erwartungswert für die maximale Länge fehlender Datensätze 1,1 min bei einer Varianz von 1,93 min.

Letztendlich soll die Länge der Aggregationsintervalle nicht um mehr als 0,1 % der Untersuchungsdauer schwanken. Wie in Abschnitt 4.2 bereits gezeigt wurde, entspricht dies während einer zwölfstündigen Untersuchung ungefähr 43 s. Dieses Kriterium wird an allen Untersuchungsstellen erfüllt; die maximale Schwankung der Länge der Aggregationsintervalle beträgt 0,06 %. Der Erwartungswert für diese Schwankung beträgt 0,02 %.

Fazit

Aufgrund mangelnder Zuverlässigkeit wird lediglich die Qualität der Daten an einer Untersuchungsstelle negativ beurteilt. An dieser Untersuchungsstelle fehlt ein Datensatz von 90 min, was einem Anteil von 11,5 % der Daten entspricht. An allen anderen Untersuchungsstellen werden die Kriterien erfüllt.

4.3.4 Beurteilung der Vollständigkeit

In den hier untersuchten Signalprogrammprotokollen erfolgt keine Unterscheidung der verschiedenen Fahrzeugarten. Es finden sich lediglich Informationen zu der Gesamtzahl erhobener Fahrzeuge innerhalb eines Intervalls. Weitere Kennwerte wie z. B. die Belegungszeit oder die Geschwindigkeit werden nicht erhoben. Nahverkehrsfahrzeuge melden sich gesondert an, sind also für die Berücksichtigung in der Steuerung identifizierbar.

Die Anforderung der Lichtsignalsteuerung an die Vollständigkeit entsprechend Abschnitt 4.2.4 sind also erfüllt. Für die weitere Verwendung der Daten wäre eine Unterscheidung in Pkw und Lkw wünschenswert, die nicht getroffen wird. Die Anforderungen sind also nicht erfüllt.

Fazit

Die Vollständigkeit der Daten für die Signalsteuerung ist gewährleistet. Für die weitere Verwendung wäre eine Unterscheidung in Pkw und Lkw wünschenswert.

4.3.5 Beurteilung der Genauigkeit

Die Betrachtung der absolut gemessenen Fahrzeuge an allen Detektoren in Bild 4.1 zeigt, dass etwa ein Drittel der Detektoren mit einer sehr hohen Genauigkeit von mehr als 90 % arbeitet, die Gesamtzahl der detektierten und der tatsächlich gefahrenen Fahrzeuge weicht also um nicht mehr als 10 % voneinander ab. Andererseits gibt es auch einen fast genauso großen Anteil an Detektoren, die eine Abweichung von mehr als 60 % von den gemessenen Daten registrieren. In welche Richtung diese Abweichung weist, wird im weiteren Verlauf noch untersucht.

Ein etwas anderes Bild zeichnet sich bei der Korrelationsanalyse und der Auswertung der weiteren Kenngrößen ab. Beispielhaft ist das Ergebnis der Korrelationsanalyse in Bild 4.2 zusammengefasst. Auch hier werden einige Detektoren besonders negativ beurteilt. Als Unterschied bleibt zu resultieren, dass nur wenige Detektoren über sehr geringe Abweichungen verfügen. Insgesamt wird also ein wesentlich negativeres Bild als die Beurteilung entsprechend der absoluten Zahlen wiederspiegelt.

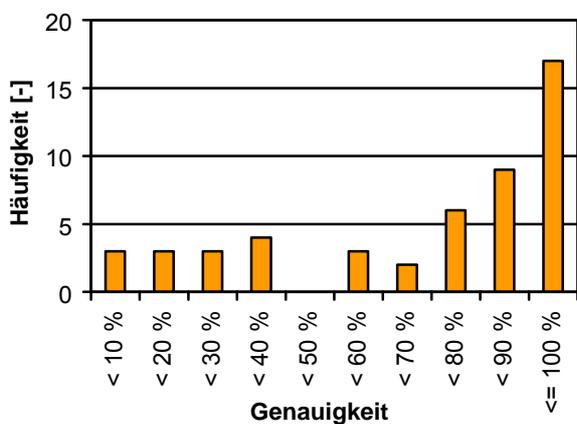


Bild 4.1: Häufigkeitsverteilung der Genauigkeit beurteilt anhand der absolut gemessenen Verkehrsstärken

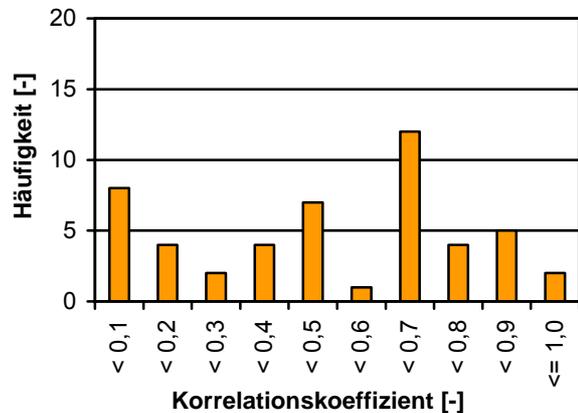


Bild 4.2: Häufigkeitsverteilung des Korrelationskoeffizienten

Sowohl die detektierten als auch die realen Messwerte der Verkehrsstärke unterliegen starken Schwankungen. Ein möglicher Zusammenhang dieser Schwankungen mit der Genauigkeit der Messwerte wird in Bild 4.3 untersucht. Jeder Datenpunkt kennzeichnet die Standardabweichung der Verkehrsstärke einer kompletten Messreihe. Um die Vergleichbarkeit der Werte miteinander zu gewährleisten, ist nicht die absolute Standardabweichung, sondern deren prozentualer Anteil vom Mittelwert der Messreihe dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass insbesondere Detektoren, an denen die Verkehrsstärke sehr stark schwankt, nur mit einer geringen Genauigkeit messen. Genauigkeiten von über 40 % werden nur erreicht, wenn die Standardabweichung weniger als 100 % des Mittelwerts beträgt. Weiterhin wird deutlich, dass besonders starke Schwankungen der tatsächlichen Verkehrsstärke von den Detektoren

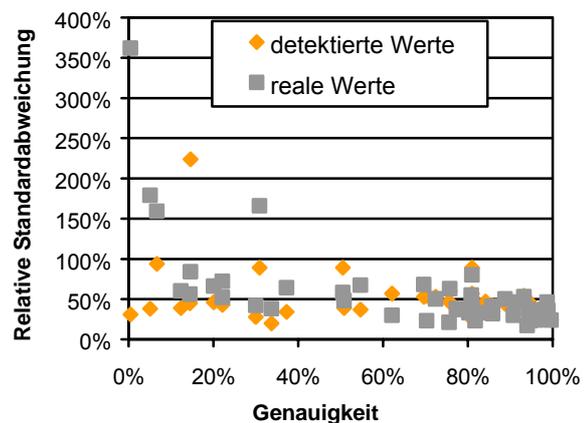


Bild 4.3: Relative Standardabweichung der Messwerte

nicht in der vollen Höhe aufgezeichnet werden, da die Standardabweichung der detektierten Werte insbesondere bei diesen Beispielen sehr viel geringer ausfällt. Andererseits fallen auch Wertepaare auf, bei denen die Schwankungen der detektierten Werte höher ausfallen als die der realen Messwerte.

Bei dieser Betrachtung ist jedoch zu beachten, dass die Erhebungen nicht über 24 Stunden sondern nur innerhalb eines Zeitraums von 9 bis 13 Stunden erfolgten. Bezöge man die Nacht in die Betrachtung ein, wäre davon auszugehen, dass sich größere Schwankungen um den Mittelwert ergeben würden, da das Verkehrsaufkommen während dieser Zeit sehr viel geringer ist.

Insgesamt kann aufgrund dieser Betrachtung geschlussfolgert werden, dass sich aus der alleinigen Betrachtung der Standardabweichung der Verkehrsstärken keine Aussagen über die Genauigkeit der Detektion ableiten lassen.

Die bisher gezeigten Ergebnisse werfen die Frage auf, ob es sich bei den gezeigten Ungenauigkeiten um zufällig auftretende negative Ergebnisse oder um immer wiederkehrende Fehler handelt. Beispielhaft ist in Bild 4.4 der Vergleich der absoluten detektierten Messwerte mehrerer Tage für die Detektoren zweier sehr nah beieinander liegender Knotenpunkte in der Zeit von 6 h bis 19 h dargestellt. Gelb gekennzeichnet sind sieben Vergleichsmessungen aus dem Monat Februar. Diese Messungen wurden alle an Werktagen ausgenommen freitags durchgeführt. Damit gehören die zugehörigen Ganglinien nach CHROBOK [9] zu der gleichen Musterganglinie, sind also miteinander vergleichbar. Weiterhin sind in orange die detektierten Verkehrsstärken am 7. September desselben Jahres sowie in grau die tatsächliche Verkehrsstärke dieses Tages dargestellt.

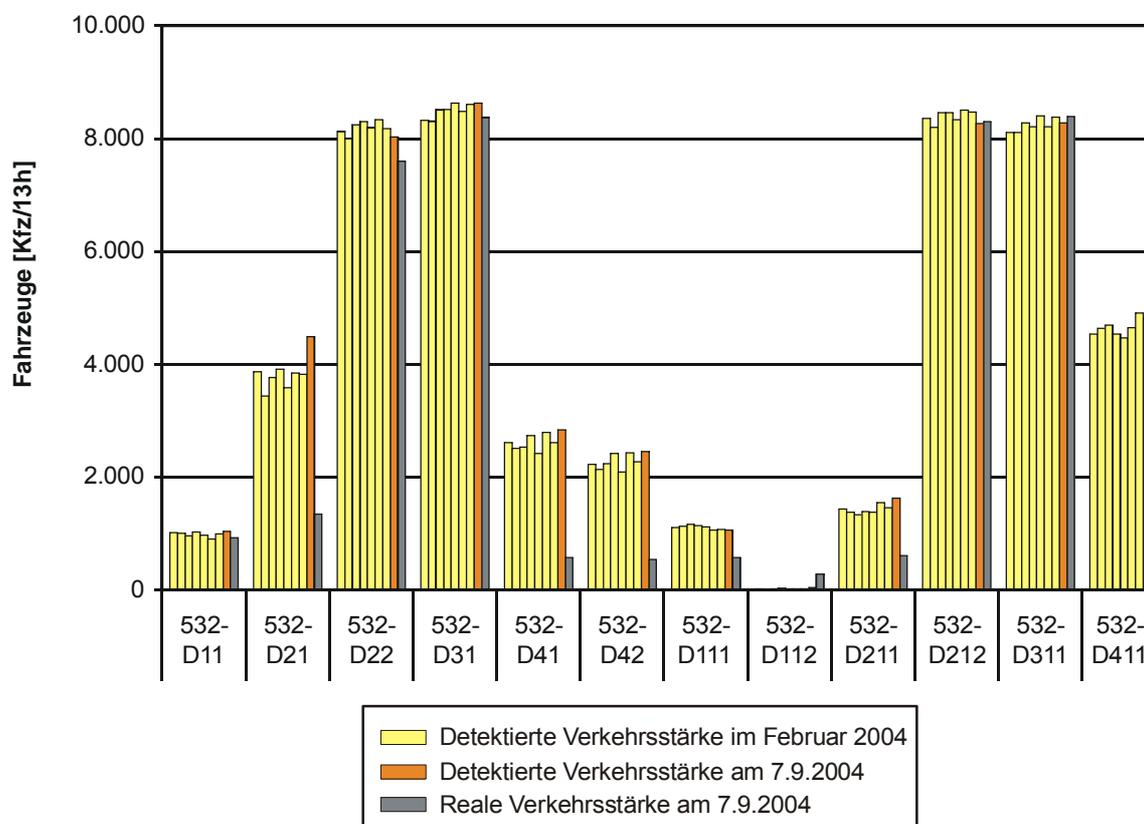


Bild 4.4: Vergleich der Messungen verschiedener Tage an den Detektoren der Gruppe 532

Die detektierten Verkehrsstärken aus dem Februar bewegen sich für jeweils einen Detektor immer auf dem gleichen Niveau. Die Abweichungen vom Mittelwert dieser Messungen, berechnet anhand der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehlerproportional, liegen zwischen 1 % und 5 %. Eine Ausnahme bildet der Detektor 532-D112. An diesem schwankt die detektierte Verkehrsstärke zwischen 12 Kfz/13h und 30 Kfz/13h, die Abweichungen sind also aufgrund der geringen zugrunde liegenden Basis sehr viel größer. Auch die detektierten Verkehrsstärken am 7. September bewegen sich an fast allen Detektoren in der gleichen Größenordnung. Eine Ausnahme hiervon bildet lediglich der Detektor 532-D21, an welchem im September ein um 20 % höheres Verkehrsaufkommen als an den Vergleichstagen aus dem Februar gemessen wurde. Betrachtet man nun jedoch im Vergleich zu diesen in aller Regel recht homogenen Werten die tatsächlichen Verkehrsstärken des 7. Septembers, erkennt man an einigen Detektoren wie oben bereits angedeutet, große Unterschiede zwischen den detektierten und den tatsächlichen Verkehrsstärken. Da nicht davon auszugehen ist, dass das Verkehrsaufkommen an den Vergleichstagen im Februar sich erheblich von dem im September unterscheidet, kann man anhand dieser Betrachtung erkennen, dass die Tendenz der Fehlmessungen eines Detektors nicht zufällig auftritt, sondern auch über einen längeren Betrachtungszeitraum immer der gleichen Richtung folgt.

Im Folgenden werden besonders ungünstige Ergebnisse eingehend auf die Ursachen für die Fehlmessungen untersucht. Diesen Ursachen werden vier verschiedene Fehlertypen zugeordnet, hinsichtlich derer dann auch die weiteren Messreihen untersucht werden. Anhand verschiedener Clusterbildungen der untersuchten Detektoren und der Analyse vorhandener Abhängigkeiten wird versucht, die Fehlertypen sowohl in Bezug auf ihre Auftretenswahrscheinlichkeit als auch in Bezug auf die zu erwartende Größe in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren einzugrenzen.

Zusammenstellung der auftretenden Fehlertypen

Auffällig sind die von verschiedenen Detektoren erhobenen wesentlich zu hohen Verkehrsstärken. Einige besonders prägnante Beispiele sind in Bild 4.5 dargestellt. Die aufgeführte Anzahl der Fahrzeuge bezieht sich dabei immer auf die gesamte Messdauer, beträgt also in fast allen Fällen 13 Stunden. Der Detektor 599-D51 bildet eine Ausnahme, da er nur über einen Zeitraum von 10 Stunden analysiert wurde. Die automatisch erhobenen Verkehrsdaten übersteigen in diesen Beispielen das tatsächliche Verkehrsaufkommen um 700 % bis mehr als 2000 %.

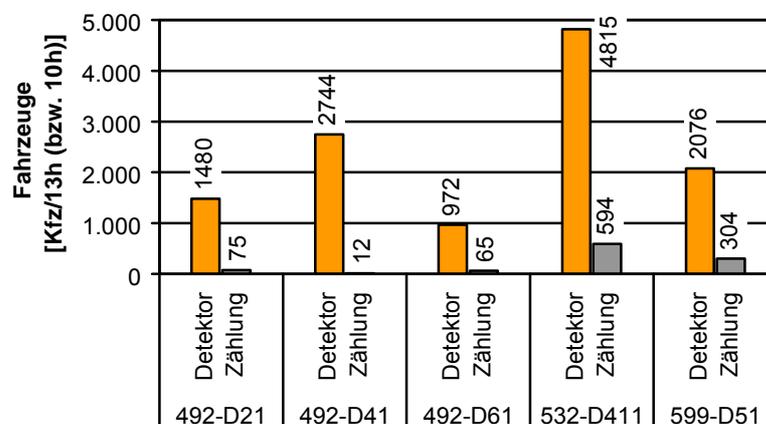


Bild 4.5: Überprüfung der Genauigkeit bezüglich der absoluten Werte

Auch die Korrelationsanalyse und die Betrachtung der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehlerproportional zeigen für diese Detektoren besonders geringe Übereinstimmungen zwischen der automatisch erhobenen und der tatsächlichen Verkehrsstärke. Auffallend ist z. B., dass es sich bei den zugeordneten Korrelationskoeffizienten um die einzigen Beispiele handelt, die unter Null liegen.

Als Beispiel für die detaillierte Analyse wird an dieser Stelle der Detektor 492-D21 herausgegriffen. Die Korrelationsanalyse der an diesem Detektor gezählten Verkehrsstärke mit der tatsächlichen Verkehrsstärke aller Detektoren des entsprechenden Knotenpunkts zeigt eine starke Ähnlichkeit der detektierten Werte zu den gezählten Fahrzeugen des Stroms 492-D81, der auf dem links benachbarten Fahrstreifen in entgegengesetzter Richtung verläuft und eine fast genauso große Ähnlichkeit zu denen des Stroms 492-D11, der rechts am Detektor in die gleiche Richtung vorbeiführt. (vgl. Tabelle 4.1 und Bild 4.6).

Bezieht man nicht nur diesen Strom in die Untersuchung mit ein, sondern auch die weiteren relevanten Nachbarströme (also 492-D11 und den Anteil der Fahrzeuge, die von 492-D31 rechts abbiegen), erhält man den in Bild 4.8 dargestellten Vergleich. Die aus der südlichen Knotenpunktzufahrt ausfahrenden Fahrzeuge werden für diese Betrachtung als nicht relevant angesehen, da die Verkehrsstärke mit 5 Kfz/h insgesamt sehr gering ist und sich zusätzlich auf alle drei möglichen Richtungen aufteilt. Im Gegensatz zu der gemeinsamen Betrachtung mit den Nachbarströmen zeigt Bild 4.7 den Vergleich der detektierten Werte mit der realen Verkehrsstärke nur des zugeordneten Stroms.

Tabelle 4.1: Überprüfung der Genauigkeit des Detektors 492-D21 – Korrelationsanalyse

Zählung \ Detektor	492-D11	492-D21	492-D31	492-D41	492-D51/52	492-D61	492-D71	492-D81
492-D21	0,51	-0,02	0,22	0,04	-0,03	0,13	0,17	0,66

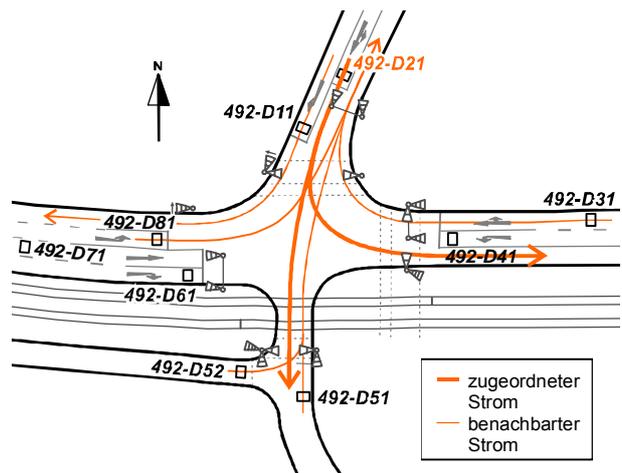


Bild 4.6: Benachbarte Ströme zu 492-D21

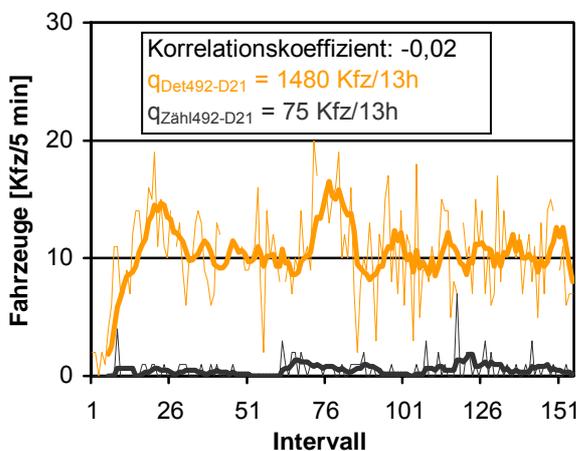


Bild 4.7: Analyse der Messwerte 492-D21

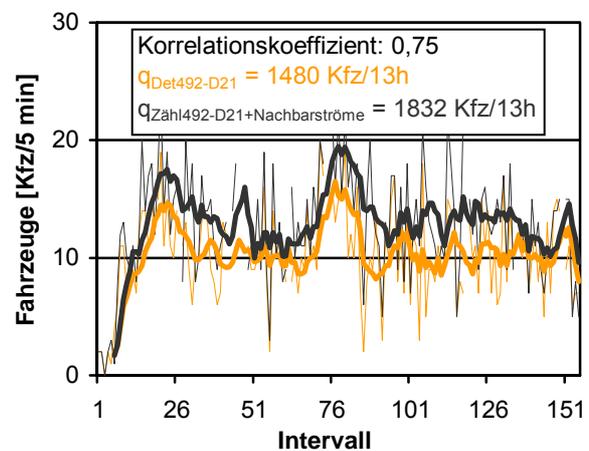


Bild 4.8: Analyse der Messwerte 492-D21 einschließlich der Nachbarströme

In beiden Diagrammen wird die automatisch detektierte Verkehrsstärke durch die dünne orangefarbene Linie und die tatsächliche Verkehrsstärke durch die dünne graue Linie repräsentiert. Die kräftigeren Linien zeigen jeweils den gleitenden Mittelwert über eine halbe Stunde. Aus dem Vergleich der beiden Bilder ist zu erkennen, dass der Korrelationskoeffizient bei Einbeziehung der Nachbarfahrstreifen von -0,02 auf 0,75 steigt. Es besteht also eine große Ähnlichkeit der durch den Detektor 492-D21 detektierten Verkehrsstärke mit der gezählten Verkehrsstärke des zugeordneten Stroms einschließlich aller benachbarten Ströme. Dieses wird durch den augenscheinlichen Vergleich der beiden Reihen bestätigt. Insgesamt liegt für diesen Fall die detektierte Verkehrsstärke 20 % unter der gezählten. Aus diesen Beobachtungen kann gefolgert werden, dass große Teile der benachbarten Ströme mitdetektiert werden.

Den gleichen Zusammenhang kann man für den Detektor 492-D41 und in etwas geringerem Maße für die Detektoren 532-D411 und 531-D51 nachweisen. Auch in diesen Fällen deuten hohe Korrelationskoeffizienten zu nicht assoziierten Messreihen auf die zusätzliche Erhebung der Nachbarströme hin. Die genaue Analyse zeigt, dass jeweils gewisse Anteil aller benachbarten Ströme zusätzlich erhoben werden. Es handelt sich hierbei also um einen systematischen Fehler, der an verschiedenen Beispielen auftritt und im weiteren Verlauf näher betrachtet werden soll.

Für den Detektor 492-D61, der auf dem Rechtsabbiegestreifen aus Westen angeordnet ist, kann dieser Effekt ausgeschlossen werden, da auch die Korrelationskoeffizienten zu anderen Strömen keine Ähnlichkeiten andeuten, wie in Tabelle 4.2 dargestellt ist. Direkt benachbart zu dem relevanten Strom ist nur der Verkehrstrom, der den Detektor 492-D71 überfährt.

Dessen Messreihe weist auch in der gemein-

gemeinsamen Betrachtung mit 492-D61 keine Ähnlichkeit zu den detektierten Werten auf. Auffallend an den von 492-D61 detektierten Werten sind starke Schwankungen, die in den meisten Fällen zwischen 10 Kfz/5min und 20 Kfz/5min liegen, aber in einigen Fällen auch höher sind. Zwischen diesen Spitzen verläuft die detektierte Verkehrsstärke ähnlich niedrig wie die tatsächlich vorhandene. Eine minutengenaue Analyse der Videobänder über zwei Stunden lässt einen Zusammenhang mit den in unmittelbarer Nachbarschaft (ca. 3 m und 7 m) fahrenden Straßenbahnen erkennen. Wie in Bild 4.9 dargestellt ist, verursacht jede vorbeifahrende Straßenbahn einen deutlichen Ausschlag der Messergebnisse, der in der Regel bei den stadteinwärts fahrenden Fahrzeugen stärker ausfällt, da deren Entfernung zu dem Detektor geringer ist, als bei den stadtauswärts fahrenden Fahrzeugen.

Von den untersuchten Detektoren liegen 19 in einer Entfernung von weniger als 10 m zu einer Straßenbahntrasse. Deren Einfluss auf die Qualität der Messung erscheint in vier Untersuchungsbeispielen als sicher und in vier weiteren Untersuchungsbeispielen als wahrscheinlich. Es handelt sich dabei also ebenfalls um einen Fehler, der in der detaillierten Analyse näher betrachtet werden muss.

Tabelle 4.2: Überprüfung der Genauigkeit des Detektors 492-D61 – Korrelationsanalyse

Zählung \ Detektor	492-D11	492-D21	492-D31	492-D41	492-D51/52	492-D61	492-D71	492-D81
492-D61	0,17	-0,17	0,07	-0,19	-0,10	-0,16	-0,13	0,04

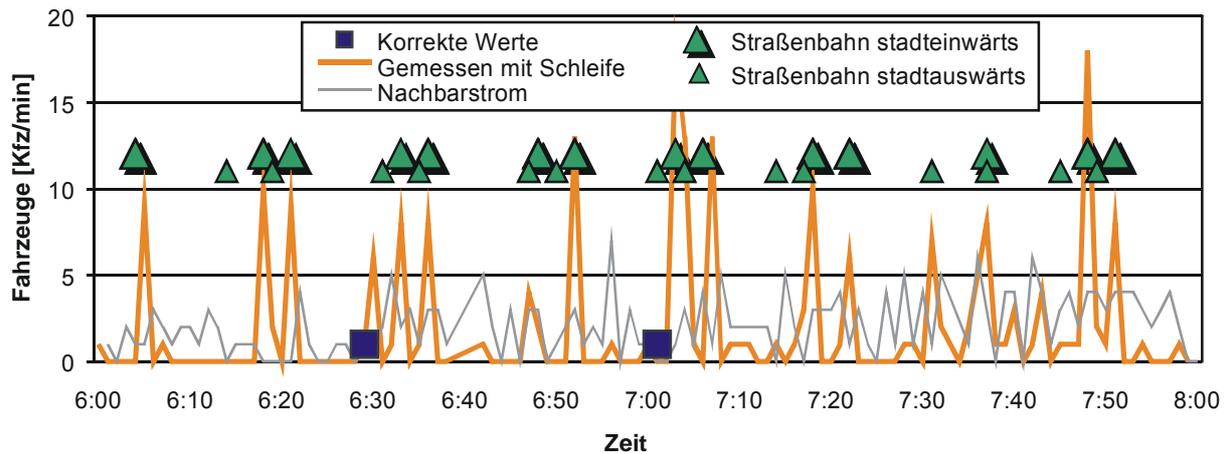


Bild 4.9: Einfluss der Straßenbahn auf 492-D61

Wie bei der obigen Analyse der zusätzlichen Detektion benachbarter Fahrstreifen bereits angedeutet, messen viele Detektoren nicht die gesamte Anzahl passierender Fahrzeuge sondern oft nur einen gewissen aber nicht konstanten Anteil. Weitere Beispiele für dieses Phänomen sind in Bild 4.10 und in Bild 4.11 dargestellt, wobei wiederum die jeweils dünneren Linien die Verkehrsstärke in 5 min repräsentieren und die stärkeren Linien den gleitenden Mittelwert über 30 min kennzeichnen.

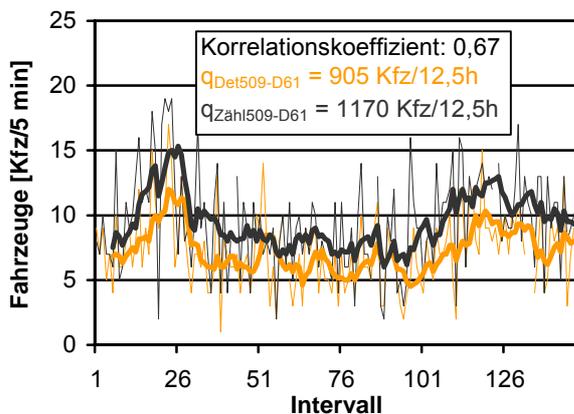


Bild 4.10: Ganglinienvergleich 509-D61

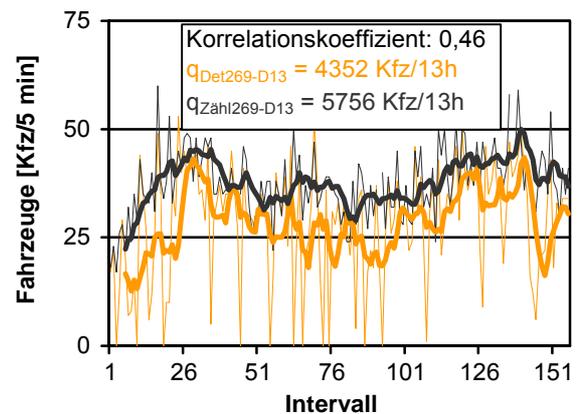


Bild 4.11: Ganglinienvergleich 269-D13

Es ist ersichtlich, dass dieser Fehler in zwei unterschiedlichen Ausprägungen auftritt. Bild 4.10 zeigt die Variante, dass der gleitende Mittelwert für die protokollierte Verkehrsstärke immer etwas niedriger als derjenige für das reale Verkehrsaufkommen liegt. In der Regel ist die Genauigkeit hinsichtlich der absoluten Zahlen in diesem Fall nicht besonders hoch, aber der Korrelationskoeffizient spiegelt eine große Ähnlichkeit wider. Prinzipiell sind die Ganglinien also nur um einige Fahrzeuge verschoben. Dieser Fehler ist besonders relevant, da er sehr häufig auftritt. Allerdings kann er erst näher untersucht werden, nachdem festgestellt ist, ob und in welchem Maß zusätzliche Verkehrsströme gezählt werden.

Die andere Variante für die Messung einer zu geringen Verkehrsstärke ist in Bild 4.11 dargestellt. Auffallend sind die vielen Ausreißer der detektierten Ganglinie nach unten, die für einige Intervalle sogar eine Verkehrsstärke von 0 Kfz/5min anzeigen. Entsprechend der ursprünglichen Daten sind in mehreren aufeinander folgenden Intervallen keine Fahrzeuge detektiert worden. Die detaillierte

Analyse dieser Daten zeigt zusätzlich weitere Intervalle, in denen ebenfalls keine Fahrzeuge detektiert wurden. Aufgrund der beobachteten Verkehrsstärke in den angrenzenden Intervallen ist es jedoch sehr unwahrscheinlich, dass wirklich keine Fahrzeuge den Detektor passiert haben. Dies bedeutet, dass anstelle von Fehlermeldungen bei einer Funktionsstörung der Wert Null übermittelt wird.

Im Gegensatz zu diesem Phänomen gibt es auch einige Detektoren, an denen nicht zu wenig sondern zu viele Fahrzeuge gemessen werden, die im Unterschied zu den oben beschriebenen häufig beobachteten Fällen nicht dem Nachbarstrom oder passierenden Straßenbahnen zuzuordnen sind. Diese Fahrzeuge werden auch als Phantomfahrzeuge bezeichnet. Ein Beispiel ist in Bild 4.12 dargestellt. In weiten Teilen stimmen die Ganglinien gut überein, aber in mehreren Intervallen ist die detektierte Verkehrsstärke um einige Fahrzeuge höher als die tatsächliche Verkehrsstärke. Es kann ausgeschlossen werden, dass diese Ausschläge durch die zusätzliche Erfassung des Nachbarstroms oder vorbeifahrender Straßenbahnfahrzeuge erzeugt werden, da bei Berücksichtigung der Nachbarströme der Korrelationskoeffizient sinkt, also eine geringere Vergleichbarkeit der beiden Ganglinien bezugt wird und keine Straßenbahntrasse am Detektor vorbeiführt.

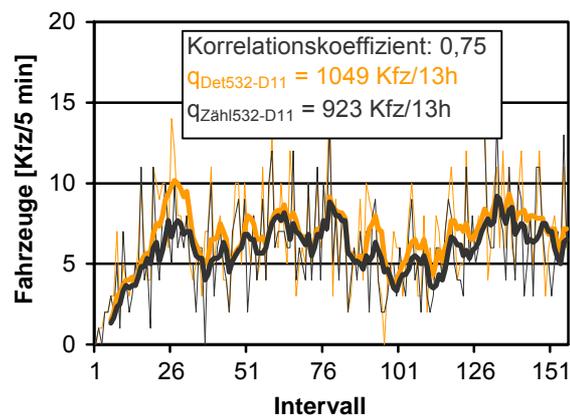


Bild 4.12: Ganglinienvergleich 532-D11

Fehlertyp 1: Fahrzeuge benachbarter Ströme werden mitgezählt

Von den untersuchten 52 Detektoren haben fast alle Detektoren benachbarte Ströme, die entweder in dieselbe oder in die entgegengesetzte Richtung wie der zugeordnete Strom fahren. Lediglich in einem Fall befindet sich neben dem Detektor auf einer Seite eine Sperrfläche und auf der anderen Seite die Fahrbahnbegrenzung, es gibt also keinen direkt benachbarten Strom. In zwei weiteren Zufahrten können jeweils zwei Detektoren aufgrund der Einstellungen der Videoaufnahmen nicht differenziert beurteilt werden, so dass eine Untersuchung, ob die einzelnen Detektoren auch Fahrzeuge der benachbarten Ströme zählen, nicht möglich ist. Weiterhin existieren bei neun Untersuchungsstellen sogar gleich zwei Nachbarströme. Eine besondere Stellung wird von einem Detektor eingenommen, der nicht vor, sondern hinter der Haltlinie liegt und damit inmitten der Konfliktfläche angeordnet ist. Dieser Detektor hat daher nicht nur rechts und links Nachbarströme, die in die gleiche oder in die entgegengesetzte Richtung verkehren, sondern er hat auch vorne und hinten Nachbarströme, die quer zu der Richtung des relevanten Stroms verlaufen.

Die Wahrscheinlichkeit sowie die Stärke für einen möglichen Einfluss dieser benachbarten Ströme auf die Größe des Fehlertyps 1 variiert in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren. Dazu können unter anderem gehören:

- die Anzahl der benachbarten Ströme,
- die Verkehrsstärke des zugeordneten Stroms,
- die möglichen Freigabezeiten der zugeordneten und der benachbarten Signalgruppen,
- die Lage der Detektoren und
- die Größe der Detektoren.

Diese Einflussfaktoren werden im Folgenden genau analysiert und es wird versucht, die Stärke des ausgeübten Einflusses zu quantifizieren.

Als erstes wird dabei auf die Anzahl der benachbarten Ströme eingegangen. Dafür wird in Tabelle 4.3 für die unterschiedliche Anzahl benachbarter Ströme gegenübergestellt, wie hoch die durchschnittliche Genauigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl benachbarter Ströme ist. Sowohl bei der Betrachtung der absoluten Werte als auch bei der Betrachtung von Korrelationskoeffizient und der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler wird die höchste Genauigkeit für den Detektor ohne Nachbarn erreicht. Die geringste Genauigkeit erzielt der Detektor mit mehr als zwei Nachbarn. Da dessen Lage inmitten der Konfliktfläche besonders ungünstig hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit ist und er außerdem ein nicht repräsentatives Beispiel ist, wird dieser Detektor aus den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen. Bei den anderen beiden Fällen, also den Detektoren, die über einen bzw. über zwei Nachbarströme verfügen, kann keine Tendenz abgelesen werden, da sich die Kennwerte jeweils nicht stark unterscheiden.

Tabelle 4.3: Genauigkeit der Messung in Abhängigkeit von der Anzahl benachbarter Ströme

		Anzahl der benachbarten Ströme			
		0	1	2	> 2
durchschnittliche Genauigkeit	absolute Werte	0,97	0,68	0,65	0,34
	Korrelationskoeffizient	0,86	0,45	0,45	0,10
	WMQF	6,04	9,36	8,18	25,69

In den folgenden Betrachtungen wird nicht nur untersucht, ob ein benachbarter Strom zusätzlich detektiert wird, sondern auch zu welchem Anteil dies geschieht. Dieser Anteil wird im Folgenden als Detektionsrate bezeichnet. Um diese zu ermitteln, wird jeweils die Ganglinie der gezählten Werte eines Fahrzeugstroms der Ganglinie der detektierten Werte des betrachteten Stroms einschließlich eines gewissen Anteils der Nachbarströme gegenübergestellt und mithilfe der verschiedenen statistischen Kennwerte analysiert. Die Detektionsraten der Nachbarströme und auch die Detektionsrate des betrachteten Stroms werden solange variiert, bis die Kennwerte eine maximale Übereinstimmung der beiden Ganglinien widerspiegeln.

Ein Merkmal der hier betrachteten Detektoren ist, dass sie prinzipiell nur jeweils ein Fahrzeug detektieren können. Wird der Detektor also von einem ihm zugeordneten Fahrzeug, welches er auch messen soll, belegt, kann er während des entsprechenden Zeitintervalls kein weiteres Fahrzeug messen. Aus diesem Grund nimmt die Detektionsrate der Nachbarströme mit der Verkehrsstärke auf dem eigenen Detektor ab, wie auch in Bild 4.13 getrennt für die Fälle, dass es nur einen oder zwei Nachbarströme gibt, dargestellt ist. Ab einer Verkehrsstärke von ungefähr 200 Kfz/h sinkt die Detektionsrate der Nachbarströme signifikant, so dass ein Grenzwert von 40 % nicht mehr überschritten wird. In geringerem Verkehrsstärkebereich sind dahingegen sogar vollständige Detektionen der Nachbarströme zu beobachten.

Weiterhin ist auffällig, dass die besonders hohen Werte immer an Detektoren gemessen werden, die über zwei Nachbarströme verfügen. In den meisten Fällen handelt es sich hierbei um Fahrstreifen, die angrenzend an die entgegengesetzte Fahrtrichtung angeordnet sind und besonders häufig einbiegende Fahrzeuge in die entsprechende Zufahrt detektieren, da diese nicht immer in der Mitte ihres Fahrstreifens fahren. Für diese Detektoren ergibt sich als Erwartungswert für die zusätzliche Detektion benachbarter Fahrstreifen eine Detektionsrate von 48 %.

In Bild 4.14 ist die Wahrscheinlichkeit für die Mitdetektion der Nachbarströme für Detektoren, die nur einen Nachbarstrom haben, dargestellt. Mit dem Ziel, eine bessere Übersichtlichkeit zu gewährleisten, wurden die Detektionsraten der Nachbarströme dafür in Klassen von jeweils 10 % eingeteilt. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei diesen Detektoren diejenigen überwiegen, die weniger als 10 % der benachbarten Ströme zusätzlich detektieren. Der Erwartungswert für diese Betrachtung beträgt 20,8 % bei einer Streuung von 4,2 %. Unabhängig von der Anzahl der benachbarten Ströme ist jedoch auf keinen Fall der Zusammenhang zu vernachlässigen, dass bei höheren Verkehrsstärken bestimmte Detektionsraten nicht überschritten werden.

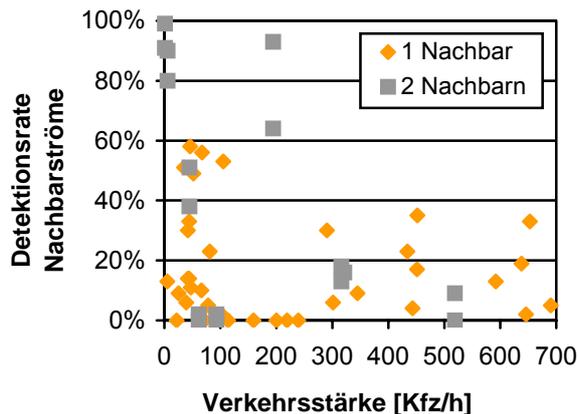


Bild 4.13: Detektion der Nachbarströme in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke

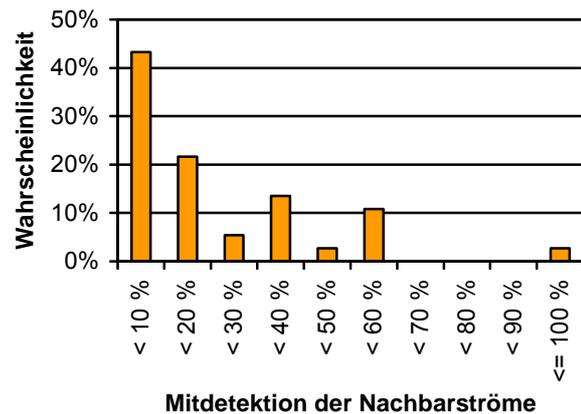


Bild 4.14: Wahrscheinlichkeit für die Mitdetektion eines einzigen vorhandenen Nachbarstroms

Wie oben bereits erläutert wurde, kann ein Detektor zu einem Zeitpunkt immer nur ein Fahrzeug zählen. Ist die zugeordnete Signalgruppe gesperrt, ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Fahrzeug des eigenen Stroms auf dem Detektor befindet, höher als in dem Fall, dass die zugeordnete Signalgruppe freigegeben ist, da in letzterem Fall der Verkehr in der Regel ungestört abfließt und die Detektoren nur sehr kurz durch die Fahrzeuge belegt werden. Aus diesem Grund ist zu vermuten, dass während der Sperrzeit die Beeinflussung durch Fahrzeuge des Nachbarstroms geringer ist. Während der Freigabezeit des zugeordneten Stroms ist die Wahrscheinlichkeit der Beeinflussung durch Nachbarströme dann umso höher je größer der Anteil der Zeit ist, in welcher der Nachbarstrom gleichzeitig freigegeben ist, da nur während dieser Zeit die Fahrzeuge am Detektor vorbeifahren können. Dieser Zusammenhang relativiert sich jedoch bei zunehmender Entfernung des Detektors von der Haltlinie, da zum einen die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug des zugeordneten Stroms die Haltlinie belegt, geringer ist und zum anderen die Fahrzeit der benachbarten Ströme von der eigenen Haltlinie bis zum Passieren des betrachteten Detektors an Relevanz gewinnt. Bei den hier untersuchten Detektoren ist es jedoch in mehr als 70 % der Fälle so, dass der benachbarte Strom während der gesamten Freigabezeit gleichzeitig mit dem untersuchten Strom freigegeben ist. Bei diesen Detektoren schwankt die Detektionsrate der Nachbarströme von 0 % bis 80 %. Die Ergebnisse der wenigen verbleibenden Untersuchungsstellen spiegeln kein klares Bild wider, so dass die aufgestellte Hypothese weder bestätigt noch widerlegt werden kann.

Ähnlich verhält es sich bei der Analyse der Lage der Detektoren. Während die Genauigkeit der Detektoren in Bezug auf die absolut detektierte Verkehrsstärke bei besonders haltliniennaher Lage stark schwankt und bei den wenigen Beispielen, die weiter entfernt von der Haltlinie ange-

ordnet sind, sehr viel höher ist (vgl. Bild 4.15), zeigt sich trotz dieser vermeintlich guten Werte für die weiter entfernten Detektoren, dass auch diese in einigen Fällen einen großen Anteil der benachbarten Ströme zusätzlich detektieren (vgl. Bild 4.16). In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass in ca. 85 % der Fälle, in denen die Detektoren weiter als 10 m von der Haltlinie entfernt sind, es sich um Zeitlückendetektoren für die Freigabezeitbemessung entlang der Hauptrichtung des Knotenpunkts handelt. Es handelt sich also auch um die am stärksten belasteten Detektoren, so dass die hohe Genauigkeit und die geringe Detektionsrate der Nachbarströme im Wesentlichen auf dem bereits erläuterten Zusammenhang mit der Verkehrsstärke beruht.

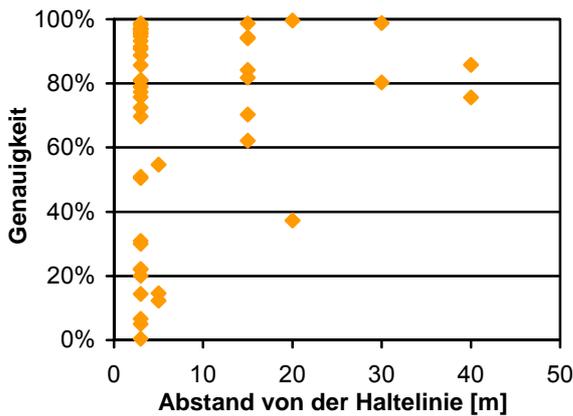


Bild 4.15: Genauigkeit bezüglich der absoluten Werte in Abhängigkeit von der Lage der Detektoren

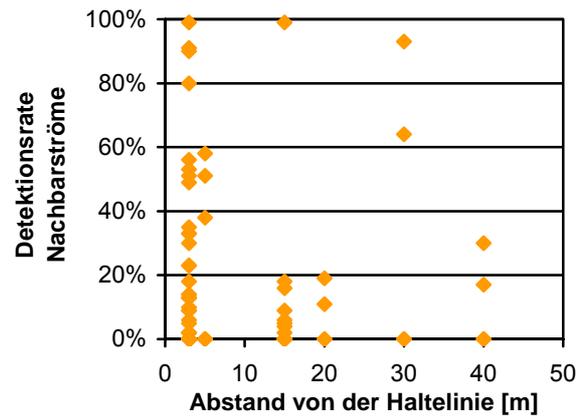


Bild 4.16: Detektionsrate der Nachbarströme in Abhängigkeit von der Lage der Detektoren

Die Verstimmung, die ein vorbeifahrendes Fahrzeug auf das von einem Detektor erzeugte Magnetfeld ausübt, ist unter anderem abhängig von der Länge der Detektoren. So ist bei längeren Induktivschleifendetektoren laut Merkblatt über Detektoren für den Straßenverkehr [21] die Gefahr größer, dass Fahrzeuge auf benachbarten Fahrstreifen zusätzlich gezählt werden. Um diesen Zusammenhang zu untersuchen, wird in Bild 4.17 die Länge der Schleifen betrachtet. Dargestellt sind für die beiden hier vorkommenden unterschiedlichen Detektorlängen von 3 m und 8 m die Spannen aller registrierten Detektionsraten der Nachbarströme sowie der Mittelwert der Detektionsraten. Zusätzlich ist die durchschnittliche Verkehrsstärke dargestellt um Fehldeutungen aufgrund nicht betrachteter Mehrfachkorrelationen zu vermeiden.

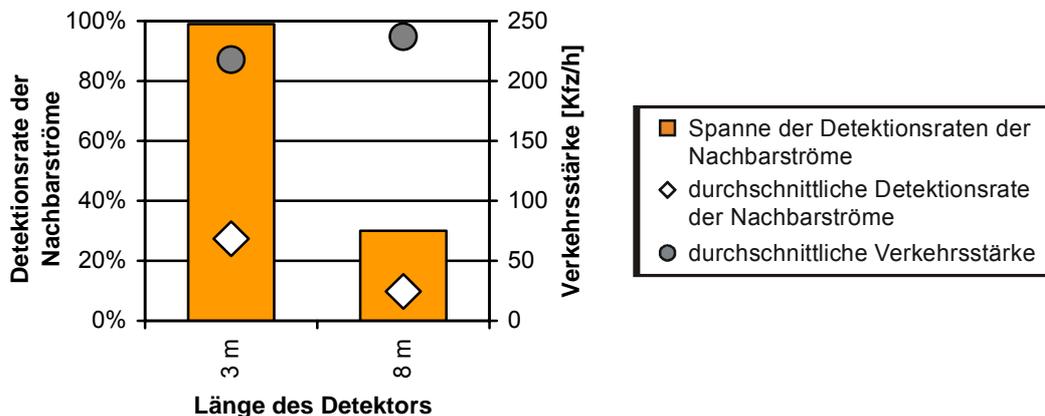


Bild 4.17: Detektionsrate der Nachbarströme in Abhängigkeit von der Länge des Detektors

Es wird deutlich, dass in diesem Fall nicht die längeren Detektoren sondern die kurzen eine vermehrte Detektionsrate der Nachbarströme aufweisen. Die durchschnittliche Detektionsrate der Nachbarströme der nur 3 m langen Detektoren beträgt 27 % während sie für 8 m lange Detektoren lediglich 10 % beträgt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die durchschnittliche Verkehrsstärke auf letzteren etwas höher ist, also auch aus diesem Grund eine etwas bessere Datenqualität zu erwarten ist. Allerdings treten die besonders hohen Detektionsraten der Nachbarströme allesamt bei kurzen Detektoren auf. Die im Merkblatt über Detektoren beschriebene Tendenz, dass längere Detektoren eher zu der Mitdetektion der Nachbarströme neigen, kann demzufolge aus den hier erfolgten Untersuchungen nicht bestätigt werden.

Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden mitgezählt

Von den untersuchten Detektoren sind 19 so angeordnet, dass mindestens eine Richtung einer Straßenbahntrasse in einer Entfernung von weniger als 10 m verläuft. Wie oben bereits erwähnt, erscheint es bei vier dieser Detektoren wahrscheinlich, dass sie vorbeifahrende Straßenbahnfahrzeuge erfassen. Bei vier weiteren Detektoren sind ebenfalls einzelne Ausschläge, die teilweise zeitgleich mit dem Vorbeifahren einer Straßenbahn auftreten, in der Detektion zu verzeichnen.

Bei der genauen Analyse dieses Effekts ergeben sich jedoch mehrere Schwierigkeiten:

- Die zusätzliche Erfassung von Straßenbahnfahrzeugen ist in den meisten Fällen kein einzeln auftretender Fehler, sondern wird von übergeordneten Effekten überlagert.
- Auf den meisten Strecken verkehren Straßenbahnfahrzeuge mit unterschiedlichen Längen.
- Aus diesen Gründen ist es nicht möglich, den Einfluss eines einzelnen Fahrzeugs zu quantifizieren.
- Im Umkehrschluss ist es also nicht möglich, Ausschläge einer bestimmten Größe auf die Straßenbahn zurückzuführen.

Prinzipiell ist jedoch davon auszugehen, dass es sich bei dem Fehlertyp 2 lediglich um eine Sonderform des Fehlertyps 1 handelt. Der Unterschied besteht ausschließlich in der Art des zusätzlich erfassten Stroms. Es können also die gleichen Gesetzmäßigkeiten für die zusätzliche Beeinflussung angenommen werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Auswirkungen dieses Fehlers zeitlich sehr viel konzentrierter auftreten, als bei einer quasi-konstanten Beeinflussung wie sie zuvor untersucht wurde.

Fehlertyp 3: Nichterfassung von Fahrzeugen

Analog zu der Ermittlung der Detektionsrate der benachbarten Ströme erfolgt die Ermittlung der Detektionsrate des betrachteten Stroms. Die konkrete Vorgehensweise ist auf Seite 39 beschrieben. Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit der Untersuchung, wodurch die Quote nicht erfasster Fahrzeuge beeinflusst wird. Mögliche Randbedingungen sind

- die Verkehrsstärke,
- die Größe der Detektoren und
- die Lage der Detektoren.

In Bild 4.18 sind die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreffen einzelner Detektionsraten, eingeteilt in Klassen von jeweils 10 % dargestellt. 60 % der Detektoren erheben den ihnen zugeordneten Strom zu mindestens 90 %. Mit Ausnahme des Bereichs von 50 % bis 70 % werden alle weiteren Detektionsratenklassen relativ gleichmäßig von jeweils ein bis fünf Detektoren

erreicht. Zusammenfassend ergibt sich aus der Betrachtung aller Detektionsraten ein Erwartungswert für die Detektionsrate von 77 %. Die zugehörige Varianz beträgt ungefähr 9 %.

Wie bereits für die Analyse des Fehlertyps 1 gezeigt, ist die Verkehrsstärke von nicht unerheblicher Bedeutung für die Qualität der Datenerhebung hinsichtlich der zusätzlichen Detektion benachbarter Ströme. In Bild 4.19 ist ergänzend dazu der Zusammenhang zwischen der Detektionsrate des analysierten Stroms zu der Verkehrsstärke dargestellt. Wiederum zeigt sich ein starker Zusammenhang und wiederum ist ersichtlich, dass insbesondere gering belastete Detektoren besonders fehleranfällig sind. Bei fast allen Detektoren, die mit einer Verkehrsstärke von mehr als 100 Kfz/h belastet sind, nimmt die Detektionsrate sehr gute Werte von mindestens 75 % an. Sehr geringe Werte von 0 % bis 50 % der Detektion des relevanten Stroms treten nur bei besonders gering belasteten Detektoren auf. Nichtsdestotrotz sind dies nur einige negative Beispiele. Das Diagramm zeigt deutlich, dass auch bei einigen gering belasteten Detektoren sehr gute Detektionsraten erzielt werden.

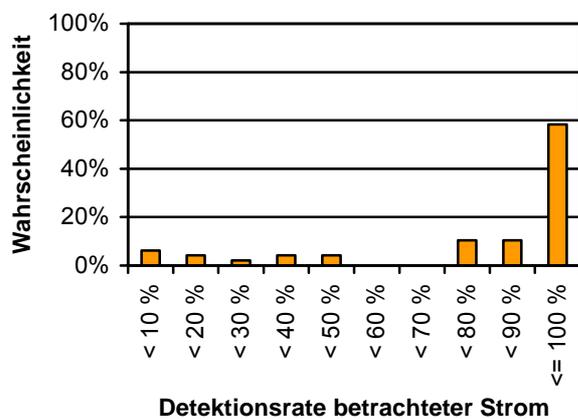


Bild 4.18: Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen einer bestimmten Detektionsrate

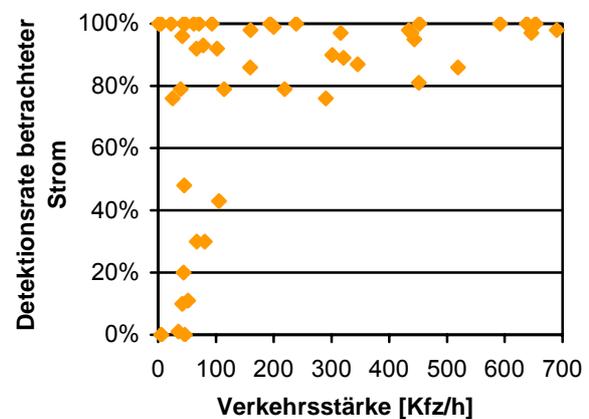


Bild 4.19: Detektionsrate des betrachteten Stroms in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke

Wie ebenfalls oben bereits thematisiert, erfassen laut Merkblatt über Detektoren [21] längere Detektoren auch Fahrzeuge, die eine niedrige Verstimmung hervorrufen. Dieser Zusammenhang konnte bisher nicht nachgewiesen werden. Andererseits können Fahrzeuge, die den Detektor mit einem Abstand zueinander befahren, der geringer als die Detektorlänge ist, nicht unterschieden werden. Letzteres kann dazu führen, dass längere Detektoren einen größeren Anteil an Fahrzeugen nicht detektieren. Die statistische Analyse wie sie in Bild 4.20 gezeigt ist, bestätigt diese These wiederum nicht, da die langen Detektoren eine höhere durchschnittliche Detektionsrate erzielen und es keine Beispiele mit sehr niedrigen Detektionsraten gibt. Bei den kurzen Detektoren hingegen treten auch Beispiele auf, bei denen der zugeordnete Verkehr überhaupt nicht detektiert wird.

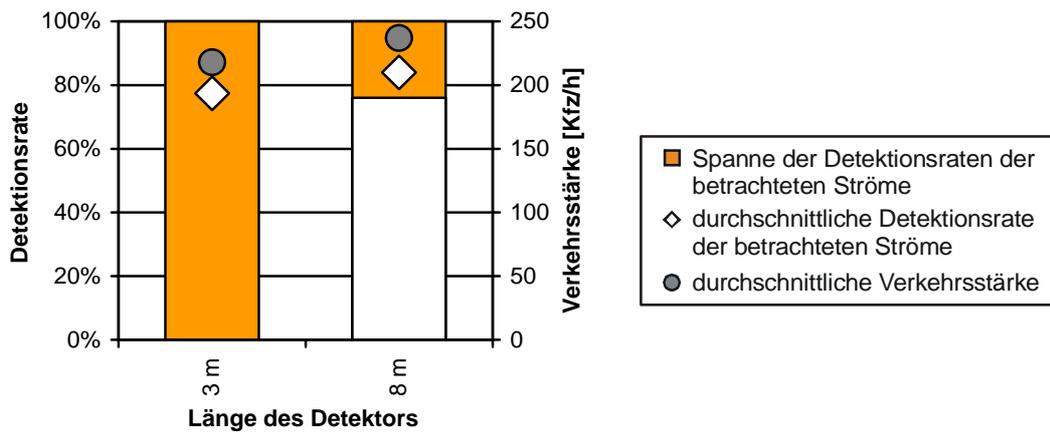


Bild 4.20: Detektionsrate des betrachteten Stroms in Abhängigkeit von der Länge des Detektors

Der nächste zu prüfende Aspekt ist die Entfernung des Detektors von der Haltlinie. Dieser Zusammenhang ist in Bild 4.21 dargestellt. Das Ergebnis dieser Betrachtung ähnelt sehr stark derjenigen bezüglich der Analyse der Detektionsrate benachbarter Ströme in Bild 4.15. Auch die Interpretation der Ergebnisse ist sehr ähnlich: Für weit von der Haltlinie entfernt liegende Detektoren ergibt sich wieder eine höhere Genauigkeit, die nur bedingt der Lage des Detektors zugeschrieben werden kann, da es sich bei den weit entfernt liegenden Detektoren, wie ebenfalls schon oben beschrieben, um hoch belastete Detektoren handelt, die bereits aus diesem Grund über eine sehr hohe Detektionsqualität verfügen. Ein weiterer Grund für die hohe Detektionsrate dieser Detektoren kann jedoch auch sein, dass sich die Fahrzeuge bei einer größeren Entfernung von der Haltlinie mittiger auf dem Fahrstreifen anordnen, als dies der Fall ist, wenn sie sich im Knotenpunktbereich aufstellen. Dort positionieren sie sich schon entsprechend der gewünschten Fahrtrichtung oder um einen besseren Blick auf die Signalgeber zu erhalten, etwas außermittig und decken dann den Detektor nicht vollständig ab, so dass keine optimale Detektion erfolgt. Dabei kann es sich allerdings nur um einen untergeordneten Effekt handeln, so dass insgesamt kein Zusammenhang des Abstands der Detektoren von der Haltlinie mit der Detektionsrate des betrachteten Stroms konstatiert werden kann.

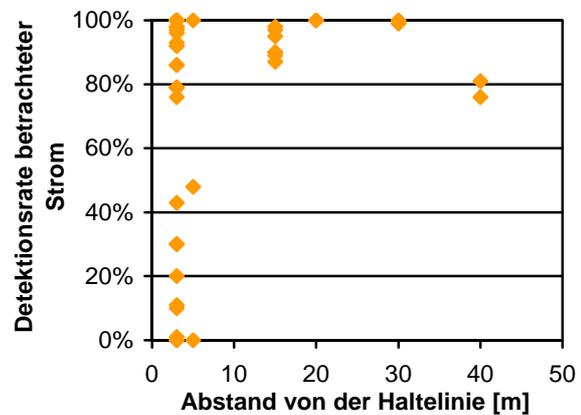


Bild 4.21: Detektionsrate des betrachteten Stroms in Abhängigkeit von der Lage

Fehlertyp 4: Erfassung nicht vorhandener Fahrzeuge

Ähnlich wie für den Fehlertyp 2 ist auch die genaue Beschreibung des Fehlertyps 4 nicht möglich. Dies begründet sich aus der Tatsache, dass die Erfassung nicht vorhandener Fahrzeuge ein zufälliger Prozess ist, der zudem in der Größe seiner Auswirkungen den anderen Fehlern stark untergeordnet ist. Aus diesem Grund lässt sich dieser Fehlertyp auch nur sehr schwer quantifizieren.

Bei den hier untersuchten Detektoren ist bei etwas weniger als der Hälfte davon auszugehen, dass kein Fehler vom Typ 4 auftritt, wie dies auch in Bild 4.22 gezeigt ist. Im Durchschnitt werden weniger als 2 % Fahrzeuge gezählt, die weder dem zugeordneten noch dem benachbarten Strom zuzuordnen sind. Allerdings wurden einige sehr hohe Werte beobachtet, in denen mehr als 10 % der detektierten Verkehrsstärke nicht zuzuordnen sind. Erstaunlich ist jedoch, dass diese Werte an Beispielen zu beobachten sind, die ansonsten über eine mittlere bis gute Genauigkeit verfügen.

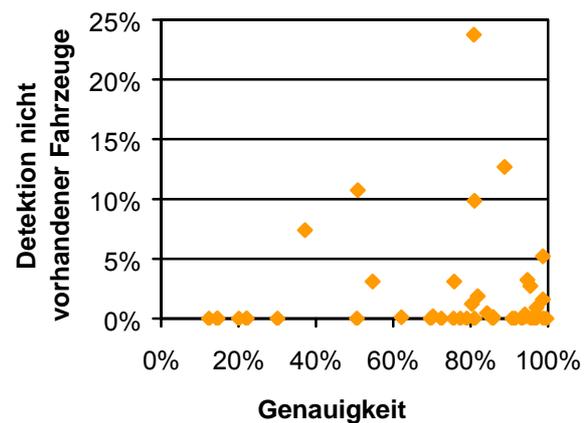


Bild 4.22: Detektion nicht vorhandener Fahrzeuge

Aufgrund dieser sehr geringen Möglichkeiten der Beschreibung des Ausmaßes dieses Fehlers ist auch eine detaillierte Ursachenuntersuchung nicht sinnvoll. Es sei nur erwähnt, dass es sich bei den zuviel erfassten Fahrzeugen mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit nicht um falsch detektierte Lkw oder Busse handelt, da der Anteil der Lkw und Busse am Gesamtverkehrsaufkommen in keinem der betrachteten Ströme größer als 3,5 % ist. Ein Zusammenhang zwischen diesem Wert und der Detektionsrate nicht vorhandener Fahrzeuge kann nicht hergestellt werden.

Fazit

Insgesamt haben sich vier verschiedene Fehlertypen gezeigt, die zeitlich begrenzt oder während der gesamten Untersuchungsdauer auftraten:

- Es werden zusätzlich Fahrzeuge von benachbarten Fahrstreifen gezählt.
- Es werden zusätzlich passierende Straßenbahnen als mehrere Fahrzeuge gezählt.
- Es werden nicht alle Fahrzeuge sondern nur ein bestimmter Prozentanteil gezählt.
- Es werden nicht vorhandene Fahrzeuge gezählt.

Die stärkste Bedeutung für die Genauigkeit der Daten hat die Erfassung von Fahrzeugen auf den Nachbarfahrstreifen und die nur teilweise Erfassung der Fahrzeuge des betrachteten Stroms, da diese beiden Fehler in fast allen Beispielen in unterschiedlicher Stärke auftreten. Auch die Erfassung nicht vorhandener Fahrzeuge ist an vielen Detektoren zu beobachten, ist jedoch in ihrem Ausmaß den anderen Fehlertypen untergeordnet.

Als besonders relevante Randbedingung für die Genauigkeit eines Detektors hat sich die Verkehrsstärke des zugeordneten Stroms erwiesen. Beispielhaft werden im Folgenden in Bild 4.23 und in Bild 4.24 die Genauigkeit der Messreihen repräsentiert durch den Vergleich der absoluten Werte und durch die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehlerproportional dargestellt. Das erste Bild zeigt sehr deutlich, dass bei steigender Verkehrsstärke die mindeste erreichte Genauigkeit auch steigt. Ab einer Verkehrsstärke von ca. 500 Kfz/h sind die Abweichungen an allen Untersuchungsstellen geringer als 10 %. Diese Tendenz wird durch die Analyse der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehlerproportional noch verstärkt: Insbesondere bei Verkehrsstärken von weniger als 100 Kfz/h schwankt dieser Wert, der den Fehler entsprechend der Größe des eigentlichen Messwertes gewichtet, extrem stark. Bei größeren Verkehrsstärken hingegen werden regelmäßig Werte von unter 1,0 erreicht.

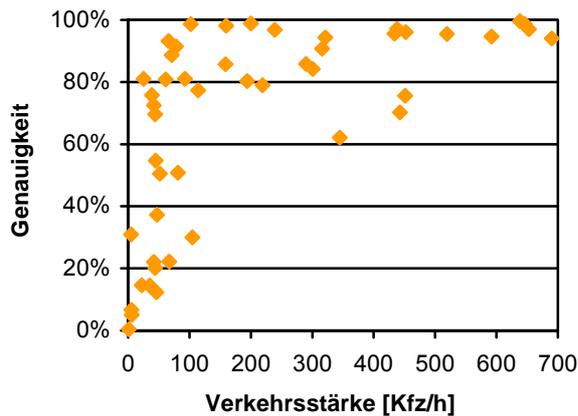


Bild 4.23: Genauigkeit bezüglich der absoluten Werte in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke

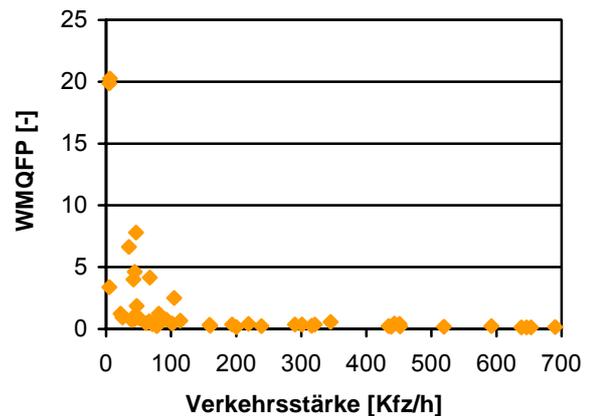


Bild 4.24: Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehlerproportional in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke

Weiterhin hat sich in dieser Untersuchung gezeigt, dass insbesondere Detektoren auf Linksabbiegefahrstreifen einen hohen Anteil der in entgegengesetzter Richtung verkehrenden Fahrzeuge zusätzlich detektieren.

Hinsichtlich der Länge der Detektoren konnte die Aussage aus dem Merkblatt über Detektoren [21], dass längere Detektoren eher dazu neigen, neben dem Detektor passierende Fahrzeuge zu erfassen, nicht bestätigt werden.

Keine Abhängigkeit konnte zu der Lage der Detektoren (sofern sie eindeutig einem Fahrstreifen zugeordnet sind und nicht innerhalb der Konfliktfläche angeordnet sind) sowie zu dem Schwerverkehrsanteil hergestellt werden.

5 Möglichkeiten der Datenüberprüfung und -verbesserung für die offline-Nutzung

5.1 Vorgehen

In Kapitel 2 wurden die verschiedenen Möglichkeiten der Datenüberprüfung und -verbesserung, die im deutschen Richtlinienwerk verankert sind oder die sich in verschiedenen Forschungsarbeiten als zielführend erwiesen haben, vorgestellt. Im Einzelnen handelt es sich dabei um die Verfahren nach dem Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ) [6], um den Fundamentaldiagrammtest, die Ganglinienanalyse und um Längs- und Quervergleiche. Ziel der folgenden Ausführungen ist es nun, die Potenziale dieser Verfahren hinsichtlich der Überprüfung und der eventuellen Verbesserung der hier vorliegenden Daten darzustellen.

Daran anschließend wird ein weiteres Verfahren vorgestellt, welches im Rahmen dieser Arbeit für die Überprüfung und Verbesserung der an innerstädtischen Lichtsignalanlagen gewonnenen Verkehrsstärken entwickelt wurde. In einem ersten Schritt wird die Verfahrensentwicklung beschrieben und es werden die Prinzipien des Verfahrens erläutert. Als nächstes erfolgt eine Beschreibung der Datenverbesserung, die sich sowohl auf die Beurteilung einzelner Datensätze als auch auf die Betrachtung der Gesamtheit aller Ergebnisse stützt, und abschließend werden verbleibende Probleme des Verfahrens angesprochen.

5.2 Anwendungsmöglichkeiten verschiedener Verfahren

5.2.1 Verfahren nach MARZ

Bei den Verfahren nach dem Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ) [6] handelt es sich um Verfahren, die für die Qualitätsüberprüfung nur die mit den Induktivschleifen ermittelten Rohdaten benötigen. Diese müssen allerdings bestimmte Voraussetzungen erfüllen. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um die notwendige Unterteilung der gemessenen Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten in Werte für den gesamten Kraftfahrzeugverkehr sowie für den Pkw- und den Lkw-Verkehr (vgl. Abschnitt 2.4.1). Da die notwendigen Unterscheidungen bei den hier vorliegenden Daten nicht getroffen wurden und Geschwindigkeiten überhaupt nicht erhoben wurden ist eine Anwendung der Verfahren nach MARZ nicht möglich.

5.2.2 Fundamentaldiagramm

Verschiedene Ansätze beschäftigen sich mit der Darstellung der Daten in Fundamentaldiagrammen und der Ableitung von Aussagen aus der Erscheinungsform dieser Diagramme [24][35]. Dafür sind als eingehende Daten die gemessenen Verkehrsstärken und entweder direkt die gefahrenen Geschwindigkeiten oder aber Informationen, aus denen sich die gefahrenen Geschwindigkeiten ableiten lassen, notwendig. Dies können z. B. die Belegungszeiten sein, anhand derer FREUDENBERGER [24] über die Annahme einer fiktiven einheitlichen Fahrzeuglänge die Geschwindigkeit errechnet.

Einerseits ergeben sich aus dieser Annahme große Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der tatsächlichen Geschwindigkeiten, da die Fahrzeuglängen in der Realität stark variieren. Andererseits liegen Informationen über die Belegungszeiten ebenfalls in vielen Fällen nicht vor. Auch bei den hier betrachteten Daten können keine Aussagen zu der Geschwindigkeit getroffen werden, so dass Betrachtungen im Fundamentaldiagramm nicht möglich sind.

5.2.3 Ganglinienanalyse

Bei der Ganglinienanalyse findet ein Vergleich der automatisch detektierten Verkehrsstärken mit historischen Ganglinien statt. Es handelt sich dabei also um ein Verfahren, welches nach den Hinweisen zur Datenvervollständigung und Datenaufbereitung in verkehrstechnischen Anwendungen [19] der ersten Datenfusionsebene zuzuordnen ist.

Die historischen Ganglinien werden auch als Musterganglinien bezeichnet. Diese werden für verschiedene Tagesgruppen (wie z. B. Montag bis Donnerstag oder Sonn- und Feiertage) ermittelt und beziehen sich in der Regel auf das gesamte Untersuchungsgebiet. In einzelnen Fällen gibt es auch Musterganglinien, die für konkrete Knotenpunkte oder Verkehrsbeziehungen erstellt wurden. Insbesondere letztere haben den Vorteil, dass sie den Richtungsbezug des Verkehrsflusses berücksichtigen, also voraussichtlich eine sehr viel detailliertere Überprüfung der automatisch erhobenen Verkehrsstärken ermöglichen.

Um die Potenziale der Ganglinienanalyse zu verdeutlichen, werden an dieser Stelle noch einmal einige der in Bild 4.4 dargestellten Messungen genauer untersucht. Dafür werden nicht nur, wie in Kapitel 4 geschehen, die absolut ermittelten Verkehrsstärken sondern die detaillierten zugrunde liegenden Ganglinien der automatischen Messung und der tatsächlichen Verkehrsstärke gegenübergestellt. In den Diagrammen ist es nicht notwendig, die einzelnen detektierten Ganglinien zu unterscheiden, daher werden diese auch nicht in den Legenden unterschieden. Wichtig ist, die Tendenz der einzelnen Ganglinien und vor allem des Zusammenspiels der verschiedenen Ganglinien zu erkennen.

Als erstes Beispiel ist in Bild 5.1 der Ganglinienvergleich für den Detektor 532-D31 dargestellt. Dabei handelt es sich um einen Detektor, der mit über 8.000 Kfz/13h an allen Untersuchungstagen sehr hoch belastet ist. Die Datenqualität des Detektors kann aufgrund der Genauigkeit hinsichtlich der insgesamt ermittelten Verkehrsstärke von 97 %, einem Korrelationskoeffizienten von 0,91 und der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler von 6,71 als sehr gut bezeichnet werden. Bis auf wenige einzelne Messwerte wird durch die automatisch detektierten Ganglinien ein recht klares Bild der durchschnittlich zu erwartenden Ganglinie dieses Detektors gezeigt. Die in orange dargestellte Ganglinie der tatsächlich gezählten Verkehrsstärke passt sich diesem Verlauf ebenfalls sehr gut an. Insgesamt spiegeln die Ganglinien sehr gut den im

Idealfall zu erwartenden Verlauf einer innerstädtischen Ganglinie wider: Morgens ist ein steiler Anstieg der Verkehrsstärke mit einer recht schmalen Spitze zu verzeichnen, der im Wesentlichen durch den Beginn des Berufs- und Ausbildungsverkehr begründet ist. Nachmittags ist diese Spitze etwas höher aber auch breiter, da sich der rückkehrende Berufsverkehr und der Freizeit- und Einkaufsverkehr überlagern. Einzelne Werte, die sehr stark von dieser Ganglinie abweichen, deuten auf Messfehler in den betreffenden Intervallen hin. Da sich allerdings auch bei den gezählten Werten einige deutliche Abweichungen ergeben, ist dies nur ein Indiz für fehlerhafte Messungen.

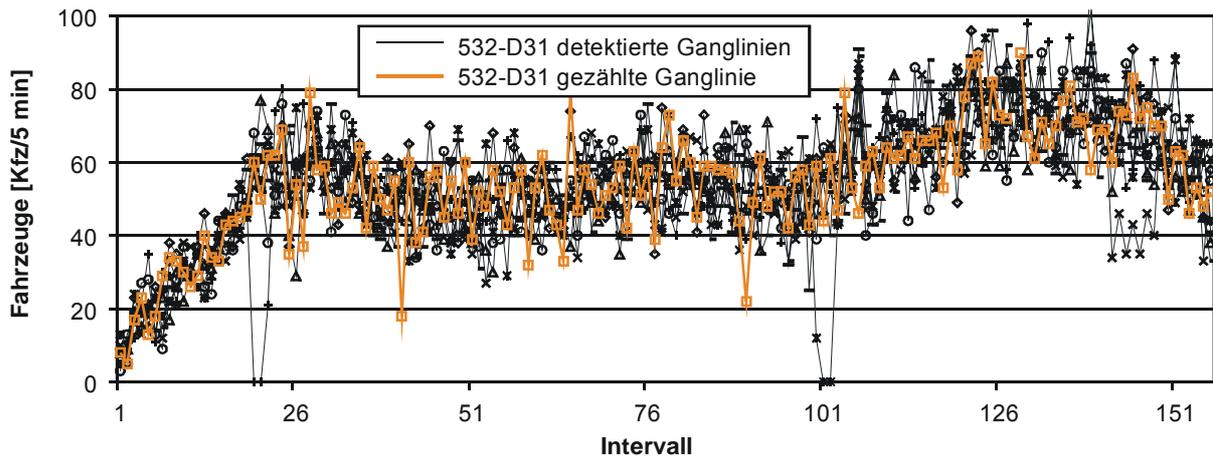


Bild 5.1: Ganglinienvergleich 532-D31 (5 min-Intervalle)

Betrachtet man nun den Detektor 532-D11 (vgl. Bild 5.2), der während des gleichen Untersuchungsintervalls von 13 h nur mit ca. 900 Kfz belastet ist, zeigt sich bereits ein anderes Bild, obwohl die Genauigkeit des Detektors ebenfalls sehr hoch ist. Sie beträgt in Bezug auf die Gesamtzahl der betrachteten Fahrzeuge 89 %. Untermauert wird diese hohe Qualität durch einen Korrelationskoeffizienten von 0,75 und der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler von 2,23. Die Ganglinien überlappen wiederum sehr stark und zeigen hinsichtlich der verschiedenen Untersuchungstage einen recht homogenen Verlauf mit einzelnen stark abweichenden Werten nach oben oder unten. Allerdings entspricht der Verlauf der Ganglinien nur bedingt der normalerweise auftretenden Ganglinienform, da weder die Morgen- noch die Nachmittagspitze besonders intensiv ausgeprägt ist.

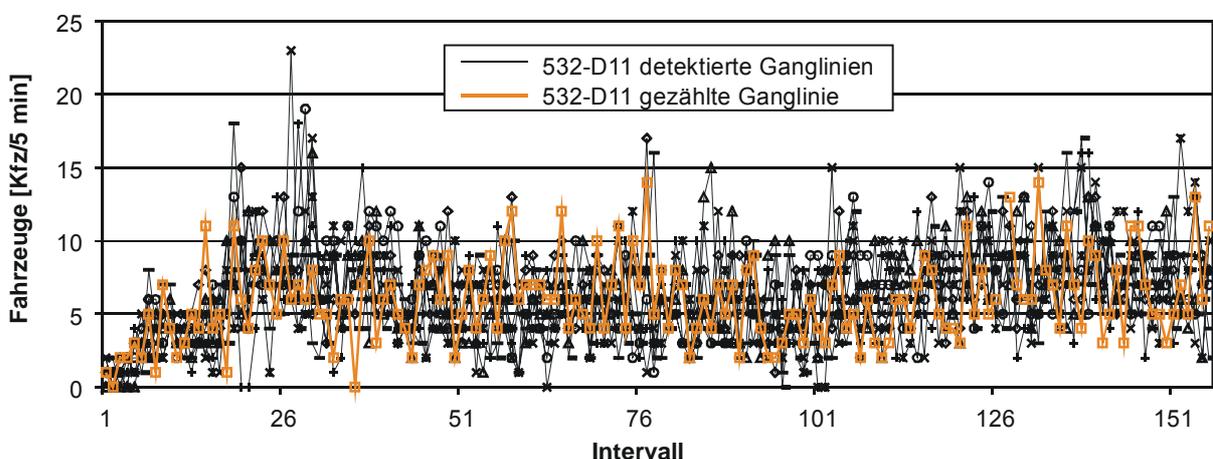


Bild 5.2: Ganglinienvergleich Detektor 532-D11 (5 min-Intervalle)

Auch wenn diese Daten stärker aggregiert werden, so dass, wie in Bild 5.3 dargestellt, 15 min-Intervalle entstehen, bildet sich nur ansatzweise das Bild einer „typischen“ Ganglinie aus. Dies entspricht auch der realen Verteilung einer geringen Verkehrsstärke über den Tag, wie durch die Darstellung der gezählten Ganglinie verdeutlicht wird. Betrachtet man weitere relativ gering belastete Detektoren zeigt sich dasselbe Bild: Die charakteristische Ganglinienform entsteht erst bei einem relativ hohen Verkehrsaufkommen. Bei einem geringeren Verkehrsaufkommen ist die Verkehrsstärke über den Tag eher homogen. Allerdings lässt sich aus den hier durchgeführten Untersuchungen kein Grenzwert ableiten, ab welcher Verkehrsstärke sich eine typische Ganglinie bildet.

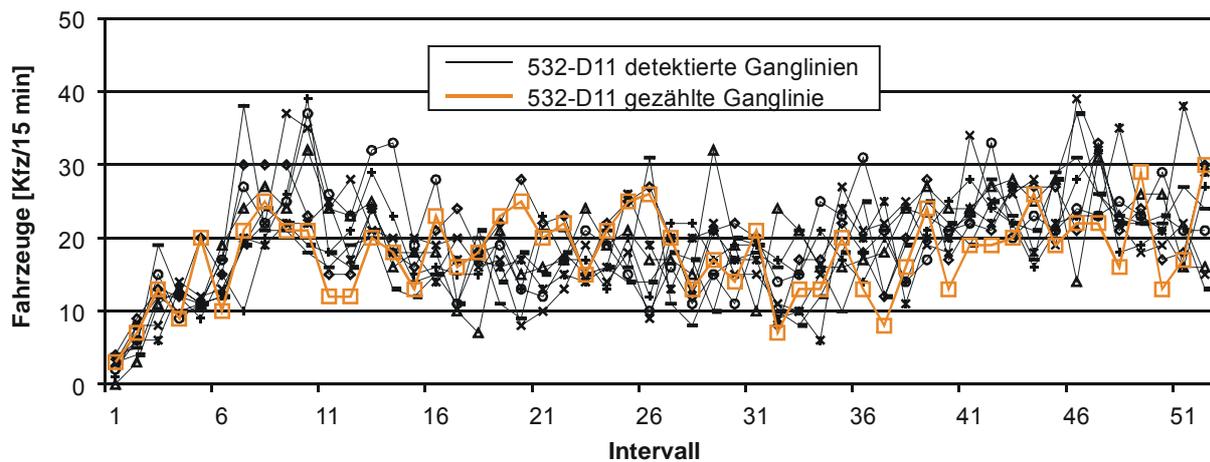


Bild 5.3: Ganglinienvergleich Detektor 532-D11 (15 min-Intervalle)

Es muss wiederum beachtet werden, dass eine hohe detektierte Verkehrsstärke nicht automatisch eine gute Datenqualität bedeutet. Wie bereits mehrfach thematisiert (z. B. in Bild 4.4 und der zugehörigen Erläuterung) erheben einige Detektoren kontinuierlich eine zu hohe Verkehrsstärke. Dieser Zusammenhang ist auch in Bild 5.4 aufgegriffen. Die detektierten Ganglinien bewegen sich für diesen Detektor zwar auf einem gleichmäßigen Niveau, weisen aber sehr starke Schwankungen auf und zeigen ebenfalls nicht den Verlauf einer typischen Ganglinie. Der Vergleich mit der tatsächlich ermittelten Verkehrsstärke des zugeordneten Stroms zeigt, dass dieser sehr viel geringer ist.

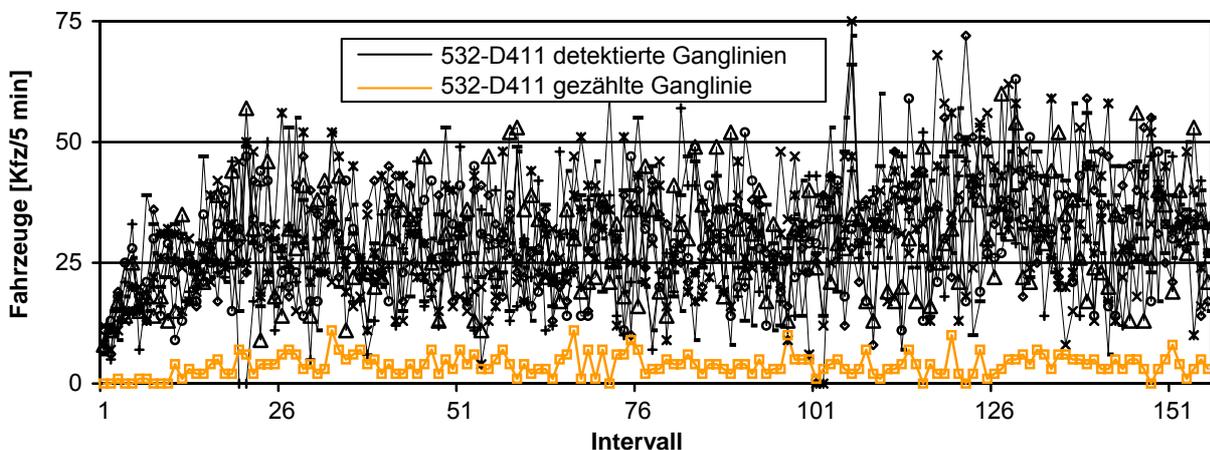


Bild 5.4: Ganglinienvergleich Detektor 532-D411 (5 min-Intervalle)

Bei diesen Betrachtungen handelt es sich lediglich um ausgesuchte Beispiele. Für die Anwendung der Ganglinienanalyse lassen sich jedoch bereits aus diesen wenigen Beispielen einige Schlussfolgerungen treffen:

- Wird eine relativ hohe Verkehrsstärke detektiert, ist zu erwarten, dass diese sich entsprechend bekannter Musterganglinien über den Tag verteilt, wie dies unter anderem auch von CHROBOK [9] untersucht wurde. Ist keine typische Ganglinienform zu erkennen, ist zu vermuten, dass die Ganglinie durch verschiedene Fehlereinflüsse beeinflusst wird und die tatsächliche Verkehrsstärke sehr viel geringer ist.
- Bei geringen Verkehrsstärken liegt in der Regel keine Verteilung der Verkehrsstärke entsprechend der Musterganglinien vor. Es kann demzufolge aufgrund der Ganglinienanalyse keine Aussage zu der Datenqualität getroffen werden.
- Die Ganglinienanalyse kann insgesamt also insbesondere für die Betrachtung des Hauptverkehrsstraßennetzes eingesetzt werden. Das untergeordnete Straßennetz und Abbiegebeziehungen von bzw. auf Hauptverkehrsstraßen sind häufig zu gering belastet, um für die Ganglinienanalyse geeignet zu sein.

Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Musterganglinien ständig kontrolliert und den sich ändernden Verkehrsverhältnissen angepasst werden. Dazu gehört einerseits die Berücksichtigung herausragender Ereignisse, wie z. B. Schulferien oder Feiertage, aber andererseits auch die langfristige Änderung der verkehrlichen Strukturen z. B. aufgrund von Netzänderungen oder geänderten weiteren Randbedingungen.

5.2.4 Längs- und Quervergleich

Basiert der Längs- und Quervergleich der erhobenen Daten lediglich auf Daten entlang einer bestimmten Strecke, handelt es sich um ein Verfahren, welches der zweiten Fusionssebene zuzuordnen ist [19]. Wird die Betrachtung um netzbezogene Elemente erweitert, ist sie der dritten Fusionssebene zuzuordnen. Um diese Aufgabenstellung zufrieden stellend zu lösen, sind aufgrund der Komplexität in einem Netz in der Regel Modellrechnungen notwendig.

Aufbauend auf den Erkenntnissen von CHEN et al [8] werden hier die Möglichkeiten der streckenbezogenen Analyse innerhalb eines innerstädtischen Netzes untersucht, es wird sich also auf die zweite Fusionssebene beschränkt. In Bild 5.5 ist die Lage der dafür untersuchten Detektoren dargestellt. Die zwei Lichtsignalanlagen, denen diese Detektoren zugeordnet sind, sind im Abstand von ca. 400 m an einer Hauptverkehrsstraße angeordnet. Zwischen den beiden Knotenpunkten befinden sich weitere Knotenpunkte, die jedoch nicht signalisiert sind. Es werden sowohl die jeweils nebeneinander angeordneten Detektoren untersucht als auch die innerhalb eines Knotenpunkts und die an verschiedenen Knotenpunkten hintereinander liegenden Detektoren.

In einem ersten Schritt werden nun die direkt hintereinander liegenden Detektoren in der östlichen Zufahrt des Knotenpunkts 269 miteinander verglichen. Zwischen diesen Detektoren gibt es keine Möglichkeit für die Fahrzeuge, die Strecke zu verlassen. Lediglich ein Fahrstreifenwechsel ist möglich. In Bild 5.6 sind die Summen der gemessenen Verkehrsstärken an den Detektoren 269-D11 und 269-D12 denen der Detektoren 269-D13 und 269-D14 gegenübergestellt. Es werden also die gesamten Querschnitte und nicht nur einzelne Detektoren betrachtet. Die gezählten Werte weisen eine sehr gute Übereinstimmung auf. Geringfügige Unterschiede werden hauptsächlich in Messfehlern vermutet, da das Überfahren der Messquerschnitte

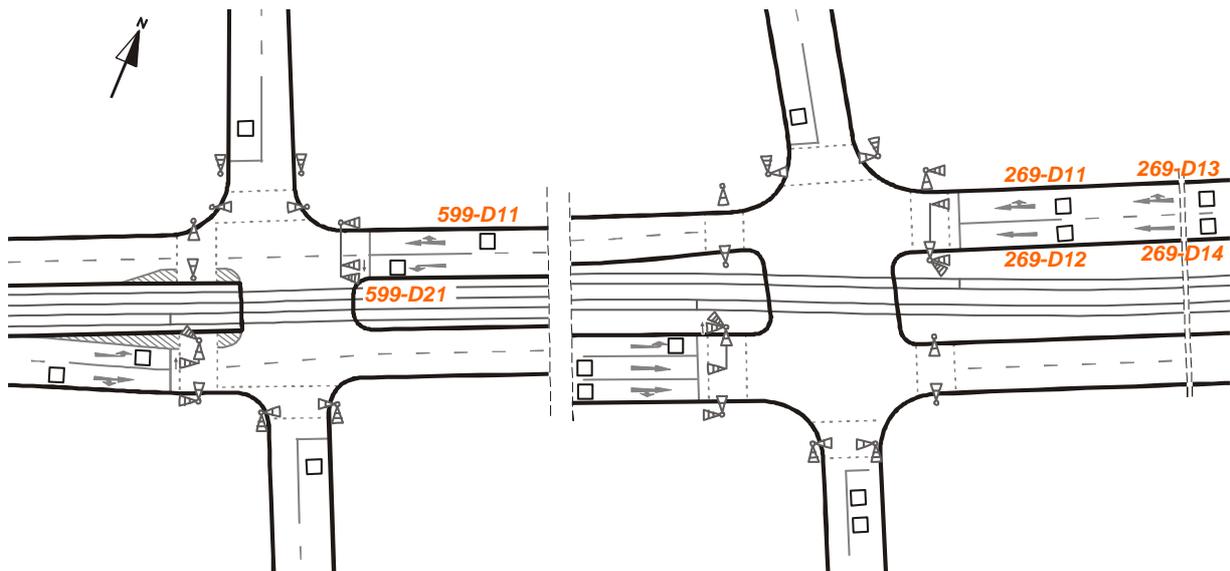


Bild 5.5: Längs- und Quervergleich, untersuchte Detektoren

in unterschiedlichen Intervallen aufgrund des geringen Abstands von ca. 25 m so gut wie ausgeschlossen werden kann. Bei den detektierten Werten zeigen sich bereits anhand der optischen Kontrolle wesentlich größere Ungenauigkeiten. Diese werden durch den Korrelationskoeffizienten von 0,38 bestätigt. Damit ist er noch um einiges geringer als die Korrelationskoeffizienten für die Beurteilung der Datenqualität an den einzelnen Detektoren, die zwischen 0,43 und 0,66 liegen. Dies erklärt sich dadurch, dass es sich bei dem Auftreten der Fehler um einen zufälligen Prozess handelt, der sich bei hintereinander liegenden Detektoren auch gegenseitig negativ beeinflussen kann.

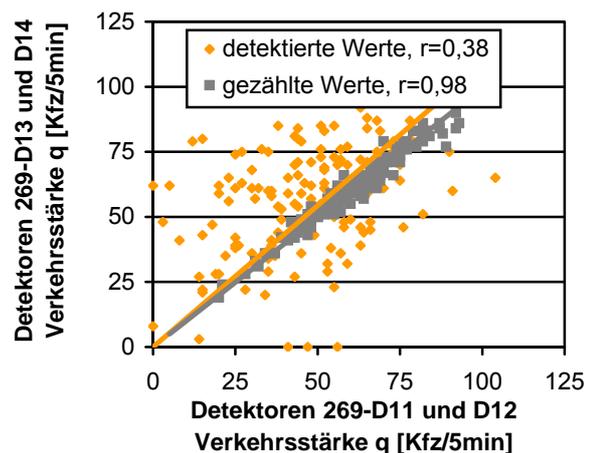


Bild 5.6: Vergleich der hintereinander liegenden Messquerschnitte am Knotenpunkt 269

Betrachtet man die einzelnen hintereinander liegenden Detektoren und nicht den gesamten Messquerschnitt ergibt sich ein inhomogeneres Bild sowohl der detektierten als auch der gezählten Werte. Dabei betragen die Korrelationskoeffizienten für den Vergleich der gezählten Werte 0,93 bzw. 0,95, spiegeln also auch bei den einzelnen Analysen eine sehr große Ähnlichkeit wider. Die etwas geringere Genauigkeit begründet sich aus Fahrstreifenwechseln zwischen den Messquerschnitten, die dazu führen, dass einzelne Fahrzeuge nicht an den direkt hintereinander liegenden Detektoren gezählt werden.

Laut CHEN et al ist es ebenfalls möglich, nebeneinander liegende Detektoren auf diese Weise miteinander in Beziehung zu setzen. Es ist jedoch zu vermuten, dass dies für den hier vorliegenden Anwendungsfall nicht zielführend ist. Auch wenn innerorts das Rechtsfahrgebot nicht gilt, ist bei zwei nebeneinander liegenden Fahrstreifen, die der gleichen Fahrtrichtung

zugeordnet sind, der rechte Fahrstreifen in der Regel stärker belastet als der linke Fahrstreifen. Dies kann durch die Betrachtung der gezählten Werte bestätigt werden. In Bild 5.7 ist der Vergleich der Detektoren 269-D13 und 269-D14 dargestellt. Diese Detektoren sind in einem Abstand von 40 m von der Haltlinie angeordnet, so dass die Fahrstreifenwahl noch nicht wesentlich von der gewünschten Fahrtrichtung abhängt. Die gezählte Verkehrsstärke zeigt, dass der rechts liegende Detektor 269-D13 ungefähr 50 % stärker belastet ist als der links liegende Detektor 269-D14.

Sind die beiden Fahrstreifen nicht der gleichen Fahrtrichtung zugeordnet, ergeben sich natürlich sehr viel stärkere Unterschiede in der Belastung der beiden Fahrstreifen (vgl. Bild 5.8). Bei dem Detektor 599-D21 handelt es sich, wie auch in Bild 5.5 zu sehen ist, um den Detektor auf dem Linksabbiegestreifen. An dieser Stelle sieht man auch wieder sehr deutlich, dass gering belastete Detektoren häufig eine zu große Verkehrsstärke messen. Aus diesem Grund ist das detektierte Verkehrsstärkeverhältnis der beiden Detektoren ausgeglichener, als dies in der Realität ist.

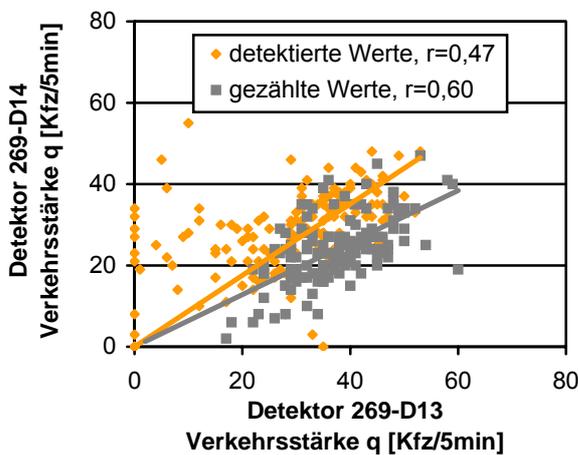


Bild 5.7: Vergleich zweier nebeneinander liegender Detektoren am Knotenpunkt 269

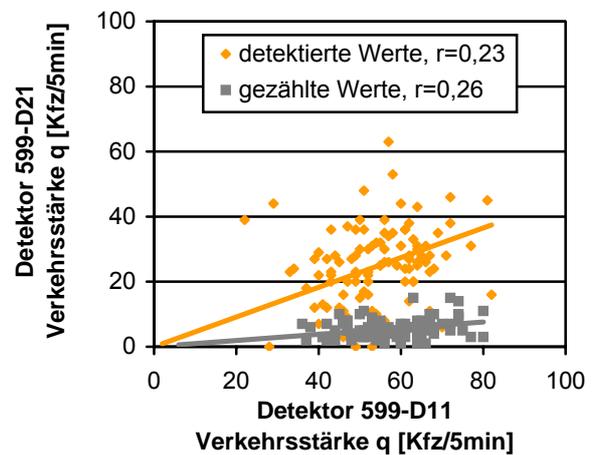


Bild 5.8: Vergleich zweier nebeneinander liegender Detektoren am Knotenpunkt 599

Bei dem Vergleich hintereinander liegender Messquerschnitte an verschiedenen Knotenpunkten gewinnen noch weitere Aspekte an Bedeutung: Auch wenn zwischen den beiden Messquerschnitten nur in ihrer Bedeutung untergeordnete Knotenpunkte oder eventuell sogar nur Grundstückszufahrten angeordnet sind, ist es nicht mehr möglich, eine zuverlässige Aussage über die zu erwartende Verkehrsstärke an dem zweiten Messquerschnitt zu geben. Zusätzlich ist nicht davon auszugehen, dass an den betrachteten Detektoren, alle Verkehrsströme getrennt erhoben werden, so dass sich aus der Unkenntnis der Verteilung der Fahrzeuge nachdem sie den Detektor befahren haben, eine weitere Unschärfe ergibt. Bild 5.9 zeigt diesen Zusammenhang sehr deutlich. Die mittlere Verkehrsstärke an dem folgenden Messquerschnitt ist genauso groß wie diejenige am ersten Messquerschnitt, was auch durch die Regressionsgrade der gezählten Werte, die mit einer Steigung von annähernd 1 verläuft, verdeutlicht wird. Im Gegensatz zu den Betrachtungen, bei denen zwischen den Detektoren keine Möglichkeiten bestehen, von der Strecke ab- bzw. in sie einzubiegen, ist der Korrelationskoeffizient jedoch bereits bei der Betrachtung des gesamten Querschnitts wesentlich geringer und die Werte weisen eine sehr viel größere Streuung auf. Aufgrund des größeren Abstands zwischen den Messquerschnitten

erfolgen zwischen ihnen wesentlich mehr Fahrstreifenwechsel als dies für den Vergleich der in nur geringem Abstand liegenden Detektoren oben gezeigt wurde. Dies wird durch die niedrigen Korrelationskoeffizienten der Einzelvergleiche bei Betrachtung der realen Verkehrsstärken von 0,40 bzw. 0,57 bestätigt.

Da für den Vergleich hintereinander liegender Messquerschnitte, zwischen denen Ein- und Abbiegemöglichkeiten existieren, keine genaue Kenntnis über die tatsächlich zu erwartende Verkehrsstärke am zweiten Messquerschnitt besteht, kann auch keine Aussage über die Zuverlässigkeit der detektierten Werte getroffen werden.

Die hier vorgestellten Beispiele sind sehr einfach und nutzen bei weitem nicht alle Möglichkeiten aus, die ein Längs- oder Quervergleich der Daten bietet. Aufgrund der bereits bei diesen einfachen Beispielen aufgetretenen Probleme, lassen sich jedoch verschiedene Erkenntnisse bezüglich des Längs- und Quervergleichs der Daten treffen:

- Der Quervergleich der Daten über einen Messquerschnitt kann lediglich für einfache Plausibilitätskontrollen hilfreich sein, da aufgrund der innerstädtischen Situation mit vielfältigen Routen- und Abbiegewünschen in der Regel keine Gleichverteilung der Verkehrsstärke über mehrere Fahrstreifen eines Querschnitts vorliegt.
- Liegen Detektoren derart hintereinander, dass zwischen den Messquerschnitten keine Möglichkeit besteht, die Strecke zu verlassen bzw. in die Strecke einzufahren, bietet der Längsvergleich der Daten eine gute Möglichkeit der Qualitätskontrolle. Besteht der Messquerschnitt aus mehreren Fahrstreifen sollten sowohl die einzelnen Fahrstreifen als auch der gesamte Querschnitt betrachtet werden, um so möglichst genau zu eruieren, welcher der Detektoren für das eventuell schlechte Ergebnis verantwortlich ist.
- Sobald zwischen den Messquerschnitten Zu- und Abfahrten von der Strecke bestehen, ist der Längsvergleich vielen Unsicherheiten unterworfen. In diesem Fall kann nicht mehr beurteilt werden, ob ein schlechter Zusammenhang zwischen den an den aufeinander folgenden Messquerschnitten detektierten Werten durch die geringe Datenqualität oder durch einen großen Anteil an Zu- und Abfahrern begründet ist.

Der Längsvergleich zwischen den Daten ist aus diesen Gründen sehr viel besser für Netze geeignet, bei denen zwischen den einzelnen Messquerschnitten keine Möglichkeit besteht, die Strecke zu verlassen bzw. auf sie einzubiegen, oder bei denen diese Zu- und Abfahrten ebenfalls detektiert werden. In der Regel handelt es sich bei den durch diese Randbedingungen beschriebenen Netzen um Autobahnen und autobahnähnliche Straßen. Innerorts sind in der Regel noch nicht einmal alle Abbiegebeziehungen an signalisierten Knotenpunkten detektiert, so dass sehr große Unsicherheiten bezüglich der Verteilung des Verkehrs innerhalb des Netzes bestehen. Diese Unsicherheiten können durch weitergehende Informationen (wie z. B. die historische Kenntnis über die Abbiegeanteile) verringert werden, bleiben aber teilweise weiter bestehen.

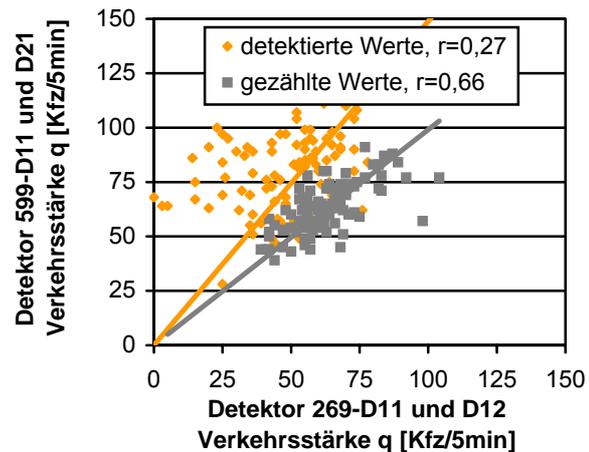


Bild 5.9: Vergleich der hintereinander liegenden Messquerschnitte an den Knotenpunkten 269 und 599

5.3 Entwicklung eines neuen Verfahrens für die Datenüberprüfung und -verbesserung

5.3.1 Einführung

Da sich die aus den Richtlinien und aus der Forschung bekannten Verfahren für die Datenüberprüfung und -verbesserung nur bedingt für den Einsatz in innerstädtischen Netzen eignen, wird im Rahmen dieser Arbeit ein neuer Ansatz speziell für die Überprüfung und Verbesserung von Verkehrsstärken, die an innerstädtischen Lichtsignalanlagen gewonnen werden, entwickelt. Das entstandene Verfahren ist ausschließlich für offline-Daten geeignet, wobei noch einmal darauf hingewiesen wird, dass mit offline in diesem Zusammenhang jede Nutzung aggregierter Daten beschrieben ist. Dabei kann es sich auch um kurze Aggregationsintervalle von beispielsweise 1 min oder 5 min und die direkt im Anschluss folgende Verarbeitung dieser Informationen handeln.

Der entwickelte Ansatz basiert auf der Fusion verschiedener Informationen. Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen der Verkehrsstärke an einer verkehrsabhängig geschalteten Lichtsignalanlage und deren Schaltzuständen, ist es möglich, für jedes Aggregationsintervall die wahrscheinliche Verkehrsstärke des einem Detektor zugeordneten Stroms abzuschätzen. Prinzipiell handelt es sich also um ein Verfahren entsprechend der Fusionsebene 1, in der ausschließlich Daten mit punktuellm Ortsbezug verarbeitet werden. Dabei wird jedoch nicht auf historische Daten zurückgegriffen, wie dies in den Hinweisen zur Datenvervollständigung und Datenaufbereitung in verkehrstechnischen Anwendungen [19] beispielhaft vorgeschlagen wird, sondern es werden die Freigabezeiten der einzelnen Signalgruppen der Lichtsignalanlage betrachtet.

Der bedeutendste Vorteil des hier geschilderten Verfahrens, ist dass es weder auf der Zusammenführung der Daten mehrerer benachbarter Lichtsignalanlagen noch auf der Integration weit reichender historischer Informationen basiert. Stattdessen wird allein aufgrund der Analyse der Situation an einem einzelnen Knotenpunkt eine signifikante Verbesserung der Daten erzielt. Damit stellt es ein sehr handliches Instrumentarium dar, welches mit nicht allzu großem Aufwand umzusetzen ist.

5.3.2 Grundlegende Idee und benötigte Daten

Der ursprüngliche Sinn der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Detektoren ist die Erfassung des Verkehrs für die Steuerung verkehrsabhängiger Lichtsignalanlagen. Für vielfältige Zwecke ist es notwendig, dass die Schaltzustände verkehrsabhängiger Lichtsignalanlagen über einen gewissen Zeitraum gespeichert werden. Neben den in Abschnitt 3.2 bereits ausführlich beschriebenen und im weiteren Verlauf verwendeten Informationen über die Verkehrsstärke enthalten die Signalprogrammprotokolle aus diesem Grund sekundliche Informationen über die Schaltzustände der einzelnen Signalgeber.

Ein Auszug aus einem entsprechenden Signalprogrammprotokoll ist in Bild 5.10 dargestellt. Erläuterungen zu den einzelnen Elementen sind wieder in orange eingefügt. Zu erkennen ist je Zeile sowohl die aktuelle Uhrzeit als auch die Umlaufsekunde. Direkt danach folgen die Signaturen, die den Schaltzustand aller am Knotenpunkt vorhandenen Signalgeber speichern. Von rechts nach links sind zuerst die Signalgeber für den Kraftfahrzeugverkehr, dann eventuell vorhandene Signalgeber für den öffentlichen Personennahverkehr und letztendlich diejenigen

für nicht motorisierte Verkehrsteilnehmer aufgeführt. Bei den anschließenden Merkern handelt es sich um variabel belegbare Speicherplätze. In der Regel ist der am weitesten links stehende Merker mit der Angabe der laufenden Phase und der rechts daneben stehende Merker mit der Angabe der zu schaltenden Phase belegt. Im Rahmen dieser Arbeit haben die Merker keine Bedeutung und werden nicht weiter betrachtet.

07:42:15	015	.II.II...I..I.	03	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	51
07:42:16	016	.II.II...I..I.	03	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	52
07:42:17	017	.II.II...I..I.	03	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	53
07:42:18	018	.II.II...I..I.	03	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	54
07:42:19	019	.II.II...I..I.	03	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	55
07:42:20	020	.II.II.../.I.	03	02	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	56
07:42:21	021	.II.II.../.I.	03	02	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	57
07:42:22	022	.I..II.../.I.	03	02	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	58
07:42:23	023	.I..II...../.	03	02	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	59
Grundlegende Informationen zur Signalsteuerung															
Uhrzeit	Umlauf- sekunde	Schaltzustände der einzelnen Signalgeber¹⁾	Laufende Phase	Angeforderte Phase											
		KKKKK ... 54321	↓	↓	Variabel einstellbare Merker										
07:42:24	024	.I..II...../.	03	02	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	60
07:42:25	025	.I..II...../.	03	02	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	61
07:42:26	026	.I..II...../.	03	02	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	62
07:42:27	027	.I..II...../.	03	02	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	63
07:42:28	028	.I..I....=...	03	02	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	64
07:42:29	029	.I..I....=...	03	02	00	00	00	00	00	00	01	00	00	00	00
07:42:30	030	.I..I....I=...	03	02	00	00	00	00	00	00	01	00	00	00	00
07:42:31	031	.I..I....I=...	03	02	00	00	00	00	00	00	01	00	00	00	00
07:42:32	032	.I..I....II..	02	00	00	00	00	00	00	00	01	00	00	00	00
07:42:33	033	.I..I....II..	02	00	00	00	00	00	00	00	01	00	00	00	00
07:42:34	034	.I..I....II..	02	00	00	00	00	00	00	00	01	00	00	00	00
07:42:35	035	.I..I....II..	02	00	00	00	00	00	00	00	01	00	00	00	00

¹⁾ I (grün) . (rot) = (rot-gelb) / (gelb)

Bild 5.10: Auszug aus einem Signalprogrammprotokoll – Erläuterung der allgemeinen Informationszeilen

Ermittelt man nun aus den Signalprogrammprotokollen für jede einzelne Signalgruppe sekunden genau die gesamte freigegebene Zeit innerhalb eines betrachteten Intervalls, kann man aus dieser Information Rückschlüsse auf die maximal mögliche Verkehrsstärke des Stroms, der der Signalgruppe zugeordnet ist, ziehen. Ebenso ist es möglich, eine mindestens notwendige Verkehrsstärke zu berechnen, da die Länge der zugeordneten Freigabezeit von der Anzahl der detektierten Fahrzeuge abhängt. Aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen an einer verkehrsabhängig gesteuerten Lichtsignalanlage ist die Berücksichtigung verschiedener Korrekturfaktoren, deren Ermittlung ebenso wie die Betrachtung der oberen und unteren Grenzwerte im Folgenden näher erläutert wird, notwendig.

Weicht die detektierte Verkehrsstärke derart von diesen Grenzwerten ab, dass sie entweder über der maximal möglichen oder unter der minimal notwendigen Verkehrsstärke liegt, wird sie dermaßen korrigiert, dass der entsprechende Wert durch den jeweiligen Grenzwert ersetzt wird. Eine schematische Darstellung dieses Vorgangs ist in Bild 5.11 dargestellt.

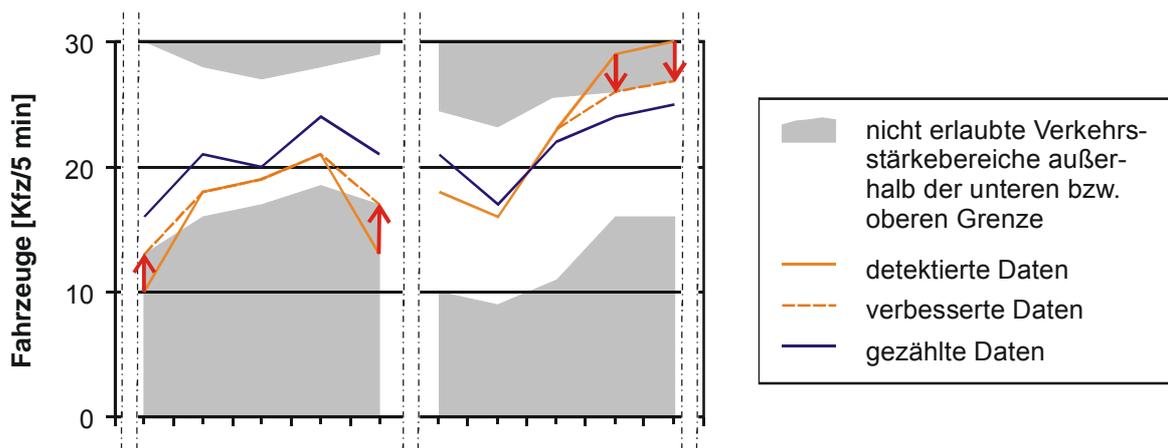


Bild 5.11: Prinzip der Datenverbesserung

Eingangswerte für die Verbesserung der Daten sind die folgenden Größen:

- die Freigabezeit der zugeordneten Signalgruppe unterteilt in drei Klassen: kurze Freigabezeiten, die weniger als 6 s lang sind, mittlere Freigabezeiten mit einer Länge von 6 s bis 10 s und lange Freigabezeiten mit einer Länge ab 11 s,
- die Mindestfreigabezeit, die maximal mögliche Freigabezeit und die Bemessungszeitlücke der zugeordneten Signalgruppe sowie die Umlaufzeit der Lichtsignalanlage,
- Angaben über den tatsächlichen oder den wahrscheinlichen Schwerverkehrsanteil, über geometrische Grundgrößen wie die Fahrstreifenbreite und den eventuellen Abbiegeradius sowie die Längsneigung des betrachteten Stroms sowie
- der Sättigungsgrad aller Ströme, die zu der Lichtsignalanlage gehören, für jedes betrachtete Intervall.

5.3.3 Verfahrensbeschreibung

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Elemente des entwickelten Verfahrens definiert. Dabei wird zuerst auf die Berechnung der Sättigungsverkehrsstärke, die das bestimmende Moment für die Ermittlung der oberen Grenzwerte ist, eingegangen. Nach der Schilderung der im HBS [18] eingeführten Vorgehensweise werden die notwendigen Modifikationen für das hier vorliegende Verfahren erläutert. Im Anschluss daran wird auf die notwendigen Abminderungsfaktoren Bezug genommen. Abschließend wird die Bildung der oberen und unteren Grenzwerte beschrieben, die sowohl die Berechnung der Sättigungsverkehrsstärke als Grundlage hat als auch die Abminderungsfaktoren berücksichtigt.

Die Größe der einflussnehmenden Parameter wurde innerhalb des Kalibrierungsprozesses bestimmt, so dass die Beschreibung der Parameter und deren Zusammenspiel ein optimales Ergebnis für die Verbesserung der Daten versprechen (näheres dazu in Abschnitt 5.3.4). Dabei wurde sich bewusst auf lineare Abhängigkeiten zwischen einzelnen Parametern beschränkt, um so eine bessere Transparenz des Verfahrens zu ermöglichen.

Sättigungsverkehrsstärke

Grundlegend für die Bestimmung der oberen Grenzwerte ist die Sättigungsverkehrsstärke der einzelnen Ströme. Die Berechnung erfolgt analog zu der Vorgehensweise wie sie im HBS [18] beschrieben ist. In Abhängigkeit von der Länge der Freigabezeit und verschiedener Faktoren,

die sich aus dem Schwerverkehrsanteil und aus verschiedenen geometrischen Randbedingungen bestimmen, wird eine maximal mögliche Verkehrsstärke berechnet, die man auch als Sättigungsverkehrsstärke bezeichnet. Dieser Wert berücksichtigt allerdings noch nicht, dass die zugeordnete Signalgruppe nicht während der gesamten Zeit freigegeben ist. Die Länge der einzelnen Freigabezeiten ist insofern von Bedeutung, als dass davon ausgegangen wird, dass bei kürzeren Freigabezeiten der Zeitbedarfswert eines jeden Fahrzeugs für das Passieren der Haltlinie abnimmt, da die Fahrzeuge in diesem Fall stärker beschleunigen, und die Sättigungsverkehrsstärke aus diesem Grund steigt, wie dies in Tabelle 5.1 gezeigt ist.

Es hat sich für die Anwendung innerhalb dieses Verfahrens als nicht zweckmäßig erwiesen, die Sättigungsverkehrsstärken so stark zu variieren, wie dies im HBS für die Bemessung vorgesehen ist. Zudem hat sich sowohl der obere als auch der untere Wert als unrealistisch erwiesen. Aus diesem Grund werden die Ausgangswerte für die Sättigungsverkehrsstärken gemäß Tabelle 5.2 angepasst. Es findet dabei keine Unterscheidung zwischen mittleren und großen Freigabezeiten statt, sondern allen Freigabezeiten, die mindestens 6 s lang sind, wird der gleiche Ausgangswert für die Sättigungsverkehrsstärke von 2200 Kfz/h zugeordnet. Lediglich sehr kurze Freigabezeiten mit einer Dauer von maximal 5 s lassen eine höhere Sättigungsverkehrsstärke erwarten.

Aufgrund besonderer verkehrlicher Randbedingungen und aufgrund des individuellen Knotenpunktentwurfs kann gemäß HBS die Berücksichtigung verschiedener Angleichungsfaktoren notwendig werden. Es werden damit die folgenden Einflussgrößen berücksichtigt:

- Schwerverkehrsanteil,
- Fahrstreifenbreite,
- Abbiegeradius,
- Fahrbahnlängsneigung und
- Fußgängerverkehr.

Prinzipiell wird sich auf die Berücksichtigung der zwei am stärksten von 1,0 abweichenden Angleichungsfaktoren beschränkt. Damit ergibt sich die Formel für die Berechnung der Sättigungsverkehrsstärke wie folgt:

$$q_s = f_{1,i} \cdot f_{2,i} \cdot \sum_{j=k,m,g} (t_{F,j} \cdot q_{S,j}) \quad [\text{Kfz}/\text{Int}] \quad (5-1)$$

mit $f_{1,i}, f_{2,i}$ = relevante Angleichungsfaktoren [-]
 $t_{F,k}, t_{F,m}, t_{F,g}$ = Gesamtlänge der kleinen, mittleren und großen Freigabezeiten [s/Int]
 $q_{S,k}, q_{S,m}, q_{S,g}$ = Ausgangswerte für die Sättigungsverkehrsstärken [Kfz/s]

Tabelle 5.1: Ausgangswerte für die Sättigungsverkehrsstärke nach HBS [18]

Freigabezeit	Ausgangswert für die Sättigungsverkehrsstärke
$t_F < 6 \text{ s}$	3000 Kfz/h
$6 \text{ s} \leq t_F \leq 10 \text{ s}$	2400 Kfz/h
$t_F > 10 \text{ s}$	2000 Kfz/h

Tabelle 5.2: Angepasste Ausgangswerte für die Sättigungsverkehrsstärke

Freigabezeit	Ausgangswert für die Sättigungsverkehrsstärke
$t_F < 6 \text{ s}$	2400 Kfz/h
$6 \text{ s} \leq t_F \leq 10 \text{ s}$	2200 Kfz/h
$t_F > 10 \text{ s}$	2200 Kfz/h

Bei der Bestimmung der Angleichungsfaktoren für den Schwerverkehrsanteil, die Fahrstreifenbreite, den Abbiegeradius, die Fahrbahnlängsneigung und den Fußgängerverkehr wird keine Änderung im Vergleich zum HBS vorgenommen (vgl. Tabelle 5.3). Es ist jedoch zu beachten, dass diese Abminderungsfaktoren häufig sehr starke Änderungen des Ergebnisses hervorrufen. Aus diesem Grund, ist ein umsichtiger Einsatz dieser Faktoren notwendig.

Tabelle 5.3: Bestimmung der Angleichungsfaktoren laut HBS [18]

Einflussgröße		Angleichungsfaktor
Schwerverkehrsanteil	SV < 2 %	$f_{SV} = 1,00$
	SV = 2 ... 15 %	$f_{SV} = 1 - 0,0083 e^{0,21 SV}$
	SV > 15 %	$f_{SV} = 1 / (1 + 0,015 SV)$
Fahrstreifenbreite	2,60 m	$f_b = 0,85$
	2,75 m	$f_b = 0,90$
	≥ 3,00 m	$f_b = 1,00$
Abbiegeradius	R ≤ 10 m	$f_R = 0,85$
	≤ 15 m	$f_R = 0,90$
	> 15 m	$f_R = 1,00$
Fahrbahnlängsneigung	Steigung + 5 %	$f_S = 0,85$
	+ 3 %	$f_S = 0,90$
	Ebene 0 %	$f_S = 1,00$
	Gefälle - 3 %	$f_S = 1,10$
	- 5 %	$f_S = 1,15$
Fußgängerlängsverkehr	stark	$f_F = 0,80$
	mittel	$f_F = 0,90$
	schwach	$f_F = 1,00$

Weiterhin ergeben sich häufig Probleme bei der Bestimmung der Angleichungsfaktoren aufgrund des Schwerverkehrsanteils und des Fußgängerverkehrs, da häufig keine ausreichend detaillierten Angaben bezüglich dieser Verkehrsarten vorliegen. Für die Implementierung der Faktoren in das Verfahren werden daher die folgenden Grundsätze definiert:

- Bei den gesamten Untersuchungen ist für keinen Fahrstreifen ein Schwerverkehrsanteil von mehr als 2 % aufgetreten, obwohl einige der untersuchten Detektoren auf Straßen angeordnet sind, die zum Lkw-Vorrangnetz der Stadt Hannover gehören. Bei unbekanntem Schwerverkehrsanteil in innerstädtischen Gebieten, die keinem Industrie- oder Gewerbegebiet zuzuordnen sind, wird empfohlen, den Angleichungsfaktor für den Fall, dass der untersuchte Strom entlang des Lkw-Vorrangnetzes verkehrt, etwas höher anzusetzen. Da sich die Variation der Angleichungsfaktoren sehr stark auf das Ergebnis auswirkt, sollte sich in der Regel auf einen eher niedrigen Schwerverkehrsanteil von 5 % beschränkt werden, sofern keine anderen Informationen vorliegen. Verläuft der betrachtete Strom nicht entlang des Lkw-Vorrangnetzes wird von einem Anteil geringer 2 % ausgegangen, so dass keine Angleichung der Sättigungsverkehrsstärke erfolgt.
- Für die Beschreibung der Stärke des Fußgängerverkehrs wird im Wesentlichen auf die Umfeldnutzung zurückgegriffen: Liegt das Untersuchungsgebiet in einem Gewerbe- oder Industriegebiet oder in einem Wohngebiet mit nur einseitiger Bebauung, gilt der Fußgängerverkehr als „schwach“. Bei Lage im Wohngebiet und wenn bekannt ist, dass es sich um eine regelmäßig genutzte Verbindung zwischen zwei Zielen handelt, wird der Fußgängerverkehr als „mittel“ angenommen und wenn sich im Umfeld der Furt bedeutende Ziele für

den Fußgängerverkehr befinden, als „stark“. Dabei ist auch darauf zu achten, dass die Sättigungsverkehrsstärke für jedes Intervall variiert werden kann. Erfahren z. B. die Ziele des Fußgängerverkehrs nicht während des ganzen Tages sondern nur zu bestimmten Zeiten besondere Beachtung, kann dies in dem Verbesserungsverfahren berücksichtigt werden.

Relevanzfaktor

In fast allen Fällen, ist die Länge einer bestimmten Phase nicht nur von einem einzelnen Strom abhängig, sondern es werden mehrere Signalgruppen gleichzeitig freigegeben und mehrere oder sogar alle entsprechenden Ströme sind für die Bemessung der Freigabezeit verantwortlich. Aus diesem Grund wird der so genannte Relevanzfaktor eingeführt. Dieser basiert auf der Transformation der Auslastung in die Relevanz und gibt Auskunft darüber, zu welchem Anteil der betrachtete Strom für die Länge der Freigabezeit verantwortlich ist.

Für den sehr einfachen aber seltenen Fall, dass ein Strom alleine geschaltet wird, beträgt der Relevanzfaktor $r = 1$. In diesem Fall ist eindeutig, dass dieser Strom auch für die Länge seiner Freigabezeit verantwortlich ist.

Für den wesentlich häufiger auftretenden Fall, dass mehrere Ströme gleichzeitig freigegeben werden, ergibt sich der Relevanzfaktor wie in Bild 5.12 dargestellt aus dem Verhältnis der eigenen Auslastung zu der Auslastung aller gleichzeitig mit dem betrachteten Strom freigegebenen Ströme. Ist die Auslastung des betrachteten Stroms sehr hoch im Vergleich der Auslastungsgrade aller freigegebenen Ströme, ist die Bedeutung des Stroms für die Länge der Freigabezeit ebenfalls hoch. Dabei wird ein Wert von $r = 0,65$ jedoch nur überschritten, wenn die Auslastung in den gleichzeitig freigegebenen Strömen Null ist, sich der Auslastungsfaktor also zu 1,0 ergibt. Für die Fälle, in denen der Anteil der Auslastung des betrachteten Stroms an allen gleichzeitig freigegebenen Strömen zwischen 20 % und 100 % liegt, hat sich anhand der Verhältnisse der für die Kalibrierung genutzten Detektoren als sinnvoll erwiesen, wenn der Relevanzfaktor maximal 15 % weniger bzw. mehr als 50 % beträgt. Es steigt demzufolge ab einer Auslastung von 20 % der Gesamtauslastung von $r = 0,35$ auf $r = 0,65$ bei einem Anteil der Auslastung von 100 %.

Bei einer geringeren Auslastung des betrachteten Stroms als 20 % der Gesamtauslastung, hat sich gezeigt, dass der Strom vollkommen irrelevant für die Länge der Freigabezeit ist. In diesem Fall wird der Relevanzfaktor auf $r = 0$ gesetzt.

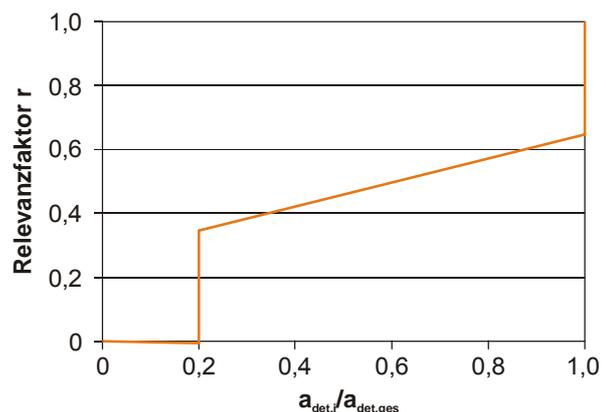


Bild 5.12: Transformation der Auslastung in den Relevanzfaktor

Abminderungsfaktor aufgrund nur teilweiser Relevanz

Die nicht vollständige Relevanz wirkt sich auf die Berechnung der unteren und der oberen Grenzwerte der möglichen Verkehrsstärke unterschiedlich aus. Die Berechnung des Abminderungsfaktors für die minimale Verkehrsstärke $a_{R,min}$ wird in Bild 5.13 gezeigt und die Berechnung des Abminderungsfaktors für die maximale Verkehrsstärke $a_{R,max}$ in Bild 5.14.

Ist der Relevanzfaktor und demzufolge die zugrunde liegende Auslastung sehr niedrig, ist die Wahrscheinlichkeit besonders hoch, dass die tatsächliche Verkehrsstärke auch sehr niedrig ist. Im Extremfall kann sie Null betragen. Damit die untere Grenze für die Überprüfung der Verkehrsstärke diese Wechselwirkungen berücksichtigt, wird der Abminderungsfaktor $a_{R,min}$ bei einem Relevanzfaktor von $r = 0$ zu $a_{R,min} = 0$ definiert. Selbst wenn der Relevanzfaktor $r = 1$ beträgt und so eine vollständige Relevanz beschreibt, wird der untere Grenzwert immerhin noch um 25 % abgemindert. Dieses Vorgehen berücksichtigt, dass nicht jede Phase angefordert wird, sondern auch bei einer hohen Auslastung der betrachteten Signalgruppe die Phase aufgrund der üblichen Phasenfolge Berücksichtigung findet. Aus diesem Grund darf der Grenzwert für die minimal mögliche Verkehrsstärke nicht zu hoch liegen.

Der Faktor für die Abminderung der oberen Grenzwerte der Verkehrsstärke folgt einem anderen Ansatz. In diesem Fall ist es wichtig, dass keine in der Realität möglichen sehr hohen Werte der Verkehrsstärke innerhalb eines Intervalls als unrealistisch bestimmt werden. Aus diesem Grund ist der niedrigste Wert für die Abminderung der oberen Grenzwerte $a_{R,max} = 0,80$ bei einer Relevanz von $r = 0$. Dieser Wert steigt kontinuierlich auf 1,0 bei einer Relevanz von $r = 1,0$ an.

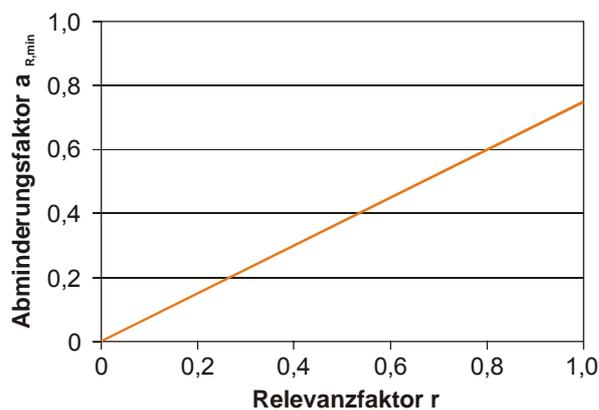


Bild 5.13: Transformation des Relevanzfaktors r in den Abminderungsfaktor $a_{R,min}$

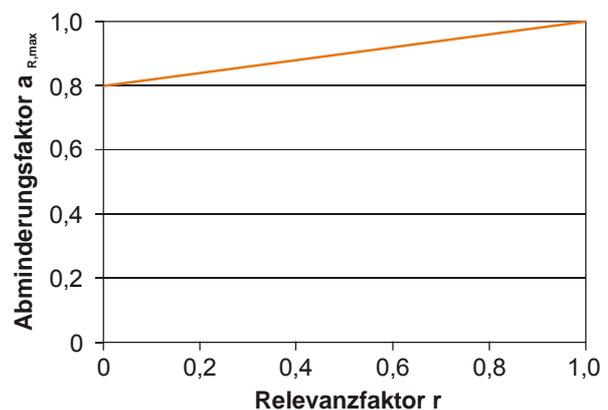


Bild 5.14: Transformation des Relevanzfaktors r in den Abminderungsfaktor $a_{R,max}$

Abminderungsfaktor aufgrund nicht vollständiger Sättigung

Ein weiterer Abminderungsfaktor ist notwendig, um zu berücksichtigen, dass der Verkehr kein deterministischer sondern ein stochastischer Prozess ist. Aus diesem Grund ist es sehr unwahrscheinlich, dass alle Fahrzeuge den Detektor mit dem gleichen Abstand überfahren. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass bei nie erfolgreicher Ausnutzung der maximal zur Verfügung stehenden Freigabezeit eines Stroms, es sehr unwahrscheinlich ist, dass während der genutzten Freigabezeit die maximal mögliche Verkehrsstärke gemessen wird.

Aus dem Verhältnis der tatsächlich gemessenen zu der maximal möglichen Freigabezeit innerhalb des betrachteten Intervalls wird der so genannte Freigabezeitanteil $t_{F,\%}$ gebildet, aus welchem sich der Abminderungsfaktor $a_{Sä}$ unmittelbar berechnet. Wird mindestens die Hälfte der maximal zur Verfügung stehenden Freigabezeit genutzt, erfolgt keine Abminderung aufgrund nicht vollständiger Sättigung, wie auch in Bild 5.15 zu sehen ist. Bei Freigabezeitanteilen zwischen 0 % und 50 % der maximal möglichen Freigabezeit wird ein linearer Anstieg des Abminderungsfaktors von 0,0 bis 1,0 angenommen.

Die Berechnung der maximal möglichen Freigabezeit ist bei vielen verkehrsabhängigen Steuerungen der aufwändigste Teil der Bestimmung der festen Eingangsgrößen für das Verfahren. Dies liegt daran, dass es häufig nicht ausreicht, den maximal möglichen Wert aus dem Rahmensignalplan abzulesen. Stattdessen liegen in den meisten Fällen vielfältige Schaltmöglichkeiten vor und es müssen die Freigabezeiten aller aus diesen Schaltmöglichkeiten resultierenden Phasenübergänge in die Betrachtung integriert werden, um eine möglichst hohe Genauigkeit zu gewährleisten.

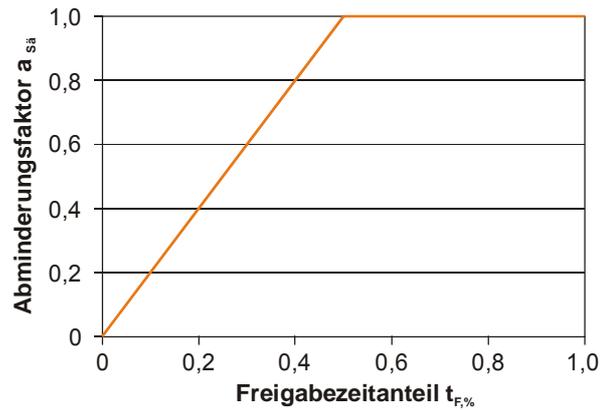


Bild 5.15: Transformation des Freigabezeitanteils $t_{f,\%}$ in den Abminderungsfaktor a_{sa}

Berechnung der Grenzwerte für die Verkehrsstärke

Sowohl für die Berechnung der unteren als auch der oberen Grenzwerte müssen zwei verschiedene Fälle berücksichtigt werden. Dabei handelt es sich einerseits um den Fall, dass die Freigabezeit nur für die Dauer der Mindestfreigabezeit $t_{F,min}$ gegeben wird und andererseits um den Fall, dass die Freigabezeit einen beliebigen längeren Wert t_F annimmt.

Weiterhin wird bei beiden Grenzwertberechnungen in der ersten Annahme davon ausgegangen, dass der untersuchte Strom allein und in vollem Maß für die Länge der Freigabezeit verantwortlich ist. Alle Interaktionen zwischen den verschiedenen Strömen oder auch die Tatsache, dass die meisten Ströme nicht nur über die Anforderung geschaltet werden, sondern in jedem Umlauf des Signalprogramms berücksichtigt werden, sind über die zuvor erläuterten Abminderungsfaktoren zu berücksichtigen.

Untere Grenzwerte

In Bild 5.16 ist das Prinzip für die Berechnung der unteren Grenzwerte skizziert: In fiktiven Signalbalken werden mögliche Fahrzeugankünfte – symbolisiert durch nummerierte Kreise – dargestellt. Die Bemaßung gibt Auskunft über die relevanten zeitlichen Rahmenbedingungen. Bei dem oberen Balken handelt es sich um das Beispiel, dass die Freigabezeit nur für die Dauer der Mindestfreigabezeit $t_{F,min}$ gegeben wird und der untere Balken symbolisiert alle weiteren Beispiele.

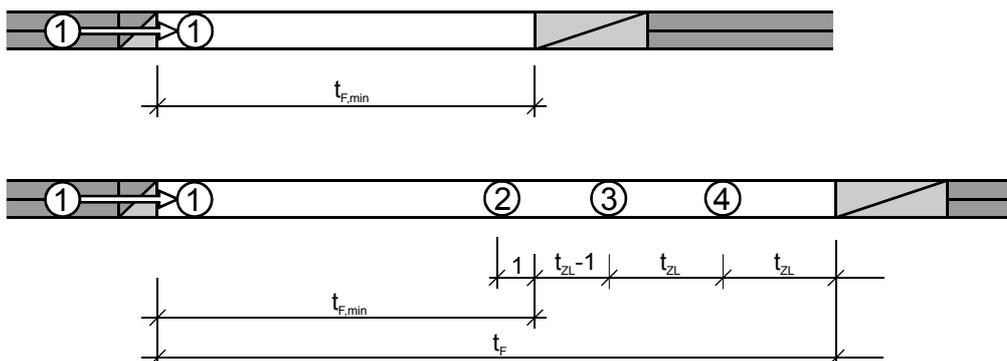


Bild 5.16: Bestimmung der unteren Grenzwerte für die Verkehrsstärke

Die Berechnung der minimalen Verkehrsstärke q_{\min} für den ersten Fall basiert auf der Annahme, dass die Freigabezeit von einem einzelnen Fahrzeug angefordert wurde. Dieses Fahrzeug hat zu Beginn der Freigabezeit die Haltlinie passiert. Danach hat kein weiteres Fahrzeug den Detektor aktiviert, um die Freigabezeit zu verlängern. Die Anfangsstaulänge l_a bei Grünbeginn beträgt daher 1 Kfz. Unter Berücksichtigung der Abminderung aufgrund nur teilweiser Relevanz $a_{R,\min}$ ergibt sich daher der untere Grenzwert der Verkehrsstärke q_{\min} je Aktivierung der Freigabezeit zu

$$q_{\min} = a_{R,\min} \cdot l_a \quad [\text{Kfz}] \quad (5-2)$$

Die Berücksichtigung des Abminderungsfaktors $a_{R,\min}$ gewinnt erst an Bedeutung, wenn anstelle der Verkehrsstärke je Freigabezeit die Verkehrsstärke je Untersuchungsintervall berechnet werden soll, da innerhalb einer Freigabezeit nicht nur ein Bruchteil eines Fahrzeugs gemessen werden kann. Bei der Betrachtung des gesamten Intervalls kann es jedoch durchaus sein, dass in einigen der betrachteten Freigabezeiten kein Fahrzeug den Detektor befährt, so dass sich eine durchschnittliche Belastung ergibt, die geringer als 1 Kfz je Freigabezeit ist. Die betreffende Verkehrsstärke q_{\min} wird berechnet, indem man den oben berechneten Wert mit der Anzahl der Freigabezeiten innerhalb des betreffenden Intervalls multipliziert. Das gleiche gilt auch für die im Folgenden vorgestellten Berechnungen.

Ist die tatsächliche Freigabezeit t_F länger als die Mindestfreigabezeit $t_{F,\min}$, bedeutet dies, dass zusätzlich zu dem Fahrzeug, welches die Freigabezeit aktiviert hat, mindestens ein Fahrzeug kurz vor Ende der Mindestfreigabezeit den Detektor aktiviert haben muss. Diesem Fahrzeug folgen in einem Abstand, der nicht länger als die Bemessungszeitlücke t_{ZL} sein darf, weitere Fahrzeuge, die die Freigabezeit weiter verlängern. Damit lässt sich der untere Grenzwert für die Verkehrsstärke q_{\min} wiederum je Aktivierung der Freigabezeit folgendermaßen beschreiben:

$$q_{\min} = a_{R,\min} \cdot \left(l_a + \frac{t_F - (t_{F,\min} - 1s)}{t_{ZL}} \right) \quad [\text{Kfz}] \quad (5-3)$$

Obere Grenzwerte

Wie bereits zuvor beschrieben, ist auch für die Berechnung der oberen Grenzwerte q_{\max} die Unterscheidung in die Fälle mit Freigabezeiten von der Dauer der Mindestfreigabezeit $t_{F,\min}$ oder mit längeren Freigabezeiten t_F zu treffen. Eine grafische Darstellung der beiden Prinzipien ist in Bild 5.17 zu finden. Dabei wird ebenso wie in Bild 5.16 auf die Signalbalken zurückgegriffen und die Fahrzeuge werden wieder durch Kreise symbolisiert.

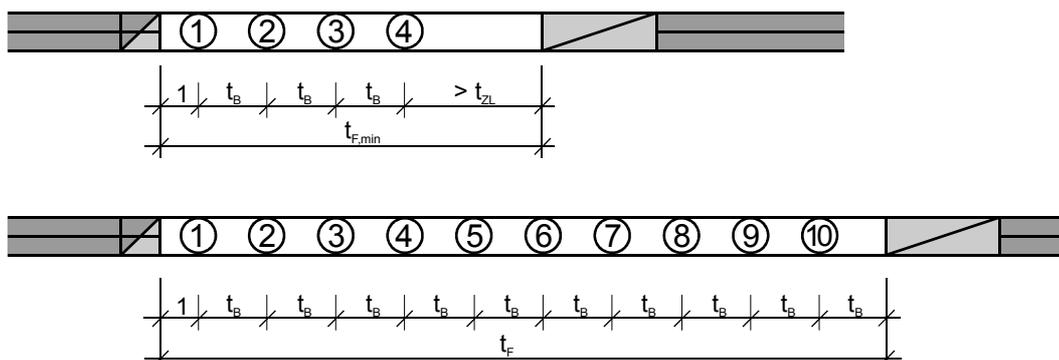


Bild 5.17: Bestimmung der oberen Grenzwerte für die Verkehrsstärke

Die maximale Verkehrsstärke für den Fall der Mindestfreigabezeit $t_{F,\min}$ ergibt sich aus der Überlegung, dass zu Beginn der Freigabezeit so viele Fahrzeuge wie möglich den Detektor passieren. Ob diese Fahrzeuge bereits während der Sperrzeit an der Lichtsignalanlage eingetroffen sind, ist für diese Betrachtung ohne Bedeutung. Wichtig ist, dass das erste Fahrzeug direkt zu Beginn der Freigabezeit fährt und dass die nächsten Fahrzeuge mit dem kürzestmöglichen Abstand t_B folgen. Der Wert t_B kennzeichnet die Belegungszeit, also die durchschnittlich notwendige Dauer für das Passieren des Detektors, und errechnet sich aus dem Kehrwert der Sättigungsverkehrsstärke q_S .

Eine weitere wichtige Ausgangsbedingung ist, dass vor dem Ende der Mindestfreigabezeit eine Zeitlücke von der Dauer der Bemessungszeitlücke t_{ZL} bestehen muss, da die Freigabezeit ansonsten über die Dauer der Mindestfreigabezeit hinaus verlängert werden würde. Damit ergibt sich unter Berücksichtigung des Abminderungsfaktors $a_{R,\max}$ aufgrund nur teilweiser Relevanz der folgende obere Grenzwert:

$$q_{\max} = a_{R,\max} \cdot \left(\frac{t_{F,\min} - (t_{ZL} + 1s)}{t_B} + 1 \text{Kfz} \right) \quad [\text{Kfz}] \quad (5-4)$$

Im Gegensatz zu dieser Betrachtung muss bei einer längeren Freigabezeit nicht die Bemessungszeitlücke t_{ZL} am Ende der Freigabezeit berücksichtigt werden. In diesem Fall wird von einer sehr langen Freigabezeit ausgegangen, die dann durch die Anforderung an einem anderen Detektor oder durch Erreichen einer maximalen Freigabezeit, die sich entweder durch die Überschreitung einer absoluten Dauer oder durch das Verlassen eines Erlaubnisbereichs definiert, beendet wird. Aus diesem Grund kann während der gesamten Freigabezeit die Sättigungsverkehrsstärke q_S abgefertigt werden.

Neben dem Abminderungsfaktor aufgrund nur teilweiser Relevanz $a_{R,\max}$ ist bei dieser Berechnung auch der Abminderungsfaktor aufgrund nicht vollständiger Sättigung $a_{Sä}$ von Bedeutung, so dass sich insgesamt die folgende Formel für die Berechnung des Grenzwerts ergibt:

$$q_{\max} = a_{R,\max} \cdot a_{Sä} \cdot q_S \quad [\text{Kfz}] \quad (5-5)$$

Für den Fall, dass eine besonders hohe Zahl an Überfahrten bei Gelb beobachtet wird, bzw. dass andere Signalisierungsmöglichkeiten wie z. B. das Grünblinken an österreichischen Lichtsignalanlagen bestehen, ist es einfach möglich, die Formeln für die Berechnung der Grenzwerte diesen Gegebenheiten anzupassen.

Glättungsverfahren

Insbesondere der Fehlertyp 2 (Straßenbahnfahrzeuge werden mitgezählt) und eine der Ausprägungen des Fehlertyps 3 (Nichterfassung von Fahrzeugen – Detektoren fallen in einzelnen Intervallen aus) führen zu sehr starken Schwankungen der Messwerte, die dann auch zu einer starken Schwankung der zugeordneten Freigabezeiten führen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, sowohl die unteren als auch die oberen Grenzwertreihen zu glätten. Der dafür verwendete Algorithmus ist in Bild 5.18 dargestellt. In einem ersten Schritt erfolgt die Abfrage, ob der betrachtete Wert den gleitenden Mittelwert der vorangegangenen drei Intervalle um einen gewissen Betrag überschreitet. Ist dies der Fall, wird der betrachtete Wert durch die maximal tolerierte Abweichung gesetzt. Ansonsten wird in einem zweiten Schritt abgefragt, ob der betrachtete Wert den gleitenden Mittelwert um einen gewissen Betrag unterschreitet. Auch in

diesem Fall wird der betrachtete Wert durch die maximal tolerierbare Abweichung ersetzt. Ist dies wiederum nicht der Fall, bleibt der ursprüngliche Wert erhalten.

Bei der Kalibrierung der einzelnen Parameter hat sich gezeigt, dass das beste Ergebnis erzielt wird, wenn die maximalen Abweichungen nach oben bzw. nach unten 50 % nicht überschreiten, so dass dieser Wert als maximal tolerierte Abweichung definiert wird. Der Faktor a beträgt demzufolge 1,5 und der Faktor b wird auf 0,5 gesetzt.

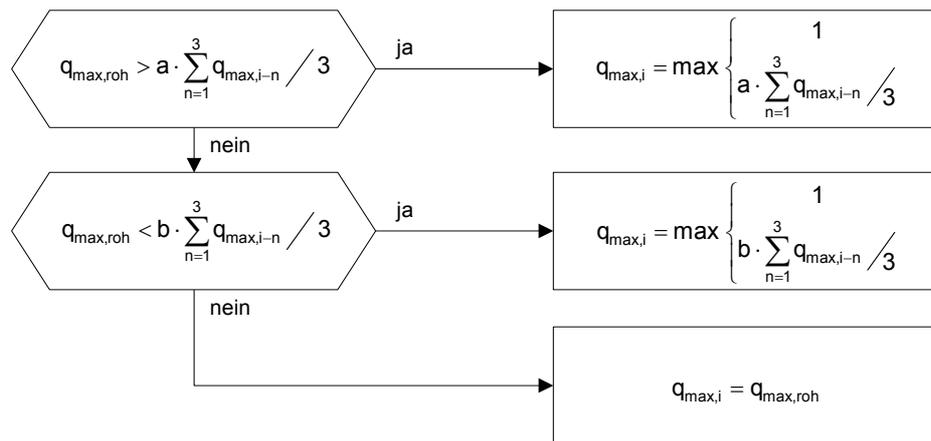


Bild 5.18: Glättungsalgorithmus

Durch dieses Vorgehen werden jedoch nur die unteren und oberen Grenzen für die mögliche Verkehrsstärke geglättet. Wird die neu ermittelte Verkehrsstärke nur in wenigen Werten durch die Grenzen beeinflusst, erfolgt keine Glättung der Werte. Aus der Betrachtung der Standardabweichung der Messwerte, wie sie in Bild 4.3 durchgeführt wurde, kann abgeleitet werden, dass insbesondere bei Detektoren, die bereits mit einer relativ guten Genauigkeit messen, die detektierten Werte eine höhere Standardabweichung aufweisen als die realen Werte. Aus diesem Grund erscheint es zweckmäßig eine weitere Glättung durchzuführen, die sich nicht nur auf die Grenzwerte sondern direkt auf die neu ermittelte Ganglinie bezieht. Das prinzipielle Vorgehen für diese zweite Glättung erfolgt analog zu der oben beschriebenen und in Bild 5.18 dargestellten Vorgehensweise. Dabei hat sich jedoch eine etwas schwächere Glättung als zielführend erwiesen. Während die Abweichung nach unten weiterhin nicht größer als 50 % sein darf, wird die obere Grenze für die Abweichung nach oben auf 70 % gesetzt. Die Faktoren nehmen damit die Werte $a = 1,7$ und $b = 0,5$ ein.

Entscheidung

In wenigen der untersuchten Intervalle tritt das Phänomen auf, dass der untere Grenzwert höher liegt als der obere Grenzwert. In diesen Fällen wird die zu ermittelnde Verkehrsstärke q_{neu} mit dem ermittelten oberen Grenzwert für die Verkehrsstärke q_{max} gleichgesetzt, da es sich bei der oberen Grenze der möglichen Verkehrsstärke um eine härter definierte Grenze handelt, die in keinem Fall überschritten werden darf.

Für den Normalfall gilt, dass wenn die automatisch detektierte Verkehrsstärke q_{det} kleiner als der untere Grenzwert für die Verkehrsstärke q_{min} ist, die zu ermittelnde Verkehrsstärke q_{neu} gleich diesem Grenzwert gesetzt wird. Das analoge Vorgehen wird gewählt, wenn die automatisch detektierte Verkehrsstärke q_{det} größer als der obere Grenzwert für die Verkehrsstärke q_{max}

ist. Keine Anpassung erfolgt, wenn die automatisch detektierte Verkehrsstärke q_{det} zwischen den Grenzwerten liegt. In diesem Fall wird q_{neu} dem detektierten Wert q_{det} gleichgesetzt.

5.3.4 Kalibrierung und Validierung

Das Verfahren wurde an 25 der untersuchten Detektoren kalibriert. Die einzelnen Parameter und Rahmenbedingungen wurden dabei solange variiert, bis ein optimales Ergebnis entstand. Um dies zu beurteilen, wurden die Ganglinien und die statistischen Kennwerte sowohl aller Detektoren in ihrer Gesamtheit als auch der einzelnen Detektoren analysiert. Auf diese Weise wird ausgeschlossen, dass sich starke Änderungen (sowohl Verbesserungen als auch Verschlechterungen) eher unrelevanter da z. B. sehr niedrig belasteter Detektoren in der gleichen Stärke auf das Ergebnis auswirken. Dies ist besonders wichtig, da kleine Änderungen bei sehr niedrigen Ganglinien ansonsten das Ergebnis verfälschen würden. Dies bedeutet nicht, dass diese Detektoren nicht in die Betrachtung einbezogen wurden, sondern nur, dass deren Ergebnisse einer besonderen Beobachtung und Bewertung unterliegen.

In einem nächsten Schritt wurden die verbleibenden 27 Detektoren für die Validierung herangezogen. Das Verfahren mitsamt den kalibrierten Parametern wurde auf diese Detektoren übertragen und die Parameter nochmals variiert, um zu ermitteln, ob sich durch eine Verschiebung der Parameter bedeutende Verbesserung in den Ergebnissen der Validierungsgruppe ergeben. Da dies nicht der Fall war, werden die zuvor gewonnenen Parameter als optimal für die Verbesserung der Daten angesehen.

Neben der optimalen Anpassung der Parameter sind die wichtigsten Ergebnisse der Kalibrierung und der Validierung:

- Die durchschnittliche Genauigkeit aller Detektoren beträgt 68 %. Mit Hilfe des Verbesserungsverfahrens konnte die durchschnittliche Genauigkeit in der Kalibrierungsgruppe auf 77 % und in der Validierungsgruppe auf 76 % verbessert werden.
- Die Korrelation der Messreihen konnte in der ersten Gruppe um 11 % und in der zweiten Gruppe sogar um 15 % gesteigert werden.
- Die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler sowie aus dem mittleren quadratischen Fehlerproportional lassen ebenfalls eine Verbesserung der Daten erkennen, die wiederum einmal für die erste und einmal für die zweite Gruppe besser ausfällt.

Insgesamt hat sich also in der Validierungsgruppe eine Verbesserung der Daten ergeben, die mit derjenigen in der Kalibrierungsgruppe vergleichbar ist. Eine weitere Anpassung der Parameter hat keine deutliche Verbesserung der Datenqualität in der Validierungsgruppe bewirkt, so dass die gewählten Parameter für den hier vorliegenden Anwendungsfall bestätigt sind.

5.3.5 Anwendung des Verfahrens

Übersicht

Insgesamt hat sich eine signifikante Verbesserung der Durchschnittswerte ergeben, wie auch in Tabelle 5.4 zu sehen ist. Während der Korrelationskoeffizient für den Vergleich der detektierten mit den gezählten Messreihen bei 0,46 lag, ist er durch die Datenverbesserung auf 0,52 gestiegen. Besonders deutlich sieht man die Verbesserungen bei der Betrachtung der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler und aus dem mittleren quadratischen Fehlerproportio-

nal. So ist die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler um ein Drittel von 8,80 auf 5,89 und die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehlerproportional um mehr als 80 % von 6,75 auf 1,27 zurückgegangen. Auf die einzelnen Detektoren bezogen, kann festgestellt werden, dass bei 22 der Detektoren eine Verbesserung aller statistischen Kennwerte erfolgt. Lediglich bei drei Detektoren ist die Bewertung aller Kennwerte nach der Datenverbesserung schlechter. Bei diesen drei Detektoren handelt es sich um Beispiele, bei denen die Genauigkeit der ursprünglich detektierten Daten sehr hoch war und bei denen durch die Änderungen geringfügige Verschlechterungen der Daten aufgetreten sind.

In Bild 5.19 ist die Häufigkeitsverteilung der Genauigkeit bezogen auf die absolute Anzahl der Fahrzeuge dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die höchste Genauigkeitsklasse sowohl bei den detektierten als auch bei den verbesserten Werten von gleichviel Detektoren erreicht wird. Unterschiede lassen sich insbesondere in den niedrigeren Genauigkeitsklassen erkennen: Während zwölf Detektoren mit einer Genauigkeit von weniger als 40 % messen, lässt sich dieser Wert durch den Einsatz des Verbesserungsverfahrens auf fünf Detektoren reduzieren.

Tabelle 5.4 Durchschnittliche Datenverbesserung

	Vor der Datenverbesserung	Nach der Datenverbesserung
Genauigkeit	68 %	77 %
Korrelationskoeffizient	0,46	0,52
WMQF	8,80	5,89
WMQFP	6,75	1,27

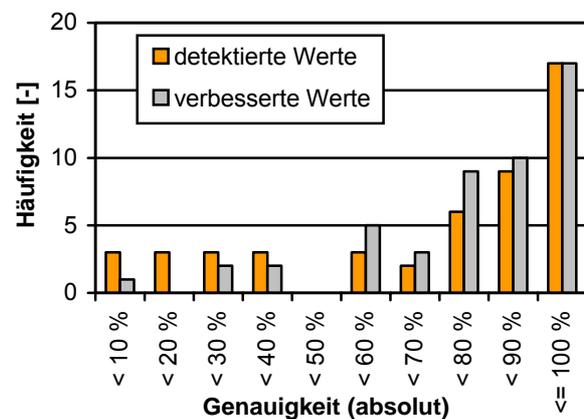


Bild 5.19: Änderung der Genauigkeit

Einzelergebnisse

Im ersten Schritt der Analyse der Genauigkeit der Verkehrsstärken erfolgte die Ermittlung der auftretenden Fehlertypen. Dafür wurden verschiedene Detektoren detailliert betrachtet. Anhand einiger ausgewählter der in Abschnitt 4.3.5 aufgezeigten Beispiele wird an dieser Stelle die Qualität des entwickelten Verfahrens zur Datenverbesserung demonstriert.

In Bild 5.20 sind die Detektoren aufgeführt, die aufgrund der sehr hohen detektierten Verkehrsstärken im Vergleich zu der realen Verkehrsstärke auf die Fehlertypen 1 und 2 aufmerksam machten. Zusätzlich zu den schon bekannten Informationen über die gezählten und die detektierten Verkehrsstärken, die in blau bzw. in orange dargestellt sind, werden die Summen der verbesserten Ganglinien in grau aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen in einigen Fällen immer noch sehr groß sind und in einigen Beispielen sogar weiterhin ein Vielfaches der tatsächlichen Verkehrsstärke betragen. Im Vergleich zu den detektierten Werten haben sie sich jedoch um ca. 90 % verringert.

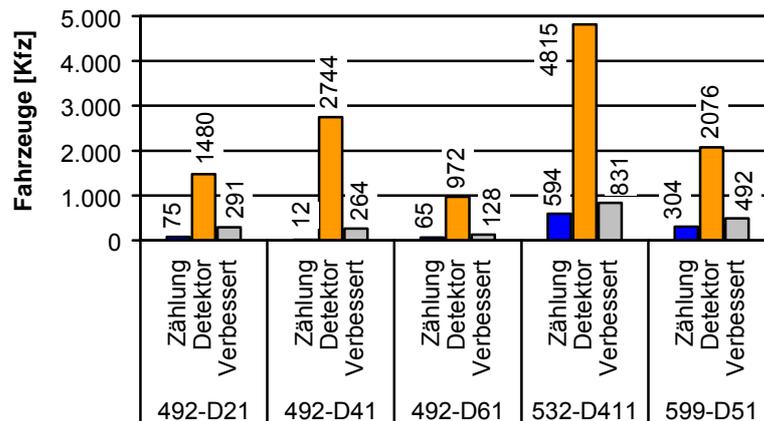


Bild 5.20: Verbesserung der Genauigkeit bezüglich der absoluten Werte

Die verbesserten Ganglinien für zwei der in Bild 5.20 aufgeführten Detektoren sind in Bild 5.21 und in Bild 5.22 dargestellt. Dabei ist auf die zusätzliche Darstellung des gleitenden Mittelwerts verzichtet worden, um die sehr niedrigen Ganglinien der gezählten Verkehrsstärke sowie der verbesserten detektierten Verkehrsstärke nicht zu verdecken. In diesen beiden Beispielen ist eine offenkundige Verbesserung der Qualität der Ganglinie zu erkennen. Verdeutlicht wird dieser Trend nicht nur durch die absoluten Zahlen und die optische Kontrolle sondern auch durch die statistische Analyse, da z. B. der Korrelationskoeffizient für den Detektor 492-D21 von -0,02 auf 0,37 und für den Detektor 492-D61 von -0,16 auf 0,27 steigt.

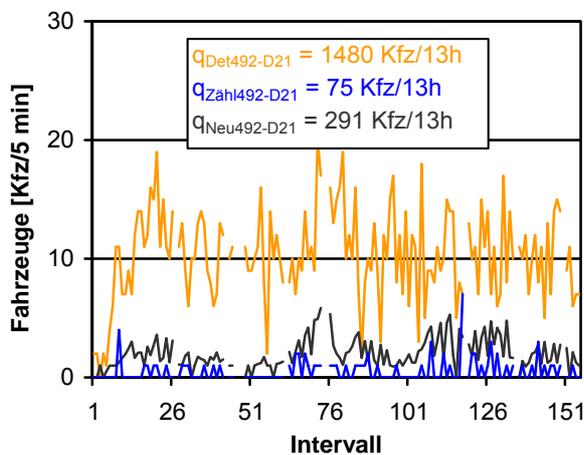


Bild 5.21: Datenverbesserung 492-D21

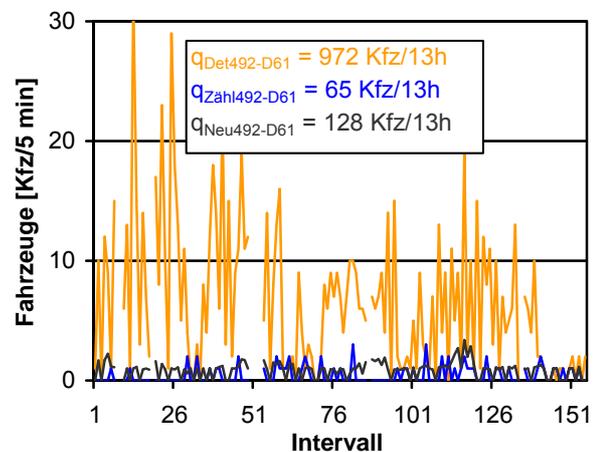


Bild 5.22: Datenverbesserung 492-D61

Für die beiden Untertypen des Fehlertyps 3 ist das Verbesserungsverfahren weniger erfolgreich, wobei jedoch zu beachten ist, dass die Ausgangsfehler in den meisten Fällen sehr viel geringer sind, also auch ein geringeres Verbesserungspotenzial besteht. Für den Detektor 509-D61, der praktisch über die gesamte Untersuchungsdauer eine fast konstant zu geringe Verkehrsstärke gemessen hat, sinkt der Gesamtfehler von 22,6 % auf 18,8 %. Die statistischen Kenngrößen WMQF und WMQFP ändern sich praktisch nicht und der Korrelationskoeffizient sinkt geringfügig. Für den Detektor 269-D13, der durch die zweite Ausprägung des Fehlertyps 2 (Übermittlung von 0 Fahrzeugen in einzelnen Intervallen) aufgefallen ist, ergibt sich eine Verbesserung aller betrachteten Größen. Die zugehörigen Ganglinien und die jeweiligen gleitenden

Mittelwerte sind in Bild 5.23 zu sehen. Insbesondere fällt auf, dass sich der gleitende Mittelwert der korrigierten Ganglinie über weite Zeitbereiche derjenigen der gezählten Kurve annähert. Für die Ganglinien selbst kann festgestellt werden, dass die starken Schwankungen nach unten abgemindert aber nicht ganz aufgehoben werden. Insbesondere durch diesen Effekt ist das höhere Niveau des gleitenden Mittelwerts der verbesserten Ganglinie während des größten Zeitbereichs, aber auch das niedrigere Niveau zu Beginn der Messung zu erklären, da zu Beginn der Messung große Abweichungen nach oben detektiert wurden, die auch in der Realität aufgetreten sind, aber durch die Glättung abgemindert wurden.

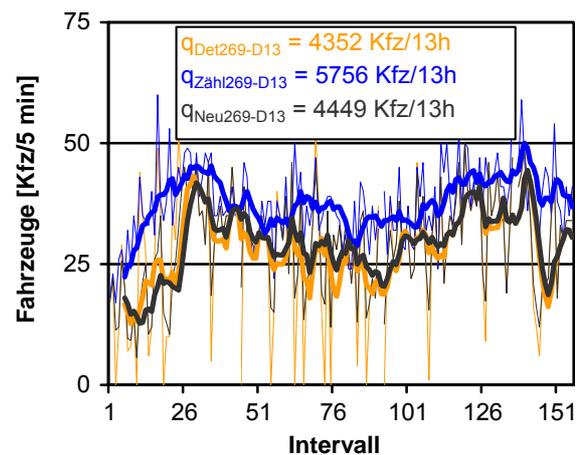


Bild 5.23: Datenverbesserung 269-D13

Hinsichtlich des Fehlertyps 4 ist es schwierig, eine Verbesserung der detektierten Ganglinien festzustellen. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass dieser Fehlertyp meist in sehr geringem Maß und zudem eher zufällig auftritt. Weiterhin wird er von den anderen Fehlertypen überlagert, so dass eine Quantifizierung wie oben bereits beschrieben nur bedingt möglich ist. Aus diesem Grund ist es auch nicht möglich, Änderungen der Ganglinien eindeutig der Verringerung der Detektion von Phantomfahrzeugen zuzuschreiben.

Gesamtbetrachtung

Im Folgenden werden sowohl die Genauigkeiten als auch die erzielten Verbesserungen, aufgeteilt in die Untersuchungsstellen mit einem oder mit zwei Nachbarströmen, analysiert. Ferner erfolgt die Betrachtung, inwiefern auch für die Datenverbesserung die Verkehrsstärke von Bedeutung ist. Beide Untersuchungen wurden für den Vergleich der detektierten und der gezählten Verkehrsstärken bereits im Rahmen der Datenanalyse durchgeführt und beschrieben. Insbesondere bei der Betrachtung der Verkehrsstärke hat sich ein starker Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke des betrachteten Stroms und der erreichbaren Genauigkeit ergeben.

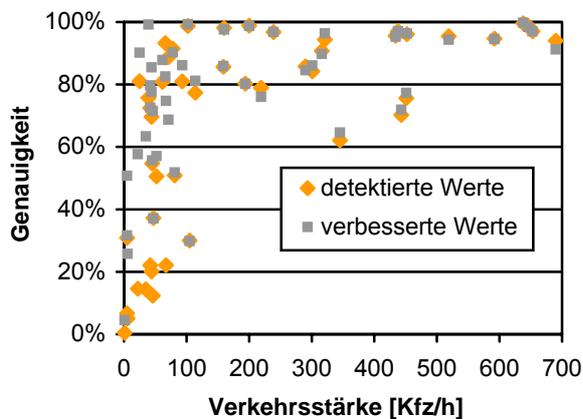
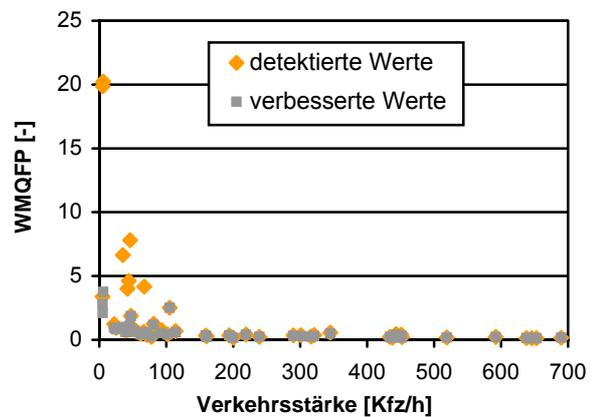
In Tabelle 5.5 sind die Untersuchungsstellen entsprechend der Anzahl der benachbarten Ströme aufgeteilt. Die Beispiele mit keinem bzw. mit mehr als zwei Nachbarströmen sind dabei nicht aufgegriffen, da sie sehr selten auftreten und als Sonderfälle angesehen werden. Bei den ursprünglich detektierten Werten erreichen die Untersuchungsgruppen mit einem bzw. mit zwei Nachbarströmen hinsichtlich der aufgeführten Kennwerte ungefähr die gleiche Genauigkeit.

Durch das Datenverbesserungsverfahren ist bei beiden Untersuchungsgruppen eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit zu erkennen. Diese fällt bezüglich der absoluten Werte für die Untersuchungsgruppe mit nur einem Nachbarstrom mit ungefähr 10 % und bezüglich des Korrelationskoeffizienten für die Untersuchungsgruppe mit zwei Nachbarströmen mit ungefähr 20 % deutlicher aus. Bezüglich der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler ist im Vergleich der beiden Untersuchungsgruppen lediglich ein geringer Unterschied auszumachen; in beiden Fällen sinkt der WMQF-Wert um ca. 40 %.

Tabelle 5.5: Verbesserung der Genauigkeit der Messung in Abhängigkeit von der Anzahl benachbarter Ströme

		Anzahl der benachbarten Ströme			
		1 Nachbarstrom		2 Nachbarströme	
		detektierte Werte	verbesserte Werte	detektierte Werte	verbesserte Werte
durchschnittliche Genauigkeit	absolute Werte	0,68	0,74	0,65	0,69
	Korrelationskoeffizient	0,45	0,50	0,45	0,54
	WMQF	9,36	5,94	8,18	4,82

Als besonders relevant für die Genauigkeit der Detektion hat sich die Verkehrsstärke erwiesen. Die in Kapitel 4 angestellten Überlegungen zu diesem Thema sind in Bild 5.24 und Bild 5.25 aufgegriffen und um die Datenreihen mit den verbesserten Daten erweitert. In Bild 5.24 ist zu erkennen, dass weiterhin eine Abhängigkeit zu der Verkehrsstärke besteht. Auch bei den verbesserten Werten ist die Genauigkeit der Werte wesentlich geringer, wenn die reale Verkehrsstärke besonders niedrig ist. Allerdings tritt nur noch ein Beispiel mit einer Genauigkeit von weniger als 20 % auf, die Genauigkeit hat sich also auch in diesem Bereich verbessert. Diese Tendenz wird von Bild 5.25 bestätigt. Es wird deutlich, dass die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehlerproportional weiterhin bei geringen Verkehrsstärken besonders groß ist. Im Vergleich zu den Originalwerten hat sich jedoch eine deutliche Verbesserung ergeben.

**Bild 5.24: Änderung der Genauigkeit bezüglich der absoluten Werte in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke****Bild 5.25: Genauigkeit bezüglich der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke**

Insgesamt ist es also möglich, mit dem vorgestellten Verfahren eine Überprüfung bzw. sogar eine Verbesserung der Daten vorzunehmen. Aufgrund des modularen Aufbaus ist es zudem ohne großen Aufwand möglich, das Verfahren auf besondere oder auf geänderte Randbedingungen anzupassen. Ist z. B. von einer Untersuchungsstelle bekannt, dass besonders viele Fahrzeuge noch während der Gelbzeit die Haltlinie passieren, kann diese in die Berechnung der oberen Grenze für die Verkehrsstärke einbezogen werden. Allerdings sollte jede Änderung in den Annahmen anhand von Daten, die in einer Vergleichsmessung erhoben werden, kontrolliert werden, da die Gesamtheit der Parameter bei einer Änderung nicht mehr als validiert gilt.

5.3.6 Offene Probleme

Das größte Problem bei der Anwendung des Verfahrens liegt darin, dass nicht nur durch die Länge der Freigabezeiten auf die Höhe der detektierten Verkehrsstärke geschlossen werden kann, sondern dass andersherum die detektierte Verkehrsstärke einen direkten Einfluss auf die Länge der Freigabezeiten hat. Aus diesem Grund spiegelt die Länge der Freigabezeit systembedingt eher die fehlerhaft detektierte als die tatsächlich vorhandene Verkehrsstärke wider. Wird nun diese Größe als maßgebende Basis für das Verbesserungsverfahren herangezogen, kann es zu nichtoptimalen Ergebnissen kommen.

Prinzipiell ist es mit dem hier vorgestellten Verfahren nicht möglich, die Datenqualität an Detektoren zu verbessern, die als Nachbarn einen sehr viel stärkeren Strom haben, der zu der gleichen Signalgruppe gehört, also gleichzeitig freigegeben ist, und die als Hauptfehlerquelle die zusätzliche Detektion dieses Nachbarstroms haben. Ein Beispiel hierfür ist der Detektor 511-D42. Wie in Bild 5.26 zu sehen ist, hat dieser Strom genau einen Nachbarstrom. Beide Ströme gehören zu der Signalgruppe K4, werden also gleichzeitig freigegeben. Der Strom 511-D42 beeinflusst den betrachteten Strom sehr stark: 23 % des mehr als sechsmal so starken Stroms werden mitgezählt. Da sich der Auslastungsfaktor anhand der detektierten Belastungen errechnet und die Freigabezeiten für diese Ströme identisch sind, kann für diesen Fall nicht erkannt werden, dass die eigentliche Belastung des Detektors 511-D42 sehr viel geringer ist. Als Ergebnis der Analyse ergibt sich demzufolge eine Ganglinie wie sie in Bild 5.27 dargestellt ist. Es ist zwar eine geringfügige Verbesserung zu erkennen, diese beruht jedoch nur auf der Glättung einiger unrealistischer Spitzen.

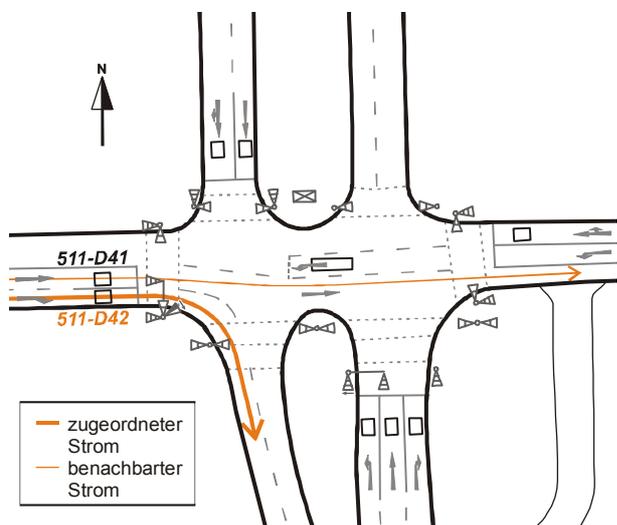


Bild 5.26: Lageplan Detektor 511-D42

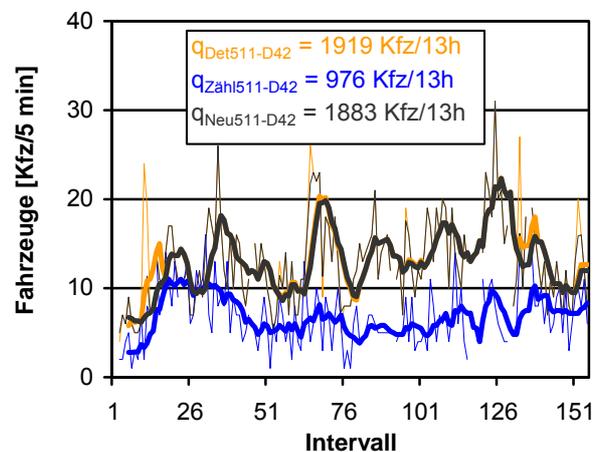


Bild 5.27: Datenverbesserung Detektor 511-D42

Weiterhin kann das Verfahren grundsätzlich nicht funktionieren, wenn die Verkehrsstärke und die Freigabezeit nur bedingt miteinander in Verbindung gesetzt werden können. Als Beispiel seien Knotenpunkte angeführt, die in mindestens einer der Zufahrten zusätzlich zu ihrer Signalisierung über einen grünen Pfeil verfügen, der es den betreffenden Verkehrsteilnehmern ermöglicht, nach einem kurzen Stopp die Haltlinie auch bei Rot zu passieren sofern keine konkurrierenden Ströme Vorrang genießen. In diesem Fall ist die Berechnung der oberen und unteren Grenzwerte für die Verkehrsstärke dieses Stroms nur möglich, wenn bekannt ist, dass der Anteil der Rechtsabbieger zu den anderen Strömen gering ist, so dass nur wenige Fahr-

zeuge zusätzlich abfließen können [47]. Weiterhin ist zu bedenken, dass auch die Berücksichtigung der Auslastung dieses Stroms, die für die Analyse der anderen Ströme notwendig ist, zu Problemen führen kann, so dass genau geprüft werden muss, ob das Verfahren angewendet werden kann, wenn ein grüner Pfeil in mindestens einer der Zufahrten angeordnet ist.

5.4 Fazit

Von den verschiedenen Verfahren, die für die Überprüfung von Verkehrsdaten zur Verfügung stehen, sind bezüglich der an innerstädtischen Lichtsignalanlagen erhobenen Verkehrsstärken prinzipiell die Ganglinienanalyse und der Längsvergleich geeignet. Beide Verfahren sind jedoch mit einigen Unsicherheiten behaftet. So empfiehlt sich die Ganglinienanalyse lediglich entlang des Hauptverkehrsstraßennetzes und der Längsvergleich liefert nur genaue Auskünfte, wenn zwischen den Messquerschnitten keine Ein- und Abbiegemöglichkeiten auf die bzw. von der Strecke bestehen. Eine Verknüpfung dieser Verfahren kann eventuell zuverlässigere Ergebnisse liefern, die dann auch nutzbar für die Verbesserung der Daten sind. Dies war jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

Stattdessen wurde ein Verfahren zur Datenüberprüfung und -verbesserung entwickelt, welches speziell auf die Analyse der Daten an innerstädtischen Lichtsignalanlagen ausgerichtet ist. Dieses Verfahren basiert ausschließlich auf der Analyse der Daten eines einzelnen Knotenpunkts. Eingangsgrößen sind neben den Planungsgrößen der Lichtsignalsteuerung die Freigabezeiten der zugeordneten Signalgruppe sowie der Sättigungsgrad aller Ströme, die zu der Lichtsignalanlage gehören.

Mit diesem Verfahren lässt sich eine deutliche Verbesserung der Daten erreichen. Dabei werden insbesondere die Fehler der Fehlertypen 1 und 2 minimiert. Auch die Auswirkungen eines in einzelnen Intervallen auftretenden Detektorausfalls, der nicht durch eine Fehlermeldung auffällt, sondern der zu der Überlieferung des Werts 0 führt, werden verringert.

Zieht man als Bewertungsgröße beispielsweise das Verhältnis der detektierten zu der realen Verkehrsstärke heran, sollte der Mittelwert im Idealfall 1,0 bei einer möglichst geringen Standardabweichung betragen. Extrahiert man für diese Betrachtung das schlechteste Beispiel aus der Analyse, erreicht das Verhältnis der ursprünglich detektierten zu der realen Ganglinie einen Mittelwert von 2,32 bei einer Standardabweichung von 3,59. Es werden also mehr als doppelt so viele Fahrzeuge wie tatsächlich vorhanden detektiert. Betrachtet man nun stattdessen die verbesserte Ganglinie verbessert sich das Ergebnis auf einen Mittelwert von 1,24 bei einer Standardabweichung von 0,70.

Es hat sich gezeigt, dass Fehler, die durch die Fehlertypen 1 und 2 bzw. durch die Merkmalsausprägung fehlender Daten des Fehlertypen 3 begründet sind, die besten Verbesserungsmöglichkeiten offenbaren. Insbesondere Fehler des Fehlertypen 4 sind schwer eliminierbar. Zudem ist es kaum möglich, eventuelle Erfolge bei der Elimination dieses Fehlertypen zu zeigen, da bereits die Quantifizierung des Fehlers großen Unwägbarkeiten unterliegt.

Weitere Abhängigkeiten z. B., ob sich Fehler bei Detektoren mit einem oder zwei Nachbarströmen besser eruieren und verbessern lassen, oder Abhängigkeiten von der Verkehrsstärke konnten nicht entdeckt werden.

Wie durch die Analyse in Bild 5.19 und in Bild 5.20 gezeigt wird, werden insbesondere große Fehler gut von dem Verfahren erkannt und auch weitgehend beseitigt. Nichtsdestotrotz sind die Abweichungen der neu berechneten von den gezählten Werten in diesen Fällen häufig noch sehr groß. Letztendlich bleibt dem Anwender übrig zu entscheiden, ob mit dem hier vorgestellten Verfahren korrigierte Ganglinien für die weitere Verwendung genutzt werden. Alternativ kann die besonders starke Korrektur der Ganglinien als Indiz für eine mögliche weitere Fehlerbehaftung gesehen und aus diesem Grund der zugeordnete Detektor für die weitere Verwendung nicht in Betracht gezogen werden.

Schwierigkeiten des Verfahrens sind im Wesentlichen systembedingt. Da es zwischen den Eingangsgrößen, die für das Verbesserungsverfahren benötigt werden, und dem korrekten Ergebnis auch Rückkopplungen gibt, kann das Ergebnis negativ beeinflusst werden.

6 Auswirkung auf die Signalsteuerung

In welchem Grad sich die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Fehlmessungen auf die Qualität der Signalsteuerung auswirken wird mit Hilfe der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation an drei verschiedenen Knotenpunkten untersucht. Dafür wird die Simulationssoftware VISSIM verwendet, die weitreichende Möglichkeiten der Abbildung verkehrsabhängiger Steuerungen bietet.

Aus den Erkenntnissen der Simulation werden Empfehlungen gewonnen, die eine möglichst geringe Beeinflussung der Signalsteuerung zum Ziel haben. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass das zuvor entwickelte Verfahren zur Datenverbesserung nicht für die Signalsteuerung geeignet ist, da es auf aggregierten Daten basiert, die Signalsteuerung aber die genauen sekundlich erhobenen Daten benötigt.

6.1 Aufbau der Untersuchung

In einem ersten Schritt werden die zu untersuchenden Knotenpunkte mit ihrer realen Geometrie und ihrer realen Steuerung in die Simulationsumgebung implementiert. Weiterhin wird das real gemessene Verkehrsaufkommen für den Simulationszeitraum von 3 h in Intervallen von 15 min aufgebracht. Aufgrund dieses Vorgehens entsteht über den Simulationszeitraum von 3 h eine Ganglinie, die den realen Verlauf der Verkehrsstärke nachbildet. Innerhalb des gleichen Zeitraums wurden in der empirischen Untersuchung die Staulängen erhoben, so dass anhand dieser Werte die Kalibrierung des Systems möglich ist.

Alle Planfälle werden in 20 Simulationsläufen abgebildet, um so stochastische Schwankungen weitestgehend auszuschließen. Damit wird die Genauigkeitsanforderung, dass in 95 % der betrachteten Intervalle die berechneten mittleren Verlustzeiten nicht mehr als 10 % von den tatsächlichen Verlustzeiten der Grundgesamtheit abweichen dürfen, erfüllt.

In der Simulation werden dann verschiedene Varianten untersucht: Zu Beginn werden die Untersuchungsstellen ohne eventuell vorhandene Fehlmessungen, die im Folgenden als Nullfälle bezeichnet werden, betrachtet. Weiterhin werden verschiedene Planfälle analysiert, bei denen nur einzelne Detektoren nicht korrekt messen und mit den real ermittelten Fehlern behaftet sind, sowie die Planfälle, bei denen alle Detektoren eines Knotenpunkts mit den real ermittelten Fehlern messen.

Der wichtigste Schritt dieser Untersuchung ist die systematische Untersuchung einzelner Randbedingungen und deren Einfluss auf die Qualität des Verkehrsablaufs. Dafür werden verschie-

dene Situationen definiert, die sich z. B. hinsichtlich der auftretenden Verkehrsstärken oder Fehler grundlegend von der Realität unterscheiden können aber auf der realen Knotenpunktgeometrie und der realen Steuerung basieren. Aufbauend auf den so entstandenen Varianten wird jeweils ein festgelegter Parameter variiert, so dass anhand der Veränderungen der in der Simulation ermittelten Bewertungsgrößen dessen Einfluss auf die Qualität der Steuerung mithilfe der Simulation ersichtlich wird.

Als Bewertungsgröße wird in dieser Arbeit neben der schon erwähnten Betrachtung der Staulängen für die Kalibrierung der Simulation im Wesentlichen auf die Verlustzeit zurückgegriffen, da es sich dabei um eine Bewertungsgröße handelt, die zum einen die sehr gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet und zum anderen direkt die Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs nach dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [18] ermöglicht.

6.2 Implementierung der Detektorstörungen

Innerhalb der mikroskopischen Simulationsumgebung treten systembedingt keine Detektorstörungen auf. Die Detektoren sind auf den Fahrstreifen angeordnet und werden von jedem passierenden Fahrzeug aktiviert. Eine Beeinflussung durch Fahrzeuge auf benachbarten Fahrstreifen ist hingegen nicht möglich. Aus diesem Grund muss eine Methodik entwickelt werden, die beschreibt wie die verschiedenen Fehlerarten in die Simulation integriert werden können. Weitreichende Überlegungen zu dieser Thematik wurden von WEINRICH [56] angestellt.

Das größte Problem bei der Implementierung der Detektorstörungen ist die Integration des stochastischen Prozesses der fehlerhaften Messungen in eine nach streng logischen Bedingungen arbeitende Ablaufbeschreibung. Als Lösungsansatz wird genutzt, dass in VISSIM erzeugte Fahrzeuge gemäß der Poissonverteilung in das Streckennetz eingespeist werden. Für die einzelnen Fehler werden daher Hilfsstrecken mit jeweils einem Detektor angelegt, die mit einer bestimmten Verkehrsstärke belastet werden. Die Überfahung dieses Detektors ist damit ein stochastischer Prozess, dessen Wahrscheinlichkeit in direkter Abhängigkeit zu der dortigen Verkehrsstärke steht. In der Logik werden die Bedingungen, die für die Berücksichtigung der Detektorstörung notwendig sind, in Abhängigkeit zu der Aktivierung oder Deaktivierung dieser Detektoren gesetzt, so dass die zugehörigen Ereignisse mit der gesetzten Wahrscheinlichkeit eintreten.

Als Beispiel wird hier die Integration des Fehlertyps 3 (Nichterfassung von Fahrzeugen) näher beschrieben. Dieser Fehler wirkt sich insbesondere auf die Messung von Zeitlücken aus. Werden einzelne Fahrzeuge nicht erfasst, kann die Folge sein, dass die detektierte Zeitlücke den Grenzwert für die Aufrechterhaltung der Freigabezeit überschreitet, obwohl die tatsächliche Zeitlücke wesentlich geringer ist. Die Prinzipskizze für die Integration dieses Fehlers in die Ablauflogik ist in Bild 6.1 dargestellt.

Zuerst wird wie oben beschrieben eine Hilfsstrecke erzeugt, auf der ein Detektor (D_{HS}) mit der gewünschten Wahrscheinlichkeit von Fahrzeugen überfahren wird. Innerhalb der Steuerungslogik wird eine Variable X definiert, die bei Aktivierung des Detektors den Wert 1 annimmt und ansonsten mit 0 belegt ist. Der Wert 1 symbolisiert also, dass eine Detektorstörung vorliegt. Für den Fall, dass die Variable 0 ist, ändert sich an der vorhandenen Bemessungslogik nichts. Ist die Variable jedoch 1, wird der Steuerungslogik auch im Fall der Belegung des analysierten Detektors D_{AN} fälschlicherweise übermittelt, dass derzeit keine Verkehrsnachfrage auf dem analysierten Detektor besteht.

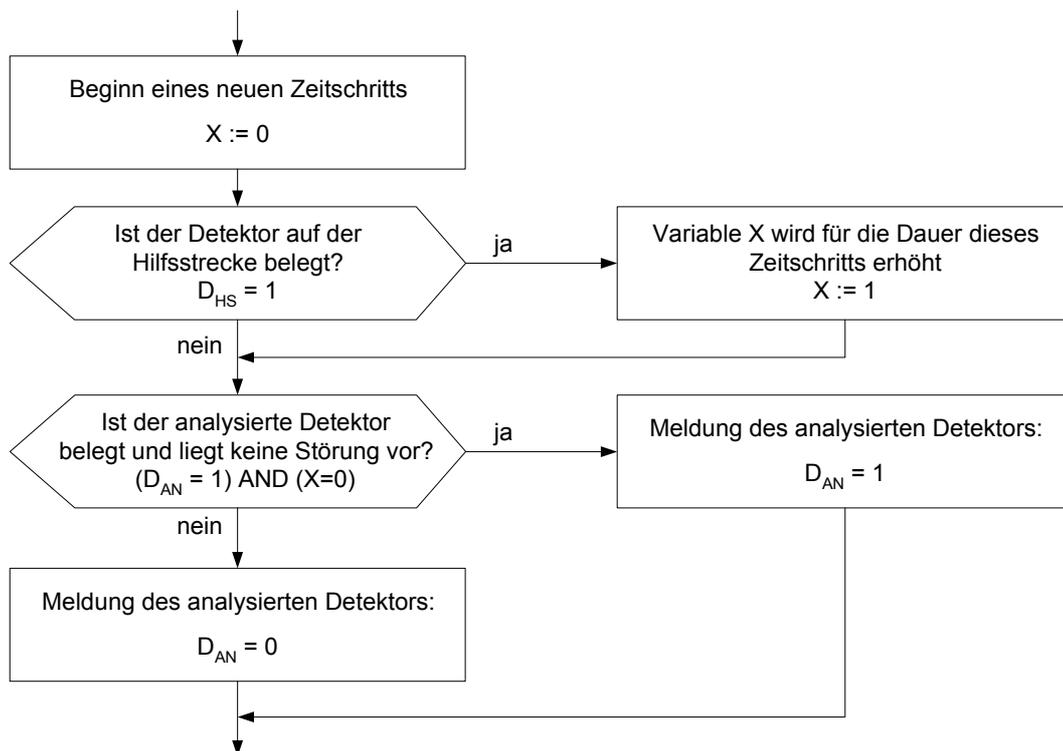


Bild 6.1: Implementierung des Fehlertyps 3 in die Steuerungslogik

6.3 Analyse der real existierenden Fehler

Bei der Abbildung der einzelnen real existierenden Fehler zeigt sich kein einheitliches Bild bezüglich der Auswirkungen dieser Fehler. Dies liegt zum einen daran, dass die Fehler stark variieren und zum anderen daran, dass die Lage und die Berücksichtigung der einzelnen Detektoren in der Logik starke Auswirkungen auf die entstehenden Fehler haben. Prinzipiell lassen sich jedoch einige Tendenzen beschreiben:

- Anforderungsdetektoren, die eine zu große Verkehrsstärke messen, wirken sich in der Regel nicht negativ auf die Qualität des Verkehrsablaufs aus, da sie in den meisten Fällen erst nach einer dauerhaften Belegung von mindestens 3 s eine Anforderung melden. Ist diese Ansprechschwelle niedriger, ergeben sich mit einer hohen Wahrscheinlichkeit negative Auswirkung auf die Qualität des Verkehrsablaufs.
- Messen Anforderungsdetektoren weniger als die tatsächlich vorhandene Verkehrsstärke, sind in der Regel geringfügige Beeinträchtigungen der Qualität des Verkehrsablaufs festzustellen, da es zu einer Verschiebung des optimalen Freigabezeitbeginns des betrachteten Stroms kommen kann.
- Erheben Detektoren, die für die Bemessung der Freigabezeiten verantwortlich sind, eine zu hohe Verkehrsstärke, ist eine Verschlechterung der Qualität des Verkehrsablaufs in den konkurrierenden Strömen zu beobachten, da sich die zur Verfügung stehende Freigabezeit für diese Ströme verringert. Eine Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs im betrachteten Strom ist in der Regel nicht zu beobachten, da dieser in diesem Fall nicht oder nur in geringem Maße nachgefragt ist und so keine Fahrzeuge vorhanden sind, auf die sich die verlängerte Freigabezeit positiv auswirkt.

- Hat eine Steuerung mehr Freiheitsgrade, sind die Auswirkungen eventueller Detektorstörungen deutlicher als bei einer Steuerung, die weniger flexibel reagieren kann. In dieser Arbeit wurde als Beispiel eine Steuerung mit fester Umlaufzeit mit einer Steuerung mit variabler Umlaufzeit verglichen. Demgegenüber stehen jedoch die Vorteile für die Qualität des Verkehrsablaufs, die durch eine Steuerung mit mehr Freiheitsgraden erreicht werden können, so dass sich aufgrund der höheren Fehleranfälligkeit nicht automatisch eine geringere Qualität des Verkehrsablaufs ergibt.

Die Gesamtheit aller Untersuchungsergebnisse für die gleichzeitige Implementierung aller Detektorfehler ist in Tabelle 6.1 dargestellt. Dabei werden für die einzelnen Varianten jeweils zwei verschiedene Bewertungsmaßstäbe angewendet. Zum einen erfolgt die Einschätzung entsprechend des Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [18]. Das Verfahren beruht auf der Beurteilung der einzelnen Verkehrsströme entsprechend ihrer Verlustzeit an der Lichtsignalanlage und der anschließenden Zuordnung zu sechs verschiedenen Qualitätsstufen. Die Qualitätsstufe A entspricht einer Verlustzeit von bis zu 20 s und kennzeichnet die bestmögliche Qualität des Verkehrsablaufs. Der Qualitätsstufe F liegt eine Verlustzeit von mehr als 100 s zugrunde und kennzeichnet damit die schlechtmöglichste Qualität des Verkehrsablaufs. Maßgebend für die Gesamtbeurteilung ist nach diesem Verfahren der Strom mit der höchsten durchschnittlichen Verlustzeit. Zum anderen erfolgt die Berechnung einer mittleren bewerteten Verlustzeit. In diese Berechnung werden alle Verkehrsströme entsprechend ihrer Verkehrsstärken gewichtet einbezogen. Zur Verdeutlichung der Ergebnisse sind Verbesserungen der Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs für den Fall, dass alle realen Detektorfehler abgebildet sind, im Vergleich zum Nullfall in Grün und schlechtere Beurteilungen in Rot dargestellt.

Tabelle 6.1: Veränderung der Knotenpunktbewertung aufgrund aller vorhandenen Detektorfehler

		Qualitätsstufe nach HBS		mittlere bewertete Verlustzeit [s/Fz]	
		Nullfall	alle realen Detektorfehler	Nullfall	alle realen Detektorfehler
KP 492	feste Umlaufzeit	C bis E	C bis D	27,8	28,0
	variable Umlaufzeit	B bis D	B bis C	25,8	28,9
KP 509	feste Umlaufzeit	C bis E	C bis E	23,9	24,0
	variable Umlaufzeit	A bis B	A bis B	17,5	17,1
KP 511	feste Umlaufzeit	A bis B	A bis B	10,1	14,0
	variable Umlaufzeit	A bis B	A bis B	10,0	14,0

Während die Beurteilung nach dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen in vier der sechs untersuchten Fälle keine Änderung der Qualitätsstufe offenbart und beim Knotenpunkt 492 sowohl für die feste als auch für die variable Umlaufzeit sogar eine Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs der Detektorfehler zeigt, ergibt sich in fast allen Beispielen ein Anstieg der mittleren bewerteten Verlustzeit, der zwischen 0,1 s/Kfz und 4,0 s/Kfz beträgt. Die Verbesserung entsprechend des Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen resultiert daraus, dass Fehlfunktionen von Detektoren insbesondere die schwach belasteten Ströme übervorteilen, die ansonsten in vielen Fällen lange Wartezeiten zu verzeichnen hätten.

Als Besonderheit ist anzumerken, dass die Änderungen der Ergebnisse (besonders hinsichtlich der Betrachtung der mittleren bewerteten Verlustzeit) sehr viel geringer sind, als aufgrund der Addition der Einzelfehler zu vermuten wäre. Dies begründet sich daher, dass sich die unterschiedlichen Fehler in vielen Fällen auch gegenseitig aufheben.

6.4 Systematische Analyse relevanter Parameter

Anhand der systematischen Variation der für die Signalsteuerung relevanten Parameter kann die Größe der Auswirkungen verschiedener Fehler auf die Qualität des Verkehrsablaufs festgestellt werden. Es werden die Größe der auftretenden Fehler, das Verkehrsstärkeverhältnis der gestörten Richtung zu der Gegenrichtung und die Detektorlage variiert. Für die Beurteilung der Auswirkungen wird jeweils die so genannte Verlustzeitrate bestimmt. Diese setzt die Verlustzeit im Fall des jeweiligen Nullfalls auf 100 % und beschreibt dann prozentual die Abweichung von diesem Wert.

6.4.1 Größe des auftretenden Fehlers

Die Variation des auftretenden Fehlers erfolgt bei Detektoren, die auf Zeitlücken bemessen, innerhalb des Bereichs von gar keiner Erfassung des Detektors bis zu der 1,5-fachen Erfassung der tatsächlichen Verkehrsstärke. Der Fehler wird an jeweils einem Detektor implementiert, und es werden die Auswirkungen des Fehlers sowohl auf die zu dem detektierten Strom parallel als auch quer verlaufenden Ströme ermittelt.

Es zeigt sich, dass an Knotenpunkten mit einer mittleren Auslastung (Qualitätsstufe C in allen Knotenpunktarmen) in der Regel nur geringe Beeinträchtigungen zu erwarten sind, wenn diese mit einer Steuerung mit fester Umlaufzeit betrieben werden. Dabei ist es nicht wichtig, ob die gestörten Detektoren in einem Hauptstrom oder in einem Nebenstrom angeordnet sind. Beispielhaft ist in Bild 6.2 die Änderung der Verlustzeitrate für den Fall einer geänderten Detektionsrate im Hauptstrom dargestellt. Werden dort weniger Fahrzeuge detektiert, als tatsächlich gefahren sind, steigt die durchschnittliche Verlustzeit aller Hauptströme um bis zu 4 %. Im Gegenzug sinkt die Verlustzeit in den Nebenströmen um ungefähr 1 %. Für den Fall, dass der betrachtete Detektor im Hauptstrom mehr Verkehr als tatsächlich vorhanden detektiert, sinkt die Verlustzeit in den Hauptströmen, und in den Nebenströmen ist eine Erhöhung der Verlustzeiten zu verzeichnen.

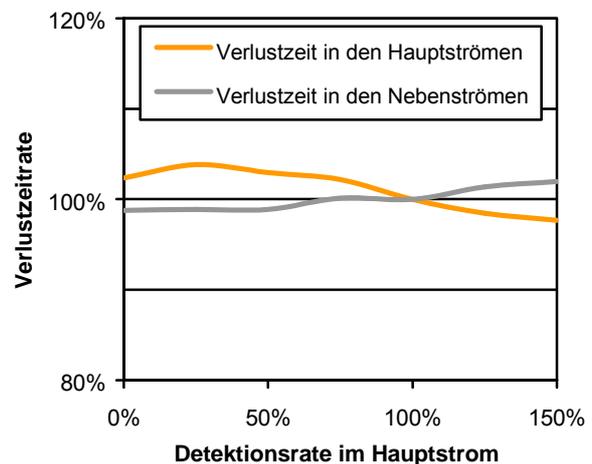


Bild 6.2: Variation der Verlustzeit bei geänderter Detektionsrate im Hauptstrom, feste Umlaufzeit

Ein anderes Bild ergibt sich, wenn die Steuerung eine variable Umlaufzeit hat. In diesen Fällen variiert die Verlustzeit sowohl in den Hauptströmen als auch in den Nebenströmen, wie in Bild 6.3 und Bild 6.4 zu sehen ist, sehr stark. Die größten Auswirkungen sind für die Hauptströme zu verzeichnen, wenn dort weniger als das tatsächliche Verkehrsaufkommen detektiert wird. Bereits bei einer relativ geringen Fehldetektionsrate von ungefähr 25 % steigen die Verlustzei-

ten auf mehr als den dreifachen Wert. Sinkt die Detektionsrate allerdings noch weiter, steigt die Verlustzeit im Vergleich dazu nur noch geringfügig. Andernfalls, also bei steigender Detektionsrate im Hauptstrom, sinkt die Verlustzeit im Hauptstrom auf ungefähr 80 % des Werts bei korrekter Funktionsweise. Die Nebenströme werden insgesamt weniger beeinträchtigt. Einerseits führt die Fehldetektion im Hauptstrom zu einer Verbesserung der Verlustzeit in den Nebenströmen um ca. 30 %, andererseits erhöhen sich genau diese Verlustzeiten bei übermäßiger Detektion des Hauptstroms um maximal 15 %.

Fehldetektionen im Nebenstrom wirken sich insgesamt etwas weniger auf die Verlustzeiten aus. Wenn der zugeordnete Detektor 50 % mehr Fahrzeuge misst, als dort tatsächlich gefahren sind, erhöht sich die Verlustzeit in den Hauptströmen um ca. 20 %. Dabei ist keine Verringerung der Verlustzeiten des Nebenstroms zu beobachten. Andernfalls, also bei zu wenig detektierten Fahrzeugen, sinkt die Verlustzeit der Hauptströme um ca. 15 %, und es erfolgt eine Erhöhung der Verlustzeiten in den Nebenströmen um bis zu 6 %.

Die Unterschiede in den Auswirkungen lassen sich insbesondere anhand der geringeren Verkehrsstärke in den Nebenströmen erklären. Diese führt zum einen dazu, dass bei gleicher Variation der Detektionsrate die absolute Anzahl fehlerhafter Messungen wesentlich geringer ist. Zum anderen führt eine Verkürzung der Freigabezeiten in den Nebenströmen aufgrund deren geringeren Auslastung zu keiner wesentlichen Verschlechterung der Qualität des Verkehrsablaufs.

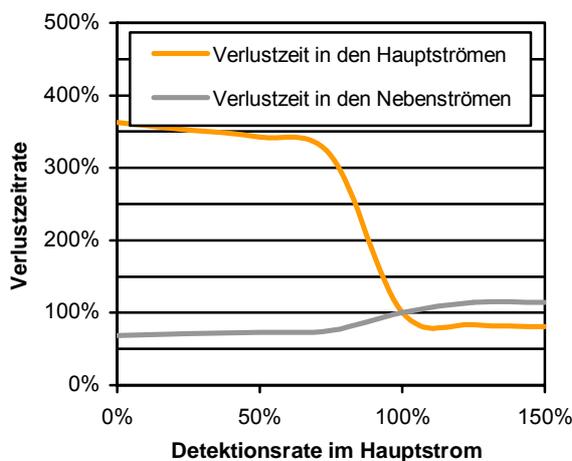


Bild 6.3: Variation der Verlustzeit bei geänderter Detektionsrate im Hauptstrom, variable Umlaufzeit

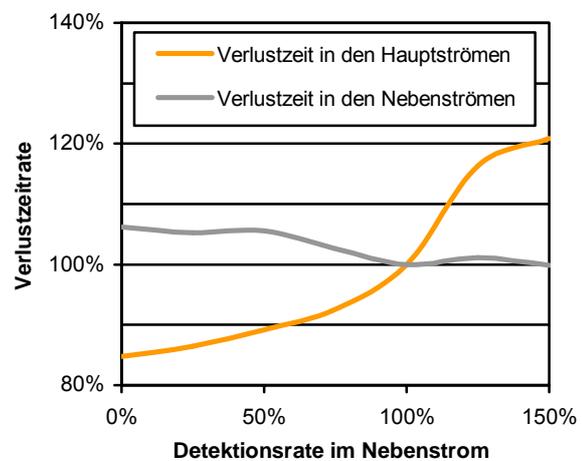


Bild 6.4: Variation der Verlustzeit bei geänderter Detektionsrate im Nebenstrom, variable Umlaufzeit

Die Vorgehensweise bei der Untersuchung von Detektoren, die sowohl Zeitlücken als auch Anforderungen erfassen, ist etwas anders. In vielen Fällen sind diese Detektoren auf Linksabbiegefahrstreifen angeordnet. Besonders häufig ist der Fehlertyp 1 (Fahrzeuge auf benachbarten Fahrstreifen werden mitgezählt) zu beobachten. Aus diesem Grund wird der Anteil der mitgezählten Fahrzeuge auf den benachbarten Fahrstreifen variiert. Die aus dieser Betrachtung resultierende Änderung der Verlustzeitrate für eine Steuerung mit fester Umlaufzeit ist in Bild 6.5 dargestellt. Tendenziell sind die Auswirkungen bei Steuerungen, die bereits nach einer Belegungszeit von 1 s eine Anforderung registrieren, größer. Dieser Effekt fällt umso mehr ins Gewicht, je größer der Anteil des benachbarten Stroms ist, der zusätzlich erfasst wird. Signifi-

kante Verschlechterungen von mehr als 10 % der durchschnittlichen Verlustzeit sind insgesamt nur zu beobachten, wenn die benachbarten Ströme komplett mitgezählt werden. Für Steuerungen mit einer variablen Umlaufzeit ergibt sich ein ähnliches Bild. Auch für diesen Fall treten Verschlechterungen der Verlustzeitrate um mehr als 10 % erst bei vollständiger Detektion des Nachbarstroms auf.

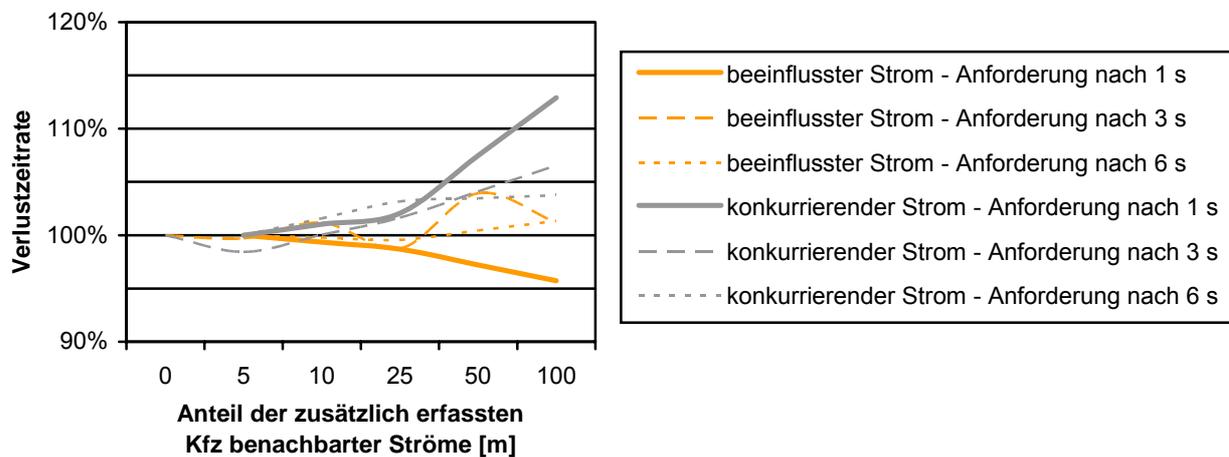


Bild 6.5: Variation der Verlustzeit bei Anforderungsdetektoren, feste Umlaufzeit

6.4.2 Verkehrsstärkeverhältnis

In den meisten Fällen ist nicht nur ein Detektor relevant für die Länge einer Phase, sondern es werden die Belegungsinformationen mehrerer gleichzeitig freigegebener Ströme abgefragt. Aus diesem Grund erfolgt nun eine Überprüfung hinsichtlich der Relevanz der dort vorhandenen Verkehrsstärken für die Verkehrsqualität am Knotenpunkt bei gestörten Detektoren. Hierfür wird die Verkehrsbelastung der gleichzeitig freigegebenen Zufahrt q_{gg} variiert, während sie in der Zufahrt, in der die gestörten Detektoren liegen, konstant bleibt. Ein Verkehrsstärkeverhältnis von 0,33 bedeutet, dass die gleichzeitig freigegebene Zufahrt nur mit einem Drittel des Verkehrsaufkommens der gestörten Zufahrt belastet ist. Art und Umfang der Detektorstörung sind bei dieser Untersuchung konstante Parameter.

Als erstes wird ein in der Nebenrichtung liegender Detektor untersucht. Die Messung dieses Detektors wird durch den Fehlertyp 3 beeinflusst. Insgesamt werden ca. 20 % der Fahrzeuge nicht erfasst. Wird die Lichtsignalanlage über eine Steuerung mit fester Umlaufzeit betrieben, ist deutlich zu erkennen, dass sich die Verlustzeit der Nebenströme weder verringert noch erhöht, wenn die Verkehrsstärke in der gleichzeitig freigegebenen Zufahrt variiert wird (vgl. Bild 6.6). Die Verlustzeiten der Hauptströme steigen allerdings bei einer Erhöhung der Verkehrsstärke stark an. Bei einer Steuerung mit variabler Umlaufzeit ist diese Tendenz für die Hauptströme gleichfalls zu beachten (vgl. Bild 6.7). Zusätzlich steigen jedoch auch die Verlustzeiten in den Nebenströmen bei einer steigenden Verkehrsstärke im beeinflussenden Strom und sinken bei geringerer Verkehrsstärke im beeinflussenden Strom. An dieser Stelle ist deutlich zu sehen, dass die gesamte Betrachtung des Verkehrsstärkeverhältnisses eher problematisch zu beurteilen ist, da durch insgesamt steigende Verkehrsaufkommen der Knotenpunkt weiter an die Kapazitätsgrenze rückt und längere Wartezeiten vor allem aufgrund dieses Effekts entstehen und sich nicht der Fehlmessung zuordnen lassen. Andernfalls wäre zu erwarten gewesen, dass

die Verlustzeiten in den Nebenströmen bei einem steigenden Anteil von Fahrzeugen im gleichzeitig freigegebenen Strom nicht ansteigen, sondern gleich bleiben oder sinken müssten.

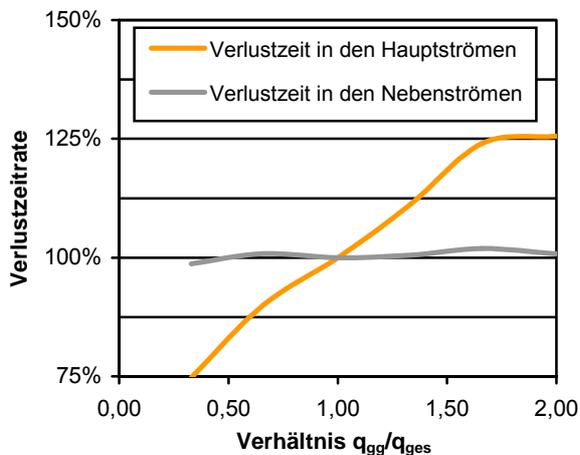


Bild 6.6: Fehler in der Nebenrichtung, Variation der Verlustzeit bei geändertem Verkehrsstärkeverhältnis, feste Umlaufzeit

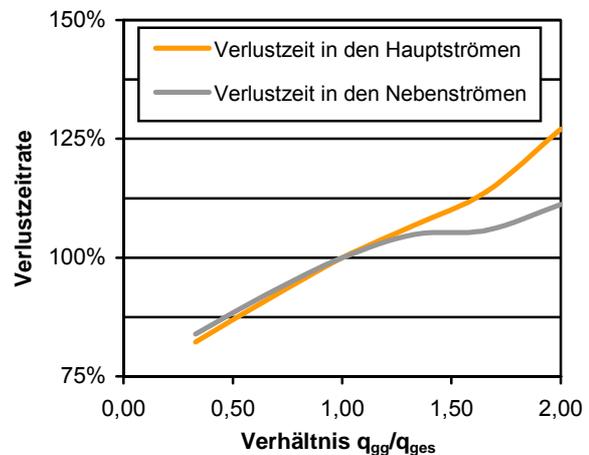


Bild 6.7: Fehler in der Nebenrichtung, Variation der Verlustzeit bei geändertem Verkehrsstärkeverhältnis, variable Umlaufzeit

Weiterhin wird ein in der Hauptrichtung angeordneter Detektor betrachtet und es erfolgen Untersuchungen von Detektoren, die sowohl Anforderungen berücksichtigen als auch Zeitlücken bemessen. Dort zeigen sich ähnliche Probleme wie bei der obigen Analyse. Auch in dieser Betrachtung hat die Variation der gesamten Verkehrsstärke einen sehr viel stärkeren Einfluss auf das Ergebnis, als die eigentlich untersuchte Fragestellung.

Insgesamt kann also aus der Analyse des Verkehrsstärkeverhältnisses keine Aussage zu dem Einfluss von Detektorstörungen getroffen werden, da es sich bei diesem Zusammenhang um untergeordnete Effekte handelt.

6.4.3 Detektorlage

Um die Auswirkungen der Entfernung der Detektoren von der Haltlinie zu ermitteln, wird an einem Knotenpunkt die Lage des Detektors variiert. Alle anderen Randbedingungen bleiben gleich. Die Untersuchung erfolgt anhand eines Detektors, der in der Hauptrichtung angeordnet ist und dessen Aufgabe die Bemessung von Zeitlücken ist. Als konstante Fehlergröße wird vorausgesetzt, dass 25 % der Fahrzeuge nicht erfasst werden.

Die Auswirkungen der geänderten Detektorlage sind in Bild 6.8 und in Bild 6.9 zu sehen. Es zeigt sich, dass sich sowohl bei fester als auch bei variabler Umlaufzeit nur geringe Änderungen der Verlustzeitrate ergeben. Diese scheinen auch nicht systematisierbar. Im Falle fester Umlaufzeit sinkt die Verlustzeit in den Hauptströmen um ungefähr 4 % bei einer größeren Entfernung. In den Nebenströmen ergibt sich keinerlei Veränderung der Verlustzeit. Ist die Umlaufzeit variabel, ist die größte Änderung in den Nebenströmen zu beobachten: dort steigen die Verlustzeiten um ca. 1,5 % bei einer Veränderung der Detektorlage von 3 m auf 20 m. Liegt der Detektor jedoch weiter von der Haltlinie entfernt, sinkt die Verlustzeit wieder auf das Ausgangsniveau. In diesem Fall ist für die Verlustzeit in den Hauptströmen keine Veränderung registrierbar.

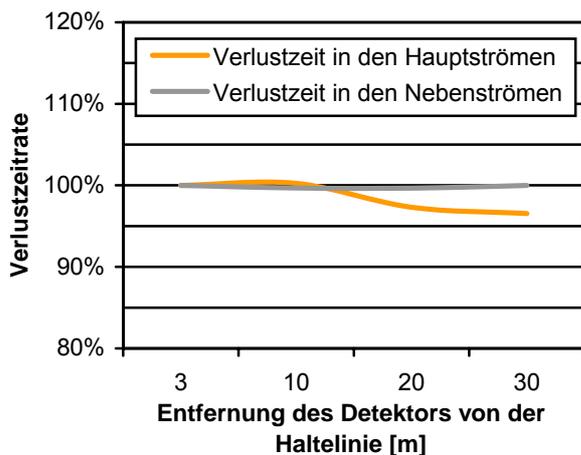


Bild 6.8: Variation der Verlustzeit bei geänderter Detektorlage, feste Umlaufzeit

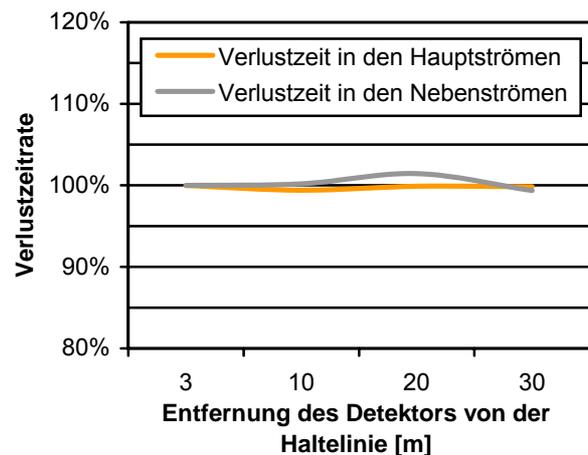


Bild 6.9: Variation der Verlustzeit bei geänderter Detektorlage, variable Umlaufzeit

6.5 Empfehlungen für die Verringerung der Auswirkungen auf die Signalsteuerung

Aus den gewonnenen Erkenntnissen bezüglich der Auswirkungen von Detektorstörungen auf die Qualität des Verkehrsablaufs an Lichtsignalanlagen ergeben sich im Wesentlichen zwei Wege, die Auswirkungen möglichst gering zu halten. Einerseits handelt es sich dabei um Maßnahmen, die eine weitestgehend korrekte Funktion der Detektoren sichern sollen, andererseits kann die der Signalsteuerung zugrunde liegende Logik so robust gestaltet sein, dass sich Fehler nur bedingt auswirken.

Zu den Maßnahmen, die die Funktion der Detektoren sichern sollen, gehört die gewissenhafte Einstellung der Detektoren, so dass möglichst alle Fahrzeuge des zugeordneten Stroms aber nur ein geringer Anteil der benachbarten Ströme erfasst werden. Außerdem sollten Detektoren, die derart angeordnet sind, dass eine Beeinflussung durch in andere Richtung fahrende Fahrzeuge wahrscheinlich ist, mit einer Richtungserkennung ausgestattet sein, so dass die zusätzliche Detektion der passierenden Fahrzeuge weitestgehend ausgeschlossen werden kann. Für den Fall, dass offensichtliche Fehler auftreten, wie z. B. die häufige Übermittlung des Werts 0 in einem Hauptstrom während der Hauptverkehrszeit, sollten Algorithmen zur Verringerung dieser Fehler in die Auswerteschaltung der Detektoren integriert werden.

Bezüglich der robusten Gestaltung der Logik haben GLATZ und HOFFMANN [27] nachgewiesen, dass zumindest in den Beispielen aus den Richtlinien für Lichtsignalanlagen gewährleistet zu sein scheint, dass sich Fehler nur bedingt auswirken. Maßgebende Empfehlung der Arbeit von GLATZ und HOFFMANN war, dass Schaltungen mit Bedarfsphasenanforderung nicht gewählt werden sollen, wenn keine Algorithmen zu Fehlererkennung implementiert sind, da in diesem Fall eine eventuell notwendige Phase für die Freigabe eines eigentlich anfordernden Stroms nicht geschaltet wird, so dass dieser Strom nicht abfließen kann. Demgegenüber steht jedoch die sehr starke Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs bei zunehmender Flexibilisierung der Signalschaltung.

Auch in der hier vorliegenden Arbeit wurden Detektoren untersucht, die für die Anforderung einer Bedarfsphase relevant sind. In der Regel handelt es sich dabei um eher schwach belastete Detektoren, die häufig mit einer geringen Genauigkeit messen. Während der Videoaufnahmen für die Ermittlung der realen Verkehrsstärken konnte in einigen Fällen beobachtet werden, dass Fahrzeuge auf diesen Detektoren bei längeren Wartezeiten noch einmal zurückgesetzt haben, um den Detektor dann doch noch auszulösen. Gefährliche Fahrmanöver oder Rotlichtmissachtungen wurden hingegen nicht beobachtet. Insgesamt erscheint es wichtig, dass individuell abgewogen wird, ob eine Verbesserung der stärker belasteten Ströme die eventuelle Verschlechterung der Qualität des Verkehrsablaufs einzelner Ströme bei der Bedarfsphasen-anforderung im Fall nicht funktionierender Anforderungen rechtfertigt. Der generelle Verzicht auf die Anforderung von Bedarfsphasen kann aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit nicht befürwortet werden.

An dieser Stelle wird daher lediglich zusätzlich empfohlen, dass Anforderungsdetektoren in keinem Fall bereits nach einer Anforderung von nur 1 s eine neue Phase aktivieren dürfen. Selbst wenn die oben bereits angesprochene Richtungserkennung funktioniert, ist dies von Bedeutung, da eine Fehldetektion häufig auch durch parallel verlaufende benachbarte Ströme ausgelöst wird.

6.6 Festlegung eines Qualitätsmaßstabs für die Genauigkeit der Daten für die Signalsteuerung

Anhand der mit Hilfe der Simulation gewonnenen Ergebnisse ist es möglich, Empfehlungen für die Beurteilung der Genauigkeit der Daten zu treffen. Da sich die Auswirkungen der Detektorfehler je nachdem, ob es sich um Steuerungen mit fester oder variabler Umlaufzeit handelt, oder ob sie in der Haupt- oder Nebenrichtung auftreten, sehr stark unterscheiden, werden für diese Fälle unterschiedliche Grenzwerte festgelegt (vgl. Tabelle 6.2).

Tabelle 6.2: Genauigkeitsanforderungen für die Signalsteuerung

		feste Umlaufzeit	variable Umlaufzeit
Detektoren in der	... Hauptrichtung	75 % bis 125 %	95 % bis 125 %
	... Nebenrichtung	75 % bis 125 %	75 % bis 105 %

Detektorfehler, die der Hauptrichtung zugeordnet sind, wirken sich insbesondere negativ auf die Qualität des Verkehrsablaufs aus, wenn sie Steuerungen mit einer variablen Umlaufzeit zugeordnet sind und eine zu geringe Verkehrsstärke detektiert wird. Aus diesem Grund dürfen Abweichungen nach unten nur eine sehr kleine Abweichung von max. 5 % erfahren. Nach oben gerichtete Abweichungen werden auch in einer etwas größeren Dimension von bis zu 25 % toleriert.

Treten die Detektorfehler an Detektoren auf, die der Nebenrichtung zugeordnet sind, und es handelt sich um eine Steuerung mit variabler Umlaufzeit ergibt sich ein anderes Bild. In diesem Fall wirkt sich insbesondere die Detektion von zu vielen Fahrzeugen negativ auf die Qualität des Verkehrsablaufs aus. Die Grenzen werden also genau andersherum definiert, wie dies oben vorgenommen wurde: Abweichungen nach unten dürfen bis zu 25 % betragen, nach oben jedoch 5 % nicht überschreiten.

Für die Varianten mit einer festen Umlaufzeit haben sich insgesamt keine bedeutenden Auswirkungen auf die Qualität des Verkehrsablaufs ergeben. Das Festlegen von Genauigkeitsanforderungen ist daher nicht von grundlegender Bedeutung. Um jedoch insgesamt eine akzeptable Datenqualität und eine möglichst gute Einheitlichkeit mit den Werten für Steuerungen mit variabler Umlaufzeit zu gewährleisten, werden die Grenzen für die tolerierte Abweichung nach oben oder unten auf jeweils 25 % gesetzt.

Bezüglich der optimalen Einstellung der Detektoren bedeutet dies, dass es sinnvoll ist, die Empfindlichkeit der Detektoren in der Nebenrichtung geringer einzustellen als diejenige der Detektoren in der Hauptrichtung.

6.7 Fazit

- Die Gesamtheit aller real auftretenden Detektorfehler an einer Lichtsignalanlage führt in den meisten Fällen zu keiner geänderten Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs laut Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. In einigen Fällen verbessert sich die Beurteilung sogar, da Detektorfehler häufig zu einer verstärkten Berücksichtigung der schwächeren Ströme, die ansonsten lange Wartezeiten haben, führen.
- Die mittlere bewertete Verlustzeit aller Ströme an einem Knotenpunkt, die sich aus dem Zusammenspiel der individuellen Verlustzeit und der Anzahl der Fahrzeuge ergibt, steigt dagegen an fast allen Untersuchungsstellen aufgrund der Detektorfehler um bis zu 4,0 s/Kfz an.
- Eventuelle Fehlmessungen wirken sich an Lichtsignalsteuerungen mit besonders hohen Freiheitsgraden stärker aus als bei weniger flexibel reagierenden Steuerungen. So zeigen sich bei Bemessungsdetektoren und Steuerungen mit einer variablen Umlaufzeit bei Fehldetektionen von 25 % in Abhängigkeit von der Lage der Detektoren signifikante Änderungen in der Qualität des Verkehrsablaufs.
- Bei Detektoren, die sowohl für Bemessung als auch für Anforderung zuständig sind, sind die Auswirkungen weniger gravierend, da die betroffenen Ströme in den meisten Fällen nur gering belastet sind.
- Werden Anforderungen erst nach einer dauerhaften Belegung eines Detektors von mindestens 3 s in der Logik weiterverarbeitet, können benachbarte Ströme keine falsche Anforderung auslösen.

7 Auswirkung auf die netzweite Analyse

Als ein Beispiel für die Nutzung der Daten in offline-Anwendungen wird die Auswirkung auf die netzweite Analyse betrachtet. Dafür wird ein Beispielnetz in der makroskopischen Simulationssoftware VISUM abgebildet und unter Berücksichtigung verschiedener Planfälle wird die jeweilige Matrix mit einem von FRIEDRICH [25] erstellten und am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau weiterentwickelten Programm für die Schätzung der Herkunft-/Zielbeziehungen (im Folgenden auch als Matrixschätzung bezeichnet) des Verkehrs [26][55] geschätzt und die so entstehende Matrix wiederum auf das in VISUM abgebildete Straßennetz umgelegt. Das Verfahren zur Matrixschätzung basiert auf dem Prinzip der Entropiemaximierung nach VAN ZUYLEN [53]. Dabei wird basierend auf Zählwerten, die in diesem Fall aus den Detektordaten der Lichtsignalanlagen gewonnen werden, mit Hilfe eines iterativen Prozesses der Zustand des Systems mit der größten Wahrscheinlichkeit bestimmt und in einer Matrix abgelegt.

7.1 Aufbau der Untersuchung

Als erstes wurde ein geeignetes Beispielnetz für die Untersuchung ausgewählt und in ein Knoten-Kanten-Modell umgewandelt. Dieses Netz ist in Bild 7.1 dargestellt, wobei jedoch auf die Maßstäblichkeit verzichtet wurde, um so eine übersichtlichere Darstellung der Knoten und Kanten innerhalb der Knotenpunkte zu ermöglichen. Die Knotenpunkte wurden derart aufgelöst, dass realitätsnah nachgebildet werden kann, welche der Abbiegebeziehungen in der Realität detektiert werden.

Insgesamt besteht das Netz aus 23 Knotenpunkten, von denen 13 lichtsignalisiert sind. Die übrigen Knotenpunkte sind auf verschiedene Arten vorfahrtgeregelt. Das Netz setzt sich aus 397 Kanten zusammen. Davon sind jeweils 22 Kanten Quell- oder Zielanbindungen. Von den verbleibenden Kanten wird die Verkehrsstärke auf 79 Kanten detektiert.

Es handelt sich bei dem Netz um ein reales Netz aus dem Stadtgebiet von Hannover, in welchem jedoch einige kleinere Änderungen vorgenommen wurden, um den Anforderungen für die Schätzung der Herkunft-/Zielbeziehungen besser gerecht zu werden. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um die Reduzierung des Netzes auf die Hauptverkehrsstraßen und auf wichtige Sammelstraßen. Weiterhin wurden zwei Einbahnstraßen im nordöstlichen Untersuchungsgebiet für die Gegenrichtung geöffnet, damit die Verkehre unterschiedliche Möglichkeiten für die Routenwahl haben. Aus diesem Grund verändern sich auch die zwei angrenzenden signalisierten Knotenpunkte, die jeweils um die nun möglichen Abbiegebeziehungen erweitert werden müs-

sen. Da diese in der Realität nicht vorhanden sind, wurden sie natürlich auch nicht detektiert. Für beide Zufahrten wurde festgelegt, dass sie über einen einzelnen detektierten Fahrstreifen verfügen, und die Fahrzeuge dann in die drei möglichen Fahrrichtungen abbiegen können. Letztendlich wurden zwei Knotenpunkte, die in der Realität mit einer Festzeitsteuerung signalisiert werden, als verkehrsabhängig gesteuert, also mit detektierten Zufahrten, abgebildet. Die ursprüngliche Fahrstreifenaufteilung für diese Knotenpunkte wurde beibehalten.

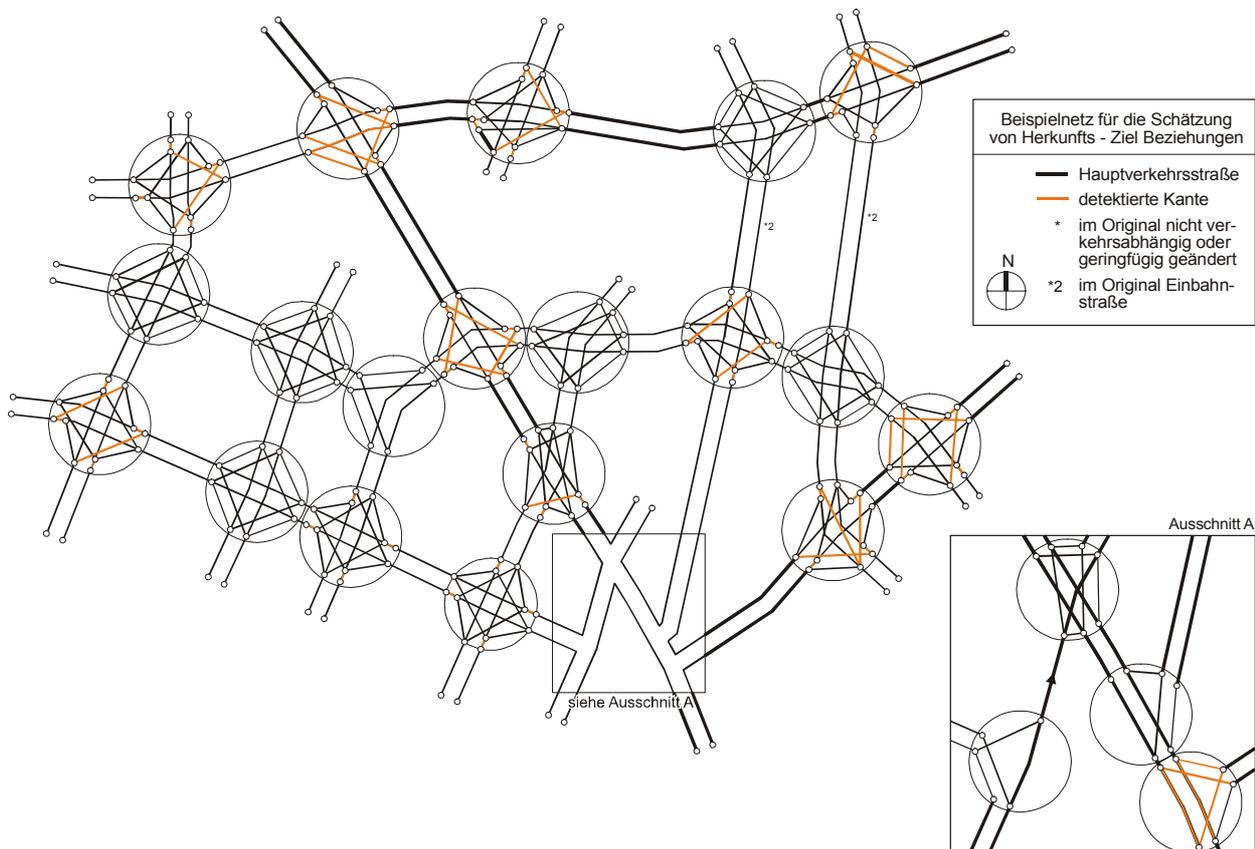


Bild 7.1: Untersuchtes Netz

Bei der zugrunde liegenden Matrix (22 x 22) handelt es sich um eine 24 h-Matrix, die aus der Gesamtmatrix der Stadt Hannover herausgeschnitten und ebenfalls auf die Bedürfnisse der Fragestellung angepasst wurde. Im Wesentlichen wurden einige Bezirke ergänzt und auf einzelnen Relationen wurde die Verkehrsstärke erhöht. Insgesamt enthält die so erstellte Ausgangsmatrix ca. 58000 Fahrten über den gesamten Tag.

Zusammenfassend kann damit konstatiert werden, dass das untersuchte Netz ein der Realität angenähertes Netz ist, welches jedoch trotz gewisser Abstrahierungen sowohl in der Netzform als auch in der Belastung realistische Verhältnisse widerspiegelt.

Die aus dieser Matrix resultierende Verkehrsstärke auf den einzelnen Kanten des Netzes wird mit Hilfe des Umlegungsprogramms VISUM ermittelt. Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen des Matrixschätzprogramms zu erhalten, wird in beiden Programmen das gleiche Umlegungsverfahren genutzt. Dabei handelt es sich um die Sukzessivumlegung, die in zehn Stufen durchgeführt wird. Das Ergebnis dieser Umlegung ist in Bild 7.2 dargestellt. Es zeigt sich trotz der vorgenommenen Abstrahierungen eine realistische Verteilung des Verkehrs,

werden dem in dieser Arbeit entwickelten Datenüberprüfungs- und -verbesserungsverfahren unterzogen. Es wird mit den verbesserten Werten weitergearbeitet.

- Planfall „überprüfte Detektion“: Im Wesentlichen handelt es sich dabei um einen der „verbesserten Detektion“ sehr ähnlichen Planfall. Der Unterschied ist jedoch, dass für den Fall, dass die verbesserten Werte sehr stark von den detektierten Werten abweichen, diese nicht weiter berücksichtigt werden.

Für den Planfall „keine Detektion“ werden die Quell- und Zielverkehrsstärken für alle Bezirke aus der realen Matrix ermittelt und als Ausgangswerte für die Matrixschätzung genutzt. Bei den Planfällen „optimale Detektion“ und „korrekte Detektion“ werden die realen Verkehrsstärken auf den detektierten Kanten der Umlegung entnommen und als Ausgangswerte an die Matrixschätzung weitergegeben. Etwas aufwändiger gestaltet sich das Vorgehen bei den fehlerbehafteten Planfällen: Da es sich bei den Fehlern um zufällig auftretende Ereignisse handelt, gibt es vielfältige Möglichkeiten der Verteilung der Fehler auf die einzelnen Detektoren. Aus diesem Grund werden für jeden Planfall 10 unterschiedliche Varianten der Fehlerverteilung untersucht und der Mittelwert aus den Einzelergebnissen beurteilt.

Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt sowohl anhand des Vergleichs der Ausgangsmatrix mit der geschätzten Matrix als auch anhand des Vergleichs der Verkehrsstärke auf den einzelnen Strecken, die sich durch die Umlegung der neu erzeugten Matrizen ergeben, mit der ursprünglichen Verkehrsstärke.

7.2 Implementierung der Detektorstörungen

Mit Ausnahme des Fehlertyps 2 (Straßenbahnfahrzeuge werden mitgezählt) werden alle ermittelten Fehler in das untersuchte Netz implementiert. Dafür werden für die detektierten Kanten die auftretenden Fehler getrennt eingegeben und dann miteinander kombiniert. Je nach Planfall und Fehlertyp sind dabei einige Besonderheiten zu beachten:

Planfall „reale Detektion“

Der Fehlertyp 1 (Fahrzeuge benachbarter Ströme werden mitgezählt) variiert sehr stark, je nachdem, ob es sich um einen Detektor handelt, der einen in entgegengesetzter Richtung befahrenen Nachbarfahrstreifen hat, oder ob die Fahrzeuge auf dem Nachbarfahrstreifen in die gleiche Richtung fahren. Aus diesem Grund werden für jeden Detektor die Verkehrsstärken auf den benachbarten Strömen getrennt erhoben, und es wird die Anzahl und die Lage der benachbarten Fahrstreifen gekennzeichnet. Für die in entgegengesetzter Fahrtrichtung verkehrenden Ströme werden andere Anteile der Mitdetektion festgelegt als für die in gleicher Fahrtrichtung verkehrenden Ströme.

Prinzipiell ergeben sich alle Fehler in jeder einzelnen Variante so, dass sie mit den real erhobenen Mittelwerten und Standardabweichungen übereinstimmen. Zusätzlich wird der Einfluss der Verkehrsstärke des detektierten Stroms beachtet, indem sichergestellt wird, dass bei hoch belasteten Detektoren nur in Ausnahmefällen mehr als 20 % der benachbarten Ströme zusätzlich detektiert wird.

Die Verteilung der einzelnen Fehler des Typs 3 (Nichterfassung von Fahrzeugen) wird genau wie bei Fehlertyp 1 so gewählt, dass sie mit der realen Verteilung der Fehler übereinstimmt. Da sich auch bei diesem Fehlertyp gezeigt hat, dass er bei hohen Verkehrsstärken nur in sehr viel

geringerem Maß als bei niedrigen Verkehrsstärken auftritt, wird darauf geachtet, dass bei der Erzeugung der Fehler hoch belastete Detektoren nur in Ausnahmefällen weniger als 90 % des zugeordneten Stroms detektieren.

Fehler des Fehlertyps 4 (Erfassung nicht vorhandener Fahrzeuge) sind in der Regel sehr viel niedriger als die anderen auftretenden Fehler. Aus diesem Grund ist es nicht notwendig, die Fehler an die Verkehrsstärke des Stroms anzupassen, es muss lediglich sichergestellt sein, dass die Verteilung der Fehler mit der realen empirisch ermittelten Verteilung der Fehler übereinstimmt.

Planfall „Doppelscheifen“

Die Ermittlung der einzelnen Fehler erfolgt analog zu dem Vorgehen für den Planfall „reale Detektion“ mit dem Unterschied, dass für die Detektoren, die einen Nachbarfahrstreifen mit entgegengesetzter Fahrtrichtung haben, der Anteil der dort fahrenden Fahrzeuge, die zusätzlich detektiert werden, auf Null gesetzt wird.

Planfall „verbesserte Detektion“

Für die Verbesserung der Fehler werden die in den einzelnen Varianten des Planfalls „reale Detektion“ auftretenden Fehler so normiert, dass sich eine Verteilung der Fehler ergibt, wie sie durch die Verbesserung der Fehler der empirisch erhobenen Daten erzielt wurde.

Planfall „überprüfte Detektion“

Die im Planfall „verbesserte Detektion“ ermittelten Werte werden dahingehend analysiert, ob die verbesserten Werte besonders stark von den detektierten Werten abweichen. In diesem Fall kann zwar davon ausgegangen werden, dass sich eine deutliche Verbesserung ergeben hat, aber es bestehen häufig weiterhin große Abweichungen von den realen Werten (vgl. Abschnitt 5.4). Aus diesem Grund werden verbesserte Werte, die maximal 20 % oder mehr als 500 % der detektierten Werte betragen, aus der Betrachtung ausgeschlossen.

7.3 Analyse der Auswirkungen auf die Schätzung von Herkunft-/Zielbeziehungen

In Tabelle 7.1 sind die Bewertungen Qualität der Schätzung der Herkunft-/Zielbeziehungen für die einzelnen Planfälle aufgeführt. Dafür werden wie auch bei der Beurteilung der Daten und der Datenverbesserung die statistischen Kennwerte absoluter und relativer Fehler, Korrelationskoeffizient, Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler (WMQF) und Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehlerproportional (WMQFP) betrachtet. Die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehlerproportional ist in dieser Betrachtung sehr hoch, da viele Relationen in dem Verkehrsnetz nur von sehr wenigen Fahrzeugen befahren werden und sich Unterschiede auf diesen Relationen sehr schnell sehr stark auswirken.

Der Planfall „Optimale Detektion“ ist derjenige mit der größten und zuverlässigsten Datenbasis. Demzufolge ist die Übereinstimmung der geschätzten mit der realen Matrix auch sehr gut. Die totale Abweichung der Zählwerte liegt unter 1 % und die weiteren statistischen Kenngrößen zeigen, dass die in diesem Planfall erzeugte Matrix diejenige mit der besten Übereinstimmung ist.

Wird die Anzahl der detektierten Kanten auf die tatsächlich detektierten Kanten reduziert, erhält man den Planfall „korrekte Detektion“. Die Datenbasis verringert sich und die Qualität der

Matrixschätzung nimmt ab. Sowohl der absolute Fehler als auch die anderen Kennwerte verdeutlichen diesen Effekt.

Tabelle 7.1: Bewertung der Auswirkung verschiedener Varianten auf die Schätzung von Herkunft-/Zielbeziehungen

Planfall	absoluter Fehler	relativer Fehler	Korrelationskoeffizient	WMQF	WMQFP
Optimale Detektion	357	0,61 %	0,987	110	80,09 %
Korrekte Detektion	886	1,52 %	0,976	147	98,55 %
Keine Detektion	-103	-0,18 %	0,730	460	355,12 %
Reale Detektion	19777	34,01 %	0,429	947	499,29 %
Doppelschleifen	-605	-1,04 %	0,807	402	271,95 %
verbesserte Detektion	2505	4,31 %	0,940	230	132,22 %
überprüfte Detektion	2149	3,70 %	0,927	253	131,52 %

Bei einem vollständigen Verzicht auf die Verwendung von Zusatzinformationen sinkt die Qualität der Matrixschätzung noch weiter ab. Der absolute Fehler für diesen Planfall ist zwar sehr gering, wird jedoch dadurch beeinflusst, dass es einige Relationen gibt, bei denen eine zu hohe Verkehrsstärke geschätzt wird und einige Relationen, deren Verkehrsstärke stark unterschätzt wird. Diese im Einzelnen betrachtet sehr negativen Werte gleichen sich aus und spiegeln dann fälschlicherweise ein sehr gutes Bild wider. Im Gegensatz dazu, werden durch die Verwendung der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler die Fehler unabhängig von ihrem Vorzeichen betrachtet und es zeigt sich eine mit 460 Kfz/24h sehr hohe durchschnittliche Abweichung.

Der Planfall „reale Detektion“, bei dem die real vorkommenden Fehler nachgebildet werden, wird anhand aller statistischen Kenngrößen am schlechtesten bewertet. Aufgrund der teilweise sehr großen Abweichungen der detektierten von den realen Verkehrsstärken wird das Schätzverfahren sehr stark beeinflusst und berechnet eine Matrix, die über nur wenige Übereinstimmungen mit der realen Matrix verfügt.

Durch die Verwendung von Doppelschleifen in allen detektierten Fahrstreifen, die auch benachbarte Fahrstreifen haben, die in die entgegengesetzte Richtung fahren, kann die Qualität der Matrixschätzung sehr positiv beeinflusst werden. Insgesamt ergibt sich in diesem Fall durch die Verwendung von Zusatzinformationen eine bessere Qualität als für den Fall, dass nur die Quell- und Zielanbindungen betrachtet werden.

Eine noch stärkere Verbesserung der Qualität der Matrixschätzung kann durch die Verwendung des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens zur Datenüberprüfung und -verbesserung erzielt werden. Dabei macht es nur einen geringen Unterschied, ob die verbesserten Daten vollständig genutzt oder bei extremen Abweichungen von den detektierten Werten nicht weiter betrachtet werden. Die geschätzte Matrix stimmt in diesen beiden Fällen ungefähr doppelt so gut mit der realen Matrix überein, als wenn auf die Verwendung von Zusatzinformationen verzichtet wird und die geschätzte Matrix nur auf den Verkehrsstärken der Quell- und Zielanbindungen basiert.

Es ergibt sich demzufolge in dieser Arbeit eine andere Tendenz als in der Arbeit von MATSCHKE et al [39], die zu dem Schluss gekommen sind, dass auch Zusatzinformationen aus fehlerhaften Daten eine Verbesserung der Qualität der Anwendungen zur Folge haben. Das unterschiedliche Ergebnis ist in mehreren Faktoren begründet. Zum einen ist das hier betrachtete Netz sehr

viel komplexer und zum anderen variiert die Größe und die Verteilung der Fehler in sehr viel stärkerem Maße.

7.4 Analyse der Auswirkungen auf die Umlegung

Die Analyse und Bewertung der Auswirkungen der verschiedenen Planfälle auf die Umlegung erfolgt analog zu der Vorgehensweise der Bewertung der Auswirkungen auf die Schätzung der Herkunft-/Zielbeziehungen. Es wird die Verkehrsstärke auf allen Kanten, die zwischen zwei Knotenpunkten angeordnet sind, in die Betrachtung einbezogen. Die Verkehrsstärke auf Kanten innerhalb von Knotenpunkten wird an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Die Ausgangsbelastung aller betrachteten Kanten beträgt ca. 325.000 Kfz/24h.

In Tabelle 7.2 ist wiederum die Bewertung zusammenfassend dargestellt. Die genaue Analyse der einzelnen Planfälle ergibt die gleiche Reihung wie bei der Analyse der Auswirkungen auf die Schätzung der Herkunft-/Zielbeziehungen. Auch an dieser Stelle verschlechtert sich das Ergebnis bei Nutzung der Detektordaten mit den realen Fehlern im Vergleich zu der alleinigen Nutzung der Quell- und Zielanbindungen. Eine wesentliche Verbesserung der Übereinstimmung der Ergebnisse wird wiederum durch die Verwendung der Doppelschleifen und noch stärker durch die Anwendung des Verfahrens zur Datenüberprüfung und -verbesserung erreicht.

Tabelle 7.2: Bewertung der Auswirkung verschiedener Varianten auf die Umlegung des Verkehrs auf das Straßennetz

Planfall	absoluter Fehler	relativer Fehler	Korrelationskoeffizient	WMQF	WMQFP
Optimale Detektion	1035	0,32 %	1,000	96	3,21 %
Korrekte Detektion	4060	1,24 %	0,997	231	7,69 %
Keine Detektion	9511	2,91 %	0,925	1171	38,32 %
Reale Detektion	107294	32,85 %	0,810	2466	62,52 %
Doppelschleifen	-13861	-4,24 %	0,976	702	24,69 %
verbesserte Detektion	16934	5,19 %	0,996	352	11,27 %
überprüfte Detektion	17608	5,39 %	0,994	398	12,73 %

Von besonderem Interesse ist an dieser Stelle auch die Betrachtung des absoluten Fehlers. Dieser kennzeichnet den Unterschied der geschätzten Verkehrsstärke zu der real vorhandenen Verkehrsstärke auf allen Kanten des Untersuchungsgebiets. Erfolgt die Ermittlung der Verkehrsstärke auf Basis der realen aber fehlerbehafteten Daten, wird für das gesamte Netz eine um mehr als 100.000 Kfz/24h erhöhte Verkehrsstärke gemessen. Für den Fall, dass eine Planung auf diese Daten zurückgreifen würde, hätte dies also eine zu große Dimensionierung der Verkehrsanlage zur Folge. Umgekehrt könnte eine Planung, die auf den Daten, die durch die Verwendung der Doppelschleifen gewonnen werden, einen Kapazitätsengpass hervorrufen, da in diesem Fall eine Verkehrsstärke ermittelt wird, die unter der tatsächlich vorhandenen liegt.

7.5 Festlegung eines Qualitätsmaßstabs für die Genauigkeit der Daten für die Schätzung von Herkunft-/Ziel-Beziehungen

Die oben angestellten Betrachtungen sind nur ein Beispiel für die offline-Verwendung der Daten. Aufgrund der vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten, ist es anhand dieser Betrachtungen nicht möglich, einen Qualitätsmaßstab für die Genauigkeit der Daten festzulegen. Stattdessen muss in Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung spezifiziert werden, wie hoch die maximal tolerierte Abweichung sein darf.

Soll z. B. die Umlegung des Verkehrs auf die einzelnen Strecken mit einer Genauigkeit von durchschnittlich mehr als 85 % erfolgen, kann sich gemäß Tabelle 7.2 an der Genauigkeit der verbesserten Daten orientiert werden. Diese konnte, wie in Tabelle 5.4 zu sehen ist, auf 77 % bei einem durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten von 0,52 gesteigert werden. Es ist zu beachten, dass es sich hierbei um mittlere Werte handelt.

7.6 Fazit

Sowohl für die Schätzung der Herkunft-/Zielbeziehungen als auch für die darauf folgende Umlegung der geschätzten Matrizen auf das Straßennetz ergibt sich, dass die Qualität der Anwendung sinkt, wenn nicht qualitätsgeprüfte, an Lichtsignalanlagen erhobene Verkehrsstärken in die Betrachtung integriert werden. Im Gegensatz dazu kann durch die Anwendung des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens für die Datenüberprüfung und -verbesserung auch eine Verbesserung der Qualität der beiden betrachteten offline-Anwendungen erzielt werden. In diesem Fall sind der absolute und der relative Fehler zwar größer als bei der alleinigen Nutzung der Informationen bezüglich der Quell- und Zielverkehrsstärken, aber alle anderen statistischen Kenngrößen spiegeln eine bessere Qualität wieder.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Moderne, voll verkehrsbabhängig arbeitende Lichtsignalanlagen benötigen als Eingangsdaten Informationen über die Verkehrsstärke auf allen zuführenden Fahrstreifen. Diese Informationen werden in Deutschland in den meisten Fällen mithilfe von Induktivschleifen gewonnen. Über die Genauigkeit dieser Induktivschleifen bestehen nur lückenhafte Kenntnisse. Arbeiten, die sich mit dieser Thematik beschäftigen, lassen sich in verschiedene Gruppen einteilen: Einerseits handelt es sich um Untersuchungen, die sich mit der Genauigkeit unter Idealbedingungen beschäftigen. Andererseits gibt es einige Untersuchungen zu der Datenqualität von Induktivschleifendetektoren, die auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Straßen angeordnet sind. Aus diesen Arbeiten resultierende Angaben zu der Genauigkeit schwanken zwischen 80 % und 100 %. [29][31][32][38][40][41][42]

Dabei ist mit Genauigkeit die Übereinstimmung der absoluten Anzahl detektierter und tatsächlich vorhandener Fahrzeuge gemeint. Insbesondere in den USA werden jedoch vielfältige Kriterien entwickelt und propagiert, mit denen sich die Datenqualität beurteilen lässt. Dazu gehört neben der Genauigkeit beispielsweise die Vollständigkeit oder die Zuverlässigkeit. [51]

Die wachsende Bedeutung dieser Fragestellungen lässt sich erahnen, wenn man die Entwicklung der deutschen Regelwerke betrachtet. Während die Qualität des grundlegenden Datenmaterials in den 90-er Jahren lediglich am Rande thematisiert wurde [21][22], gibt es einige neuere Veröffentlichungen, die sich vollständig oder in Teilbereichen mit Fragen des Qualitätsmanagements befassen und dabei auch die Datenqualität behandeln. [6][7][19][20][23]

Auch in der Forschung gewinnt die Datenqualität zunehmend an Bedeutung. Allerdings beziehen sich viele der neueren Analysen auf theoretische Betrachtungen und nicht auf einen Abgleich mit empirisch ermittelten Verkehrsstärken. Dies geschieht beispielsweise über die Analyse der Daten mittels des Fundamentaldiagramms oder über den Vergleich verschiedener historischer Ganglinien bzw. hintereinander liegender Detektoren. In diesen Methoden wird gemeinhin auch das größte Potenzial für die Verbesserung der Datenqualität gesehen. [8][9][24]

Da sich bei vielen dieser Verfahren Schwierigkeiten bei der Übertragung auf innerstädtische Fragestellungen ergeben, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine umfangreiche Analyse der Datenqualität an mehr als 50 Detektoren im Stadtgebiet von Hannover vorgenommen und aufgrund der so gewonnenen Erkenntnisse ein Verfahren entwickelt, welches anhand der Daten eines einzelnen Knotenpunktes eine bedeutende Verbesserung der Daten erzielt.

Die Analyse der Datenqualität basiert auf empirischen Untersuchungen, bei denen die relevanten Ströme jeweils für einen Zeitraum von mindestens 9 h mittels der Videotechnik beobachtet wurden. Anhand des Abgleichs der so erhaltenen tatsächlichen Verkehrsstärken mit den detektierten und in Signalprogrammprotokollen festgehaltenen Werten, kann eine Beurteilung der Datenqualität vorgenommen werden. Dabei wird sich auf die Kriterien Zugänglichkeit, Aktualität, Zuverlässigkeit, Vollständigkeit und Genauigkeit bezogen. Einige dieser Kriterien werden für das gesamte System beurteilt und einige getrennt für bestimmte Detektoren, wie z. B. die Genauigkeit, bei der auch der Schwerpunkt der Analyse zu finden ist.

Die Ergebnisse lassen sich zusammenfassend so beschreiben, dass in etwa ein Drittel der Detektoren mit einer sehr hohen Genauigkeit von mehr als 90 % arbeitet, es aber auch einen fast genauso großen Anteil gibt, der mit einer Genauigkeit von unter 40 % zählt. Diese Werte beruhen auf dem Zusammenspiel von vier verschiedenen Fehlertypen, die jeweils zeitlich begrenzt oder während der gesamten Untersuchungsdauer auftraten. Am bedeutsamsten für die Genauigkeit der Daten an innerstädtischen Knotenpunkten scheint die Erfassung von Fahrzeugen auf den Nachbarfahrstreifen und die nur teilweise Erfassung der Fahrzeuge des betrachteten Stroms zu sein. Diese Fehler treten in fast allen Beispielen in unterschiedlicher Stärke auf. Dabei gilt der Grundsatz, dass höher belastete Detektoren tendenziell auch mit einer höheren Genauigkeit zählen als niedrig belastete Detektoren.

Für die Überprüfung und Verbesserung der Daten werden verschiedene aus den deutschen Richtlinien und der Forschung bekannte Verfahren hinsichtlich ihres Leistungsvermögens für die Beurteilung von Verkehrsstärkedaten, die an innerstädtischen Lichtsignalanlagen erhoben wurden, untersucht. Im Einzelnen handelt es sich dabei um die verschiedenen Verfahren entsprechend des Merkblatts für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ) [6], um den Fundamentaldiagrammtest, die Ganglinienanalyse und um Längs- und Quervergleiche. Es zeigt sich, dass für die hier vorliegenden Daten nur die Ganglinienanalyse und der Längsvergleich geeignet sind, diese Verfahren jedoch nicht optimal für innerstädtische Betrachtungen sind und nur einen Bruchteil ihres eigentlichen Potenzials ausspielen können.

Aus diesem Grund wurde ein neues Verfahren entwickelt, welches speziell auf die Randbedingungen an innerstädtischen lichtsignalisierten Knotenpunkten abgestimmt ist. Dieses Verfahren beruht ausschließlich auf den an einem einzelnen Knotenpunkt erhobenen Daten. Als Eingangsgrößen werden dafür die Planungsgrößen der Lichtsignalsteuerung, die Freigabezeiten der zugeordneten Signalgruppe sowie der Sättigungsgrad aller Ströme, die zu der Lichtsignalanlage gehören, benötigt. Es handelt sich also um ein sehr handliches Verfahren, welches mit einem nicht allzu großen Aufwand umzusetzen ist.

Grundlegende Idee des Verfahrens ist die Fusion verschiedener Informationen. Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen der Verkehrsstärke an einer verkehrabhängig geschalteten Lichtsignalanlage und deren Schaltzuständen, ist es möglich, für jedes Aggregationsintervall die mögliche Verkehrsstärke des einem Detektor zugeordneten Stroms einzugrenzen.

Insbesondere die Erfassung benachbarter Verkehrsströme sowie die Folgen von Ausfällen des Detektors, bei denen keine Fehlermeldung, sondern der Wert Null übermittelt wird, können durch das Verbesserungsverfahren deutlich verringert werden. In vielen Fällen sind diese Fehler bedeutende Fehlerquellen, so dass insgesamt vor allem eine Verbesserung der besonders schlecht beurteilten Datenreihen erzielt werden kann.

Die Auswirkungen der fehlerhaften Detektion werden anschließend anhand zweier Beispiele untersucht. Zum einen erfolgt die genaue Analyse der Auswirkungen auf die Lichtsignalsteuerung als bedeutendstes Beispiel für die online-Nutzung der Daten und zum anderen werden die Auswirkungen auf die offline-Anwendung der Schätzung von Herkunft-/Zielbeziehungen und auf die daraus resultierende Verteilung des Verkehrs im Netz betrachtet.

Hinsichtlich der Lichtsignalsteuerung zeigt sich, dass insbesondere Steuerungen, die ohne eine feste Umlaufzeit arbeiten, anfällig auf Fehldetektionen reagieren. Bereits bei Fehldetektionen von 25 % zeigen sich bei Bemessungsdetektoren in Abhängigkeit von deren Lage signifikante Änderungen in der Qualität des Verkehrsablaufs. Treten an mehreren Detektoren Fehler auf, führt dies nicht zu einer gegenseitigen Verstärkung der Fehler, sondern es kommt häufig zu einer Aufhebung der negativen Auswirkungen. Weiterhin kann resultiert werden, dass sich die durchschnittliche Verlustzeit einzelner Ströme auch durch besonders extreme Fehlmessungen um nicht mehr als 10 % verlängert, wenn der Steuerung eine feste Umlaufzeit hinterlegt ist. Letztendlich ist auf jeden Fall zu beachten, dass Anforderungen erst nach einer dauerhaften Belegung eines Detektors von mindestens 3 s in der Logik weiterverarbeitet werden sollten.

Die Schätzung der Herkunft-/Zielbeziehungen wird in sehr viel stärkerem Maß von einer schlechten Detektionsqualität beeinflusst. Es zeigt sich, dass die Qualität der geschätzten Matrix wesentlich schlechter ist, wenn nicht qualitätsgeprüfte, an Lichtsignalanlagen erhobene Verkehrsstärken in die Betrachtung integriert werden, als wenn die Schätzung nur auf den bekannten Quell- und Zielverkehrsstärken beruht. Durch die Verwendung des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens zur Datenverbesserung kann eine Verbesserung der Qualität der Schätzung der Herkunft-/Zielbeziehungen und damit auch der auf diesen Daten basierenden weiteren Anwendungen vorgenommen werden.

Für die Zukunft lassen sich aus den Ergebnissen dieser Arbeit im Wesentlichen zwei verschiedene Schlussfolgerungen ziehen. Erstens ist es bei der Verwendung jeglicher Daten für weitere als die ursprünglich vorgesehenen Zwecke notwendig, Überlegungen zu der Überprüfung der Qualität dieser Daten anzustellen. Zweitens können unter dieser Voraussetzung die an innerstädtischen Lichtsignalanlagen gewonnenen Verkehrsstärkedaten eine große Unterstützung für die Steuerung weit reichender Verkehrsmanagementmaßnahmen sein. In der weiteren Erforschung möglicher Verbesserungsansätze und vor allem in der Verknüpfung der unterschiedlichen Ansätze miteinander wird weiterer Forschungsbedarf gesehen.

Abschließend ist zu erwähnen, dass sich in dieser Arbeit zwar auf die Analyse und Bewertung der mit Induktivschleifendetektoren gewonnenen Verkehrsstärkedaten beschränkt wurde, dies jedoch nicht implizieren soll, dass Induktivschleifendetektoren im Vergleich zu anderen Detektoren besonders schlechte Ergebnisse liefern. Stattdessen ist zu beachten, dass beispielsweise zu Video- oder Infrarotdetektoren kaum Untersuchungen zu deren Detektionsqualität vorliegen bzw. diese nicht veröffentlicht sind. Sofern also nicht zweifelsfrei nachgewiesen ist, dass die Qualität anderer Erfassungsmethoden ausreichend ist, sind auch bei der weitergehenden Verwendung der mit diesen Detektoren erhobenen Daten die gleichen Betrachtungen notwendig, wie für die mit Induktivschleifendetektoren erhobenen Daten empfohlen.

Literatur

- [1] Balmberger, M., Balz, W., Scheer, T.
Überprüfung von Dauerzählstellen im Autobahnnetz der Autobahndirektion Nordbayern.
in: Straßenverkehrstechnik (2000) Nr. 12, S. 648 - 653
- [2] Bennigsen, C., Schmelz, F.
Qualitätsbewertung automatisch erhobener Verkehrsdaten anhand von Vergleichen mit benachbarten Detektoren und historischen Werten.
Projektarbeit am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, 2004
- [3] Boltze, M., Reusswig, A.
Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen – Sicherheitsprüfung vorhandener Lichtsignalanlagen und Anpassung der Steuerung an die heutige Verkehrssituation.
Schlussbericht zum FE 03.353/2002/DGB aus dem Forschungsprogramm Straßenwesen des BMVBW, Darmstadt, 2004
- [4] Bernhard, J., Riedel, T.
Erkennung von Stau mit kurzen Schleifendetektoren.
Straßenverkehrstechnik 43 (1999) Nr. 7, S. 329 – 332
- [5] Bullimore, E.D., Hutchinson, P.M.
Life without loops.
in: The International Showcase for advanced traffic systems & technology, Traffic Technology international '96, S. 106 – 110
- [6] Bundesanstalt für Straßenwesen
Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ 99).
Bergisch Gladbach, 1999
- [7] Bundesanstalt für Straßenwesen
Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen.
Bergisch Gladbach, 2002
- [8] Chen, C., Kwon, J. et al
Detecting Errors and Imputing Missing Data for Single Loop Surveillance Systems.
Vortrag im Rahmen des 82. Treffens des Transportation Research Board, Washington, 2003

- [9] Chrobok, R.
Statistische Analyse von Zählschleifendaten als Methode zur Verkehrsprognose.
Duisburg, 2000
- [10] Claus, C., Krumm, M.
Beurteilung der Detektionsqualität an zwei Lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten mittels empirischer Beispielmessungen.
Projektarbeit am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, 2004
- [11] Cleghorn, D., Hall, F., Garbuio, D.
Improved Data Screening Techniques for Freeway Traffic Management Systems.
Transportation Research Record 1320, S. 17 – 31, Washington, D. C., 1991
- [12] Dailey, G., Nihan, N.
Using Time-Series Designs to Estimate Changes in Freeway Level of Service, Despite Missing Data.
Transportation Research. Part A (1984), Nr. 5/6, S. 431 – 438
- [13] Deutsches Institut für Normung
DIN VDE 0832-100: Straßenverkehrssignalanlagen.
Fassung 2002
- [14] Espié, S., Lenoir, F.
The future of road traffic measurement.
Recherche Transports Sécurité (1991), Nr. 6 (englische Ausgabe), S. 51 – 56
- [15] Esser, J.
Simulation von Stadtverkehr auf der Basis zellulärer Automaten.
Oberhausen, 1997
- [16] Fastenrath, U.
Stau-Schau. Auf dem Weg zum intelligenten Verkehrsinformationssystem.
in: c't (2004) Nr. 9, S. 172 - 181
- [17] Flinner, M., Horsey, H.
Traffic Data Edit Procedures Pooled Fund Study.
<http://www.fhwa.dot.gov/policy/ohpi/tdep.htm>, Stand April 2004
- [18] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV)
Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS).
Köln, 2001
- [19] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV)
Hinweise zur Datenvervollständigung und Datenaufbereitung in verkehrstechnischen Anwendungen.
Köln, 2003
- [20] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV)
Hinweise zur Qualitätsanforderung und Qualitätssicherung der lokalen Verkehrsdatenerfassung.
noch unveröffentlichte Entwurfsfassung des AK 3.5.20, Stand 12/2004

- [21] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV)
Merkblatt über Detektoren für den Straßenverkehr.
Köln, 1991
- [22] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV)
Richtlinien für Lichtsignalanlagen - RiLSA.
Köln, 1992
- [23] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV)
Richtlinien für Lichtsignalanlagen – RiLSA; Teilfortschreibung 2003.
Köln, 2003
- [24] Freudenberger, P.
Analyse von Schleifendetektordaten und Entwicklung von Methoden zur Plausibilitätsprüfung.
Diplomarbeit am Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Technische Universität München, 2001
- [25] Friedrich, B.
Ein verkehrsadaptives Verfahren zur Steuerung von Lichtsignalanlagen.
Dissertation am Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Technische Universität München, 1999
- [26] Friedrich, B., Kemper, C., Matschke, I.
Ermittlung von Herkunft-/Zielbeziehungen des Straßenverkehrs in der Landeshauptstadt und Region Hannover.
Hannover 2003
- [27] Glatz, M., Hoffmann, G.
Fehlertolerante Verkehrserfassungssysteme für verkehrsabhängige Steuerungsverfahren.
Heft 833 der Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn, 2002
- [28] Haas, S., Maßmann, J.
Überprüfung der an den Lichtsignalanlagen der Stadt Hannover erhobenen Verkehrszählungen.
Projektarbeit am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, 2002
- [29] Hamm, R.A., Woods, D.L.
Loop detectors: Results of controlled field studies.
in: ITE Journal 62 (1992) Nr. 11, S. 12-16
- [30] Herz, R., Schlichter, G., Siegener, W.
Angewandte Statistik für Verkehrs- und Regionalplanung.
Düsseldorf, 1992
- [31] Hofsäß, W., Schlums, J.
Automatische Verkehrszählanlagen.
Heft 61 der Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn, 1967

- [32] Hoops, M., Kates, R., Keller, H.
Bewertung von Verfahren zur Erkennung von Störungen im Verkehrsablauf in Theorie, Praxis und Simulation.
Heft 797 der Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn, 2000
- [33] Horter, S., Kates, R., Meier, J., Wehlan, H.
Traffic Data Fusion and Sensor Fault Detection Using Traffic Flow Modelling.
Tagungsband des ITS-Kongresses, Madrid, 2003
- [34] Irrgang, A., Klein, M.
Das Verkehrsmanagementsystem CITY-TRAFFIC Bonn.
Tagungsband des AGIT-Symposiums, Salzburg, 2002
- [35] Jacobson, L., Nihan, N., Bender, J.
Detecting Erroneous Loop Detector Data in a Freeway Traffic Management System.
Transportation Research Record 1287, S. 151 – 166, Washington, D. C., 1990
- [36] Körner, M., Franke, R.
Datenmanagement im Operativen Verkehrsmanagementsystem VAMOS.
Tagungsband der Verkehrswissenschaftlichen Tage in Dresden, 2003
- [37] Lange, J., Lenzen, R.
Überlegungen zum Einsatz verschiedener Detektionssysteme für den Straßenverkehr.
Tagungsband des Spring Meeting on Automatic Identification, 1997
- [38] Martin, P. T., Feng, Y., Wang, X.
Detector Technology Evaluation.
Utah, 2003
- [39] Matschke, I., Heinig, K., Friedrich, B.
Data Completion for Improved OD-Estimation.
Tagungsband 12th International Conference on Road Transport Information and Control, London, 2004
- [40] Middleton, D., Jasek, D., Parker, R.
Evaluation of Some Existing Technologies for Vehicle Detection.
Texas, 1999
- [41] Middleton, D., Gopalakrishna, D., Raman, M.
Advances in Traffic Data Collection and Management.
Traffic Data Quality Workshop, Texas, 2002
- [42] Minnesota Department of Transportation
NIT Phase II Evaluation of Non-Intrusive Technologies for Traffic Detection.
St. Paul, Minnesota, 2002
- [43] Mück, J.
Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung haltliniennaher Detektoren.
Tagungsband der Heureka 2002, S. 385 – 399, Karlsruhe, 2002

- [44] Nihan, N. L., Jacobson, N. et al
Detector Data Validity.
Washington, 1990
- [45] Nihan, N. L., Zhang, X., Wang, Y.
Evaluation of Dual-Loop Data Accuracy Using Video Ground Truth Data.
Washington, 2002
- [46] Plate, E.J.
Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure.
Karlsruhe, 1993
- [47] Poschinger, A., Friedrich, B.
A general stochastic solution for the assessment of capacity of segregated right turning lanes.
Tagungsband der Konferenz "Modeling and Management in Transportation", Krakau, 1999
- [48] Rommerskirchen, S.
Leitprojekte "Mobilität in Ballungsräumen": Eine querschnittliche Betrachtung.
in: Verkehr und Technik 53 (2000) Nr. 9, S. 411-416
- [49] Steierwald, G., Heusch, H., Schmidt, G.
Untersuchungen zur automatischen Erfassung von Verkehrsdaten auf Bundesfernstraßen.
Heft 141 der Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn, 1973
- [50] Steierwald, G., Schmidt, G.
Automatische Verkehrszählungen in Nordrhein-Westfalen.
in: Brücke und Straße 20 (1968), Nr. 2, S. 38-44 und Nr. 5, S. 129-136
- [51] Turner, S.
Defining and Measuring Traffic Data Quality. White Paper.
Traffic Data Quality Workshop, Texas, 2002
- [52] Tiefbauamt der Stadt Hannover
Verkehrsrechnersystem – Region Hannover.
unveröffentlichtes Informationspapier.
Hannover 2001
- [53] Van Zuylen, H.; Willumsen, L.G.
The most likely trip matrix estimated from traffic counts.
Transportation Research, 14B(3), S. 281-293, 1980
- [54] von der Ruhren, S., Beckmann, K.J., et. al.
Simulationsbasierte Kurzfristprognose von Verkehrszuständen im Rahmen von stadtfököln – Methodik, Umsetzung, Erfahrungen.
Tagungsband der Verkehrswissenschaftlichen Tage in Dresden, 2003

- [55] Wang, Y.
Untersuchung des Einflusses der Eingangsgrößen für das Modell der Entropiemaximierung auf die Schätzung von Herkunft-/Zielbeziehungen.
unveröffentlichte Institutsnotiz des Instituts für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, November 2004
- [56] Weinrich, O.
Auswirkung unzureichend funktionierender Detektoren auf die Signalsteuerung.
Diplomarbeit am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, 2004
- [57] Wiedemann, R., Querejeta-Iraola, A., Schneider, R.
Genauigkeitsvergleich unterschiedlicher Sensoren zur Geschwindigkeitsmessung auf Bundesautobahnen sowie für die Fahrzeuergfassung.
Heft 601 der Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn, 1991

Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1: Methodisches Vorgehen	3
Bild 2.1: Aufbau eines Induktivschleifendetektors (nach [21]).....	5
Bild 2.2: Funktionsweise von Induktivschleifendetektoren (nach [21]).....	6
Bild 2.3: Fahrzeugunterscheidung anhand typischer Verstimmungskurven (nach [21])	6
Bild 2.4: Aufgaben und Systeme des Verkehrsmanagements.....	7
Bild 2.5: Beispiel einer automatisierten Fehlerbehandlung [21]	10
Bild 2.6: Fusionsebenenhierarchie (nach [19]).....	11
Bild 2.7: Vergleich der Messreihen der Detektoren 194 und 197 (nach [8])	15
Bild 2.8: Häufigkeitsverteilung für an benachbarten Detektoren auftretende Korrelationskoeffizienten (Bewertungsgröße: Verkehrsstärke) (nach [8]).....	15
Bild 2.9: Häufigkeit der Fehler in verschiedenen Testfeldern (nach [32])	17
Bild 3.1: Aufbau des Verkehrsrechnersystems in Hannover (nach [52]).....	22
Bild 3.2: Auszug aus einem Signalprogrammprotokoll – Erläuterung der 18-er Meldungen.....	23
Bild 4.1: Häufigkeitsverteilung der Genauigkeit beurteilt anhand der absolut gemessenen Verkehrsstärken	32
Bild 4.2: Häufigkeitsverteilung des Korrelationskoeffizienten.....	32
Bild 4.3: Relative Standardabweichung der Messwerte.....	32
Bild 4.4: Vergleich der Messungen verschiedener Tage an den Detektoren der Gruppe 532..	33
Bild 4.5: Überprüfung der Genauigkeit bezüglich der absoluten Werte	34
Bild 4.6: Benachbarte Ströme zu 492-D21.....	35
Bild 4.7: Analyse der Messwerte 492-D21	35
Bild 4.8: Analyse der Messwerte 492-D21 einschließlich der Nachbarströme.....	35
Bild 4.9: Einfluss der Straßenbahn auf 492-D61	37
Bild 4.10: Ganglinienvergleich 509-D61.....	37
Bild 4.11: Ganglinienvergleich 269-D13.....	37
Bild 4.12: Ganglinienvergleich 532-D11.....	38
Bild 4.13: Detektion der Nachbarströme in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke	40
Bild 4.14: Wahrscheinlichkeit für die Mitdetektion eines einzigen vorhandenen Nachbarstroms.....	40
Bild 4.15: Genauigkeit bezüglich der absoluten Werte in Abhängigkeit von der Lage der Detektoren.....	41
Bild 4.16: Detektionsrate der Nachbarströme in Abhängigkeit von der Lage der Detektoren.....	41
Bild 4.17: Detektionsrate der Nachbarströme in Abhängigkeit von der Länge des Detektors	41

Bild 4.18: Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen einer bestimmten Detektionsrate.....	43
Bild 4.19: Detektionsrate des betrachteten Stroms in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke.....	43
Bild 4.20: Detektionsrate des betrachteten Stroms in Abhängigkeit von der Länge des Detektors.....	44
Bild 4.21: Detektionsrate des betrachteten Stroms in Abhängigkeit von der Lage.....	44
Bild 4.22: Detektion nicht vorhandener Fahrzeuge.....	45
Bild 4.23: Genauigkeit bezüglich der absoluten Werte in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke.....	46
Bild 4.24: Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehlerproportional in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke.....	46
Bild 5.1: Ganglinienvergleich 532-D31 (5 min-Intervalle)	49
Bild 5.2: Ganglinienvergleich Detektor 532-D11 (5 min-Intervalle).....	49
Bild 5.3: Ganglinienvergleich Detektor 532-D11 (15 min-Intervalle).....	50
Bild 5.4: Ganglinienvergleich Detektor 532-D411 (5 min-Intervalle).....	50
Bild 5.5: Längs- und Quervergleich, untersuchte Detektoren	52
Bild 5.6: Vergleich der hintereinander liegenden Messquerschnitte am Knotenpunkt 269.....	52
Bild 5.7: Vergleich zweier nebeneinander liegender Detektoren am Knotenpunkt 269.....	53
Bild 5.8: Vergleich zweier nebeneinander liegender Detektoren am Knotenpunkt 599.....	53
Bild 5.9: Vergleich der hintereinander liegenden Messquerschnitte an den Knotenpunkten 269 und 599.....	54
Bild 5.10: Auszug aus einem Signalprogrammprotokoll – Erläuterung der allgemeinen Informationszeilen	56
Bild 5.11: Prinzip der Datenverbesserung	57
Bild 5.12: Transformation der Auslastung in den Relevanzfaktor.....	60
Bild 5.13: Transformation des Relevanzfaktors r in den Abminderungsfaktor $a_{R,min}$	61
Bild 5.14: Transformation des Relevanzfaktors r in den Abminderungsfaktor $a_{R,max}$	61
Bild 5.15: Transformation des Freigabezeitanteils $t_{f,\%}$ in den Abminderungsfaktor $a_{Sä}$	62
Bild 5.16: Bestimmung der unteren Grenzwerte für die Verkehrsstärke.....	62
Bild 5.17: Bestimmung der oberen Grenzwerte für die Verkehrsstärke.....	63
Bild 5.18: Glättungsalgorithmus.....	65
Bild 5.19: Änderung der Genauigkeit.....	67
Bild 5.20: Verbesserung der Genauigkeit bezüglich der absoluten Werte	68
Bild 5.21: Datenverbesserung 492-D21.....	68
Bild 5.22: Datenverbesserung 492-D61.....	68
Bild 5.23: Datenverbesserung 269-D13.....	69
Bild 5.24: Änderung der Genauigkeit bezüglich der absoluten Werte in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke.....	70
Bild 5.25: Genauigkeit bezüglich der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke.....	70
Bild 5.26: Lageplan Detektor 511-D42.....	71
Bild 5.27: Datenverbesserung Detektor 511-D42	71
Bild 6.1: Implementierung des Fehlertyps 3 in die Steuerungslogik	77
Bild 6.2: Variation der Verlustzeit bei geänderter Detektionsrate im Hauptstrom, feste Umlaufzeit.....	79
Bild 6.3: Variation der Verlustzeit bei geänderter Detektionsrate im Hauptstrom,	

variable Umlaufzeit.....	80
Bild 6.4: Variation der Verlustzeit bei geänderter Detektionsrate im Nebenstrom, variable Umlaufzeit.....	80
Bild 6.5: Variation der Verlustzeit bei Anforderungsdetektoren, feste Umlaufzeit.....	81
Bild 6.6: Fehler in der Nebenrichtung, Variation der Verlustzeit bei geändertem Verkehrsstärkeverhältnis, feste Umlaufzeit.....	82
Bild 6.7: Fehler in der Nebenrichtung, Variation der Verlustzeit bei geändertem Verkehrsstärkeverhältnis, variable Umlaufzeit.....	82
Bild 6.8: Variation der Verlustzeit bei geänderter Detektorlage, feste Umlaufzeit.....	83
Bild 6.9: Variation der Verlustzeit bei geänderter Detektorlage, variable Umlaufzeit.....	83
Bild 7.1: Untersuchtes Netz.....	88
Bild 7.2: Belastung auf den einzelnen Kanten des Untersuchungsnetzes [Kfz/24h].....	89

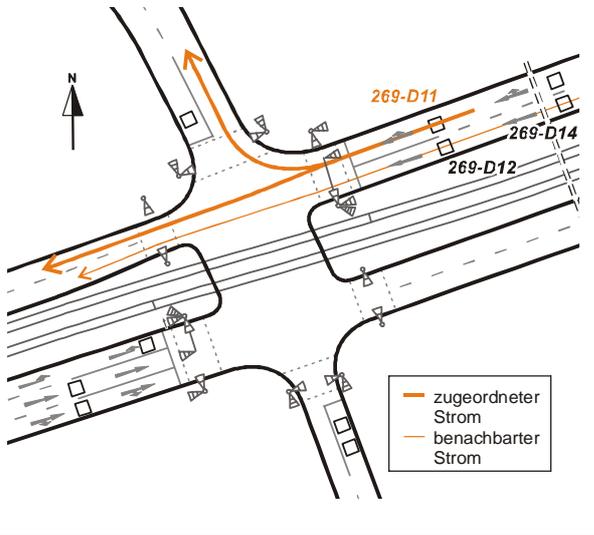
Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Zusammenstellung der 18-er Meldungen und Ermittlung von 5 min-Intervallen	24
Tabelle 4.1:	Überprüfung der Genauigkeit des Detektors 492-D21 – Korrelationsanalyse ...	35
Tabelle 4.2:	Überprüfung der Genauigkeit des Detektors 492-D61 – Korrelationsanalyse ..	36
Tabelle 4.3:	Genauigkeit der Messung in Abhängigkeit von der Anzahl benachbarter Ströme	39
Tabelle 5.1:	Ausgangswerte für die Sättigungsverkehrsstärke nach HBS [18].....	58
Tabelle 5.2:	Angepasste Ausgangswerte für die Sättigungsverkehrsstärke	58
Tabelle 5.3:	Bestimmung der Angleichungsfaktoren laut HBS [18]	59
Tabelle 5.4:	Durchschnittliche Datenverbesserung.....	67
Tabelle 5.5:	Verbesserung der Genauigkeit der Messung in Abhängigkeit von der Anzahl benachbarter Ströme	70
Tabelle 6.1:	Veränderung der Knotenpunktbewertung aufgrund aller vorhandenen Detektorfehler	78
Tabelle 6.2:	Genauigkeitsanforderungen für die Signalsteuerung	84
Tabelle 7.1:	Bewertung der Auswirkung verschiedener Varianten auf die Schätzung von Herkunft-/Zielbeziehungen	92
Tabelle 7.2:	Bewertung der Auswirkung verschiedener Varianten auf die Umlegung des Verkehrs auf das Straßennetz	93

Anhang

Dokumentation der
untersuchten Detektoren

Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 15 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 443 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 3,84 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 301 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

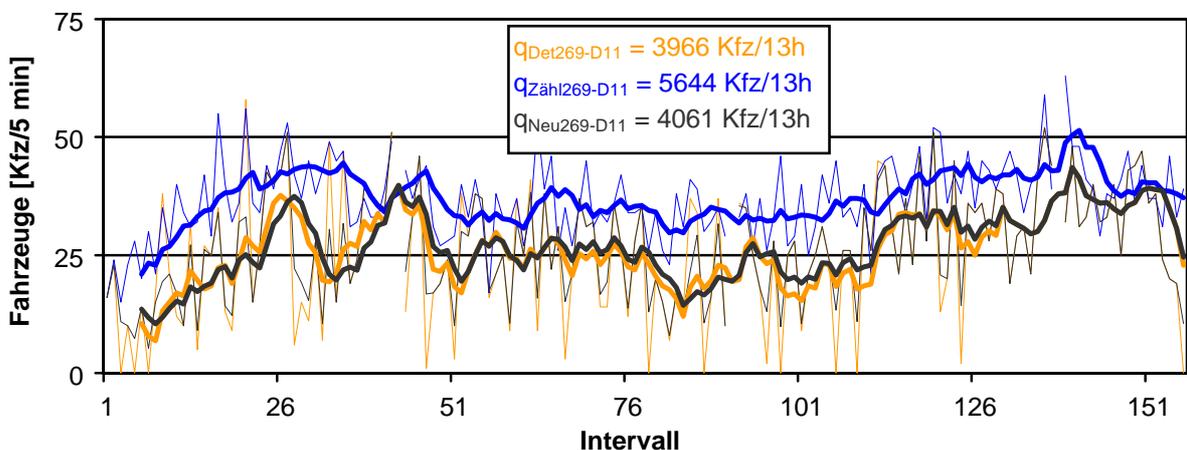
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 100 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: -
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 2 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 4 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 5 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: 0,2 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

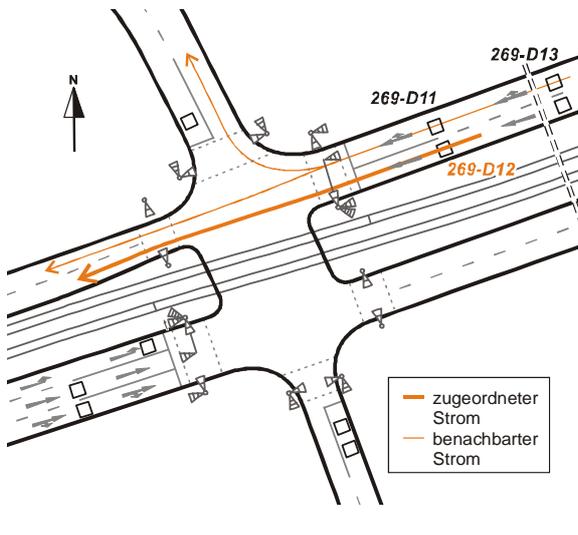
Analyse der Datenverbesserung

	Original-daten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-1678 Kfz	-1583 Kfz
relative Abweichung	-30 %	-28 %
Korrelationskoeffizient	0,43	0,46
WMQF	16,77	14,58
WMQFP	0,45	0,40

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 15 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 301 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 0,6 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 443 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

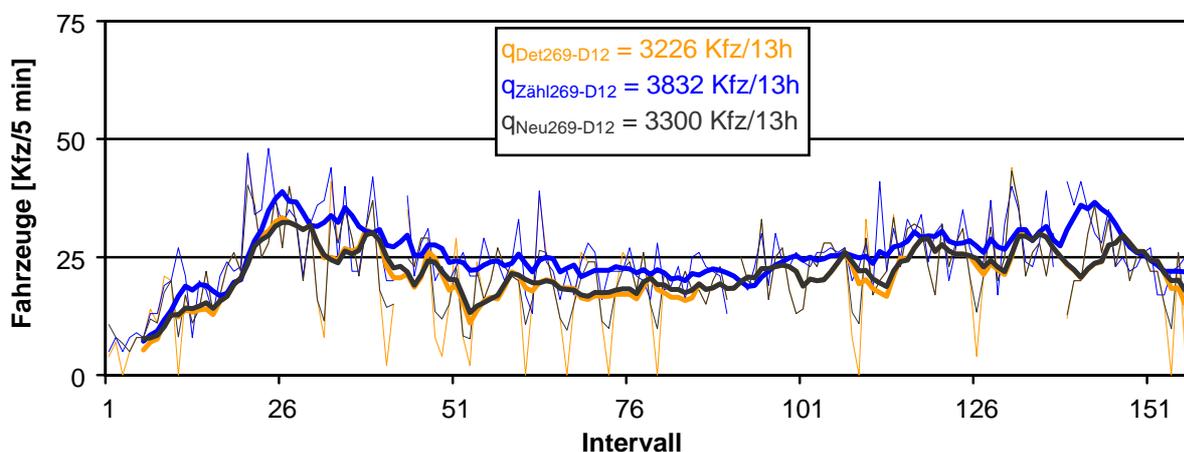
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 100 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: -
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 2 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 4 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden nicht mitgezählt
 - Fehlertyp 3: 10 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: 0,5 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

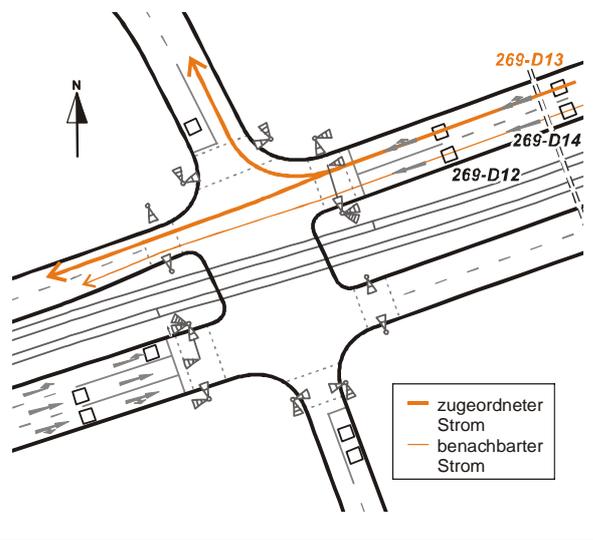
Analyse der Datenverbesserung

	Original-daten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-606 Kfz	-532 Kfz
relative Abweichung	-16 %	-14 %
Korrelationskoeffizient	0,60	0,64
WMQF	9,09	7,63
WMQFP	0,36	0,30

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 40 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Stauerkennung
- Verkehrsstärke: 451 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 3,75 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 290 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

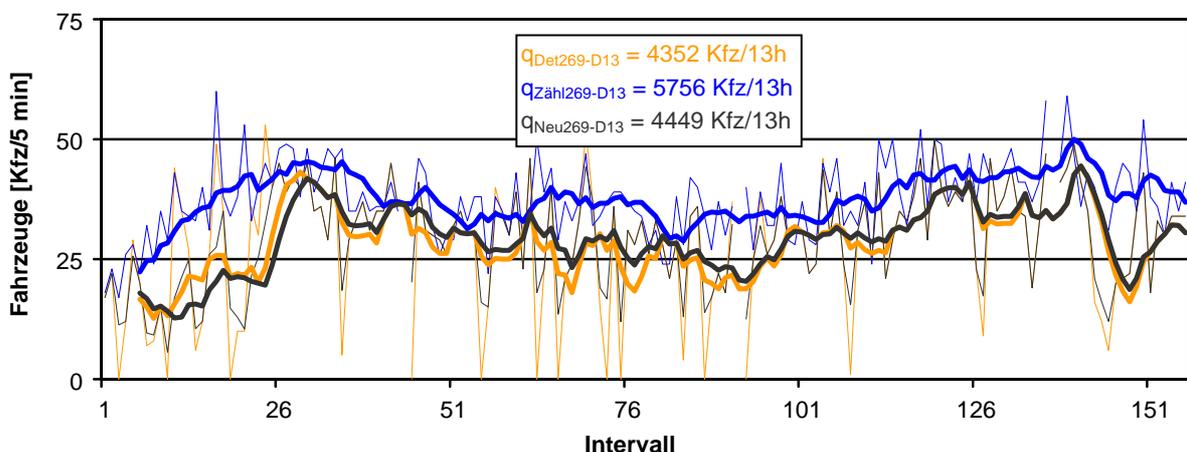
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 100 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: -
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 2 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 17 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 19 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

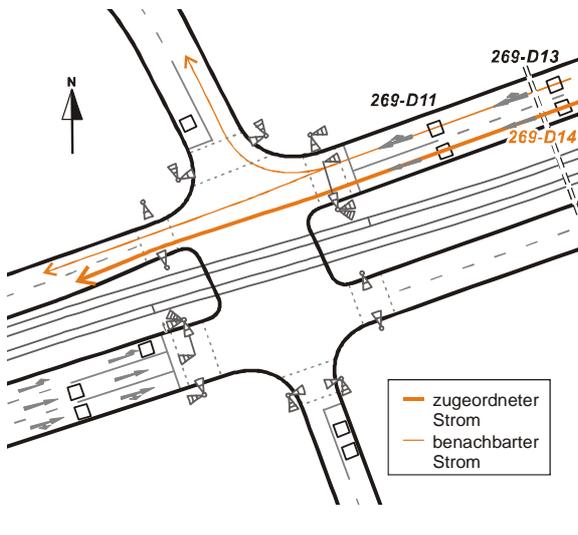
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-1404 Kfz	-1307 Kfz
relative Abweichung	-24 %	-23 %
Korrelationskoeffizient	0,46	0,51
WMQF	15,02	12,53
WMQFP	0,40	0,33

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 40 m
- Länge: 8 m
- Funktion: Stauererkennung
- Verkehrsstärke: 290 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 0,65 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 451 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

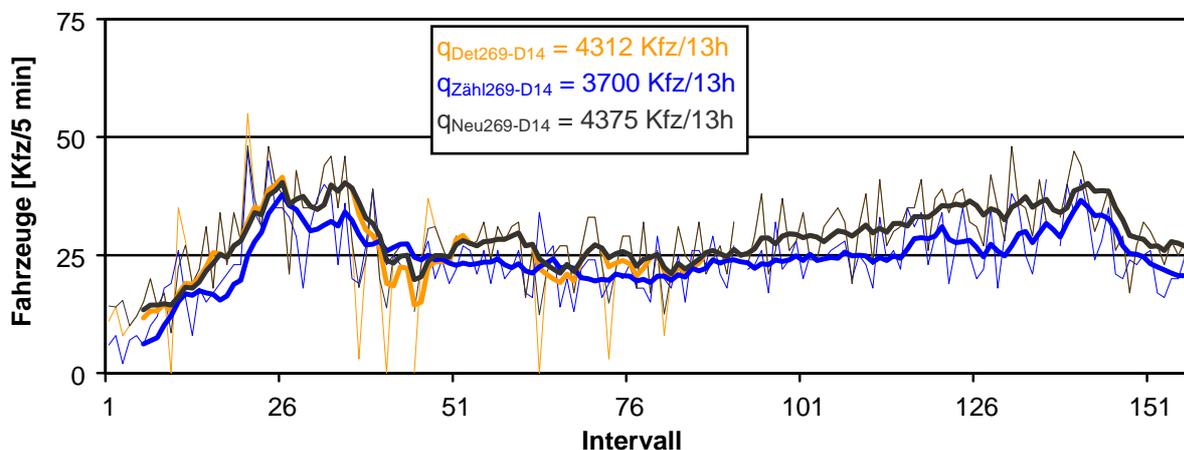
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 100 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: -
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 2 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 30 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden nicht mitgezählt
 - Fehlertyp 3: 24 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: 0,1 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

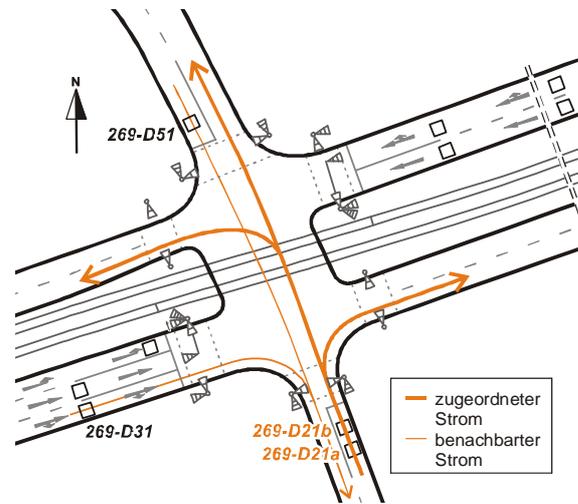
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	612 Kfz	675 Kfz
relative Abweichung	17 %	18 %
Korrelationskoeffizient	0,66	0,72
WMQF	8,57	7,56
WMQFP	0,35	0,31

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Anforderung und Bemessung
- Verkehrsstärke: 25 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 0,62 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 31 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

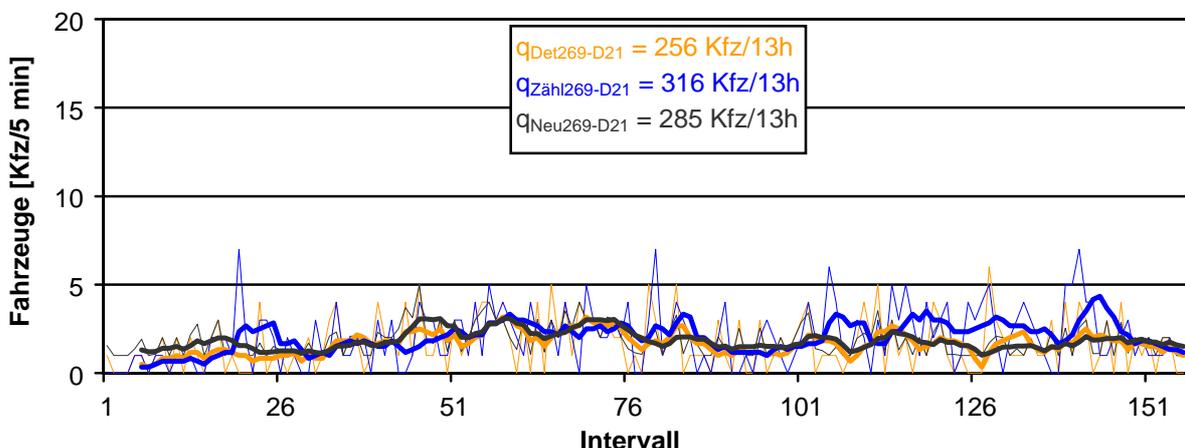
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 100 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: -
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 2 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 9 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 24 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

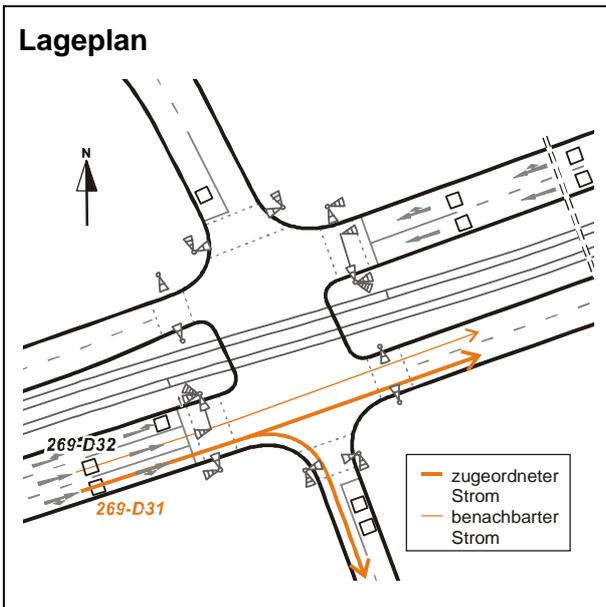
Analyse der Datenverbesserung

	Original-daten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-60 Kfz	-31 Kfz
relative Abweichung	-19 %	-10 %
Korrelationskoeffizient	0,30	0,22
WMQF	1,87	1,67
WMQFP	0,92	0,82

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 15 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 345 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 4,29 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 321 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

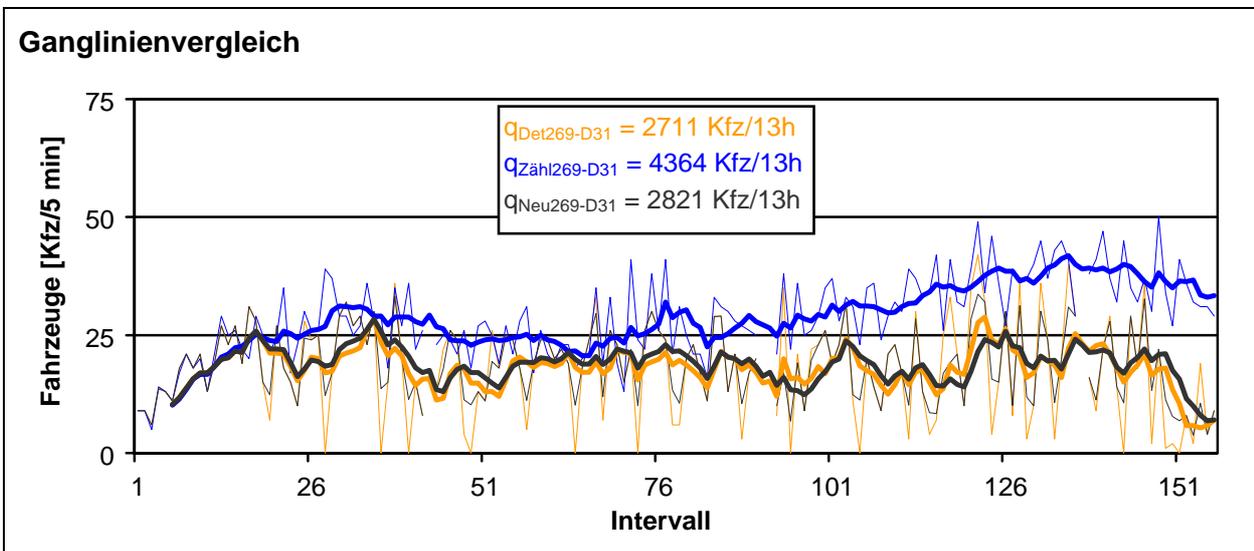
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 100 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: -
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 2 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 9 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 13 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

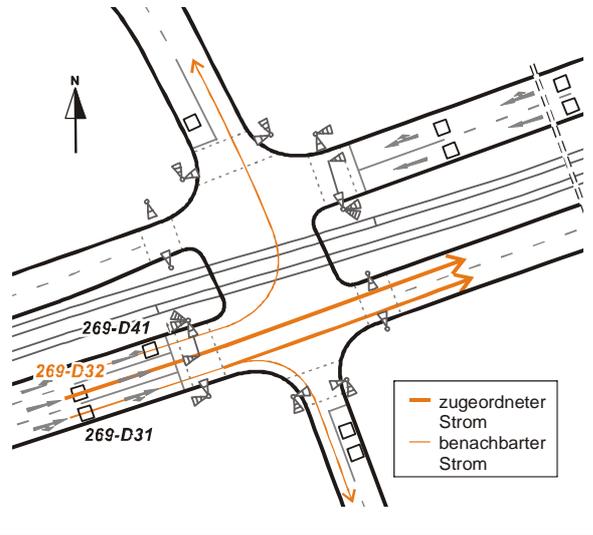
Analyse der Datenverbesserung

	Original-daten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-1653 Kfz	-1543 Kfz
relative Abweichung	-38 %	-35 %
Korrelationskoeffizient	0,17	0,20
WMQF	16,16	14,22
WMQFP	0,56	0,49

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 15 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 321 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 1,72 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 2
- Verkehrsstärke auf den benachbarten Fahrstreifen: 345 Kfz/h; 39 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

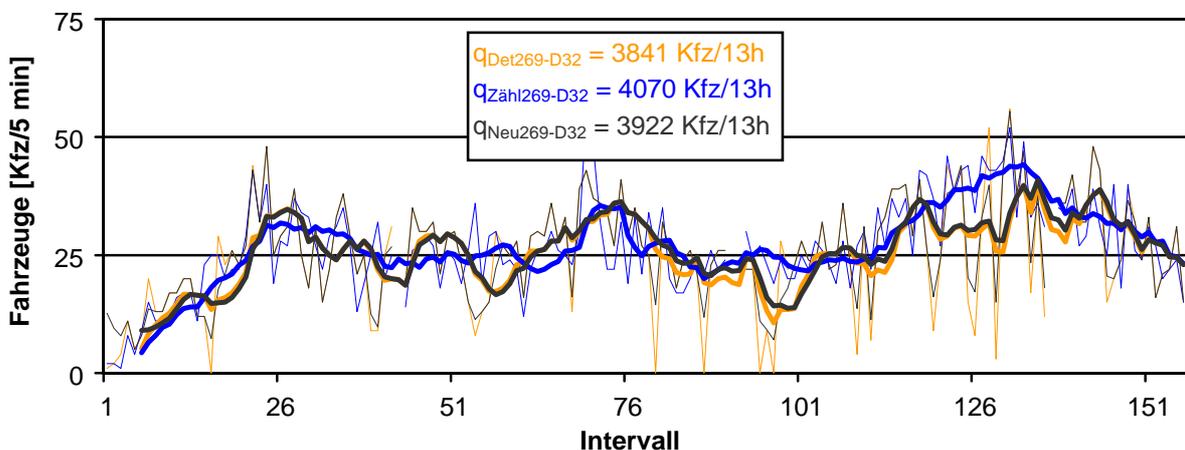
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 100 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: -
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 2 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 18 % / 20 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden nicht mitgezählt
 - Fehlertyp 3: 11 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: 0,2 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

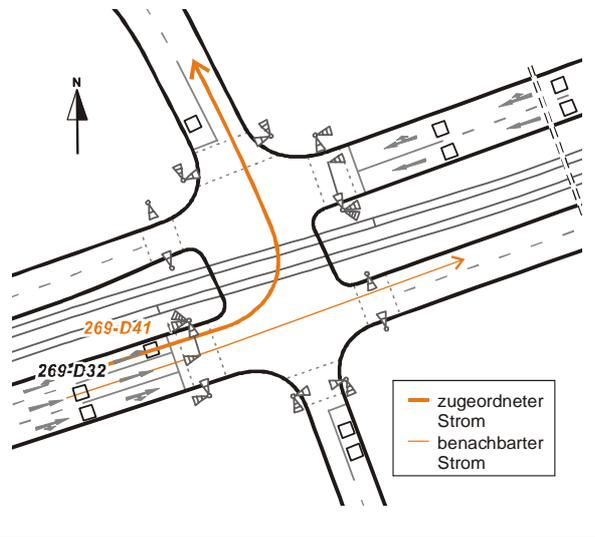
Analyse der Datenverbesserung

	Original-daten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-229 Kfz	-148 Kfz
relative Abweichung	-6 %	-4 %
Korrelationskoeffizient	0,61	0,67
WMQF	9,83	8,10
WMQFP	0,37	0,30

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Anforderung und Bemessung
- Verkehrsstärke: 39 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 1,01 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 321 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

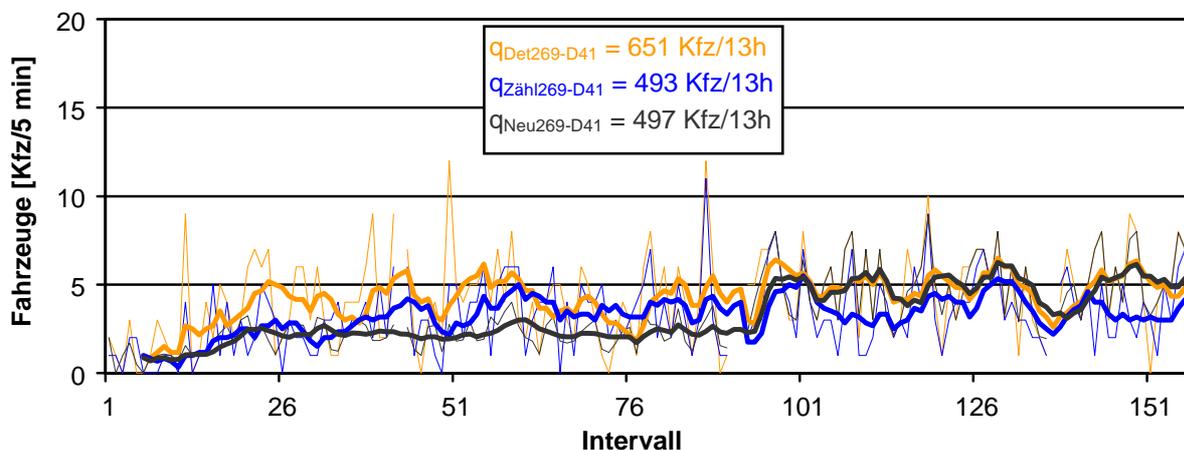
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 100 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: -
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 2 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 6 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden nicht mitgezählt
 - Fehlertyp 3: 21 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: 3,1 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

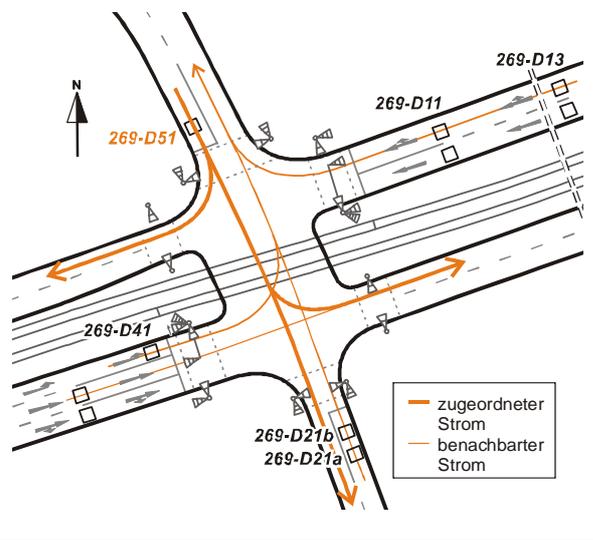
Analyse der Datenverbesserung

	Original-daten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	158 Kfz	4 Kfz
relative Abweichung	32 %	1 %
Korrelationskoeffizient	0,60	0,49
WMQF	2,35	2,01
WMQFP	0,72	0,62

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 52 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 0,46 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 43 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

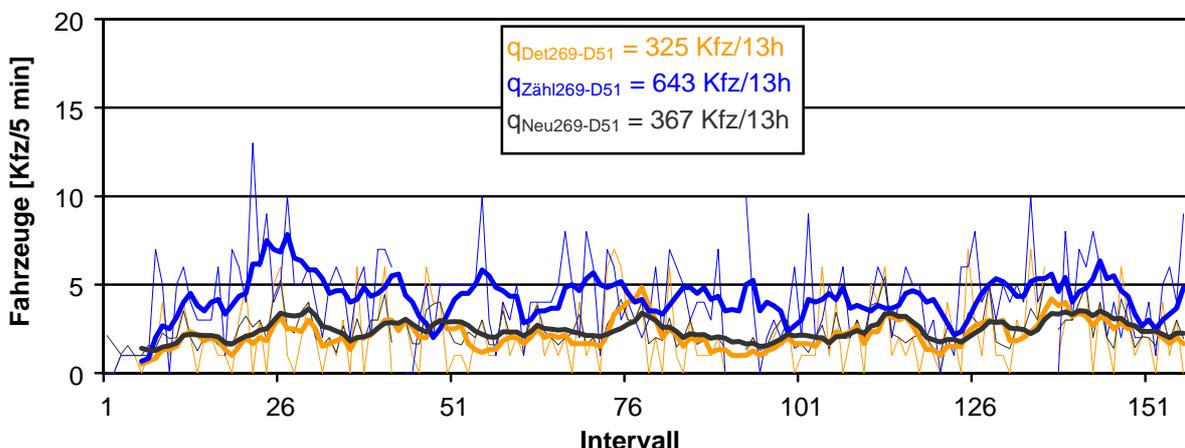
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 100 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: -
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 2 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 49 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 7 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

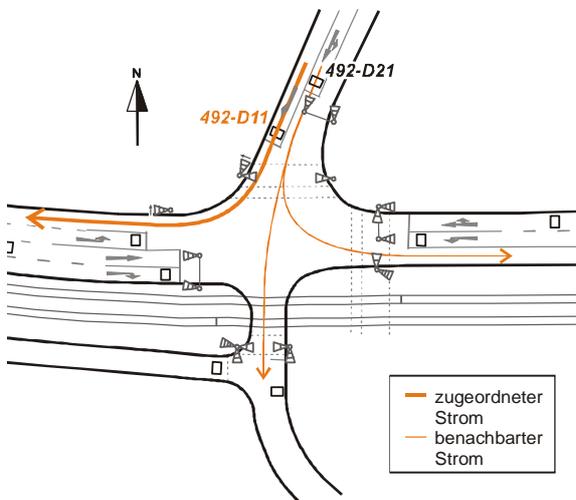
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-318 Kfz	-276 Kfz
relative Abweichung	-49 %	-43 %
Korrelationskoeffizient	0,17	0,21
WMQF	3,51	3,03
WMQFP	0,83	0,71

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Anforderung und Bemessung
- Verkehrsstärke: 78 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 6 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

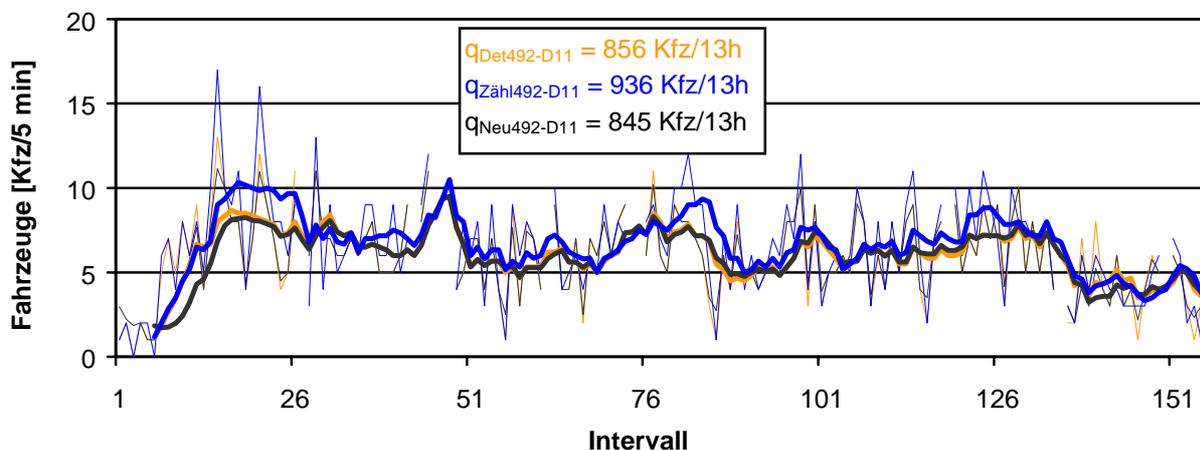
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 92,9 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 3 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 28 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 5 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 7 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

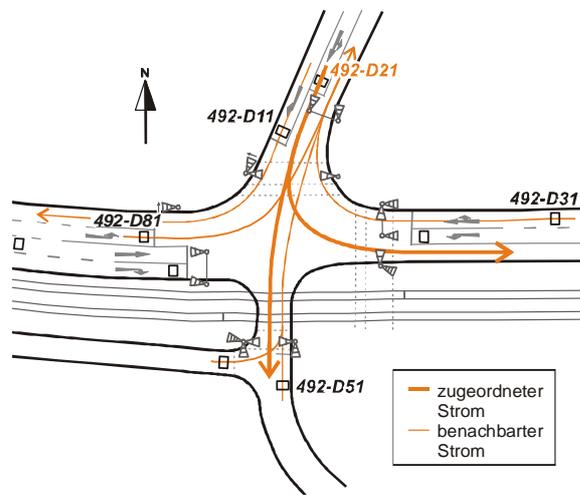
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-80 Kfz	-91 Kfz
relative Abweichung	-9 %	-10 %
Korrelationskoeffizient	0,88	0,85
WMQF	1,54	1,69
WMQFP	0,24	0,26

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Anforderung und Bemessung
- Verkehrsstärke: 6 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 2
- Verkehrsstärke auf den benachbarten Fahrstreifen: 78 Kfz/h; 72 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

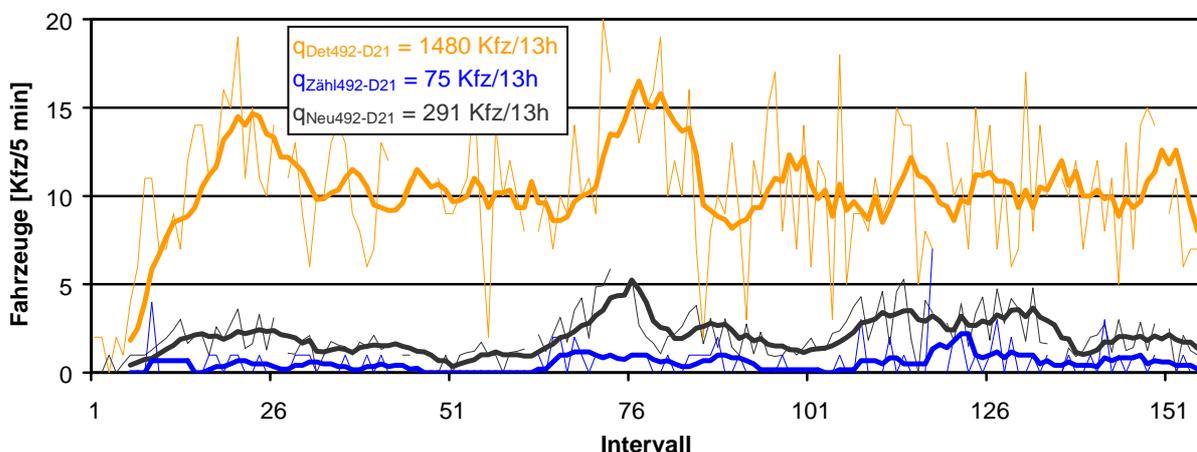
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 92,9 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 3 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 28 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 82 % / 90 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 100 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: nicht beurteilbar

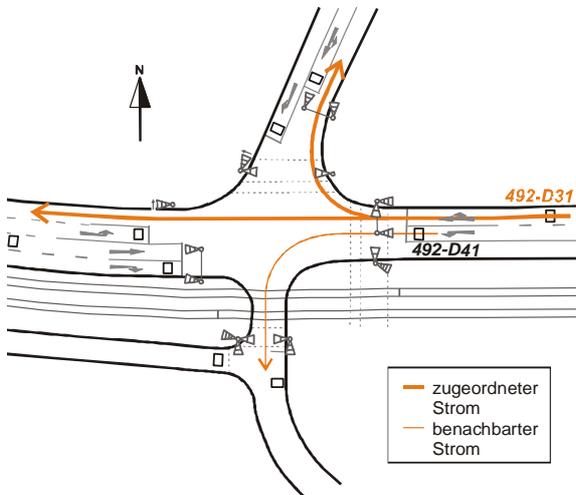
Analyse der Datenverbesserung

	Original-daten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	1405 Kfz	216 Kfz
relative Abweichung	1873 %	288 %
Korrelationskoeffizient	-0,02	0,37
WMQF	10,54	1,96
WMQFP	20,24	3,76

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 30 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 200 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 1 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

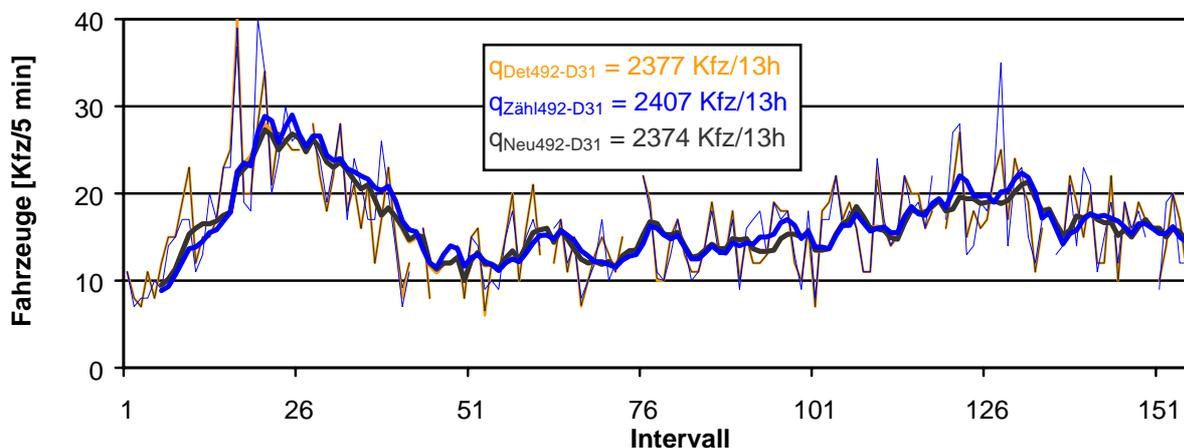
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 92,9 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 3 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 28 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 0 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 1 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

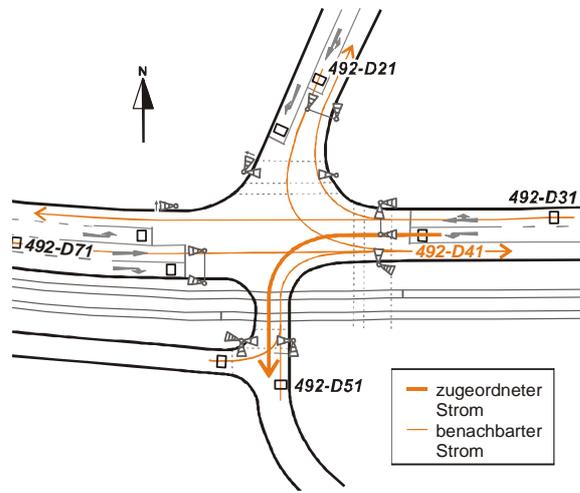
Analyse der Datenverbesserung

	Original-daten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-28 Kfz	-31 Kfz
relative Abweichung	-1,2 %	-1,3 %
Korrelationskoeffizient	0,89	0,89
WMQF	2,72	2,73
WMQFP	0,16	0,16

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Anforderung und Bemessung
- Verkehrsstärke: 1 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 2
- Verkehrsstärke auf den benachbarten Fahrstreifen: 200 Kfz/h; 199 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

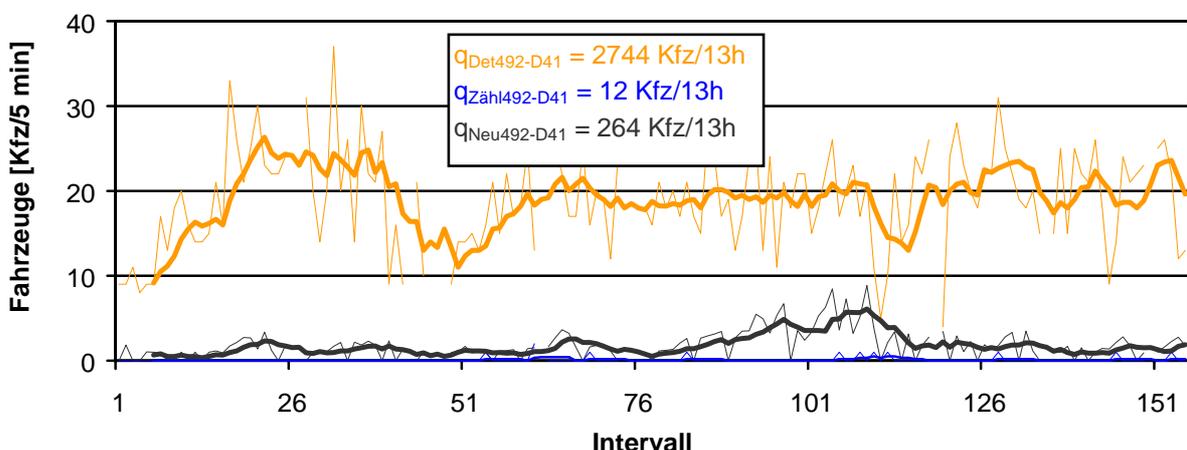
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 92,9 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 3 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 28 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 99 % / 91 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden nicht mitgezählt
 - Fehlertyp 3: der Strom wird vollständig gezählt
 - Fehlertyp 4: nicht beurteilbar

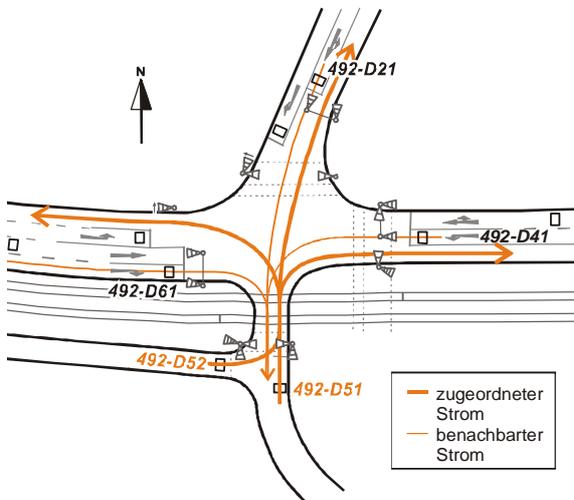
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	2732 Kfz	252 Kfz
relative Abweichung	22767 %	2103 %
Korrelationskoeffizient	-0,11	0,11
WMQF	19,85	2,43
WMQFP	238,19	29,15

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Anforderung und Bemessung
- Verkehrsstärke: 5 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: -
- Verkehrsstärke auf den benachbarten Fahrstreifen: -
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

Die beiden Detektoren können aufgrund der Kameraaufstellung bei den empirischen Untersuchungen nur gemeinsam betrachtet werden.

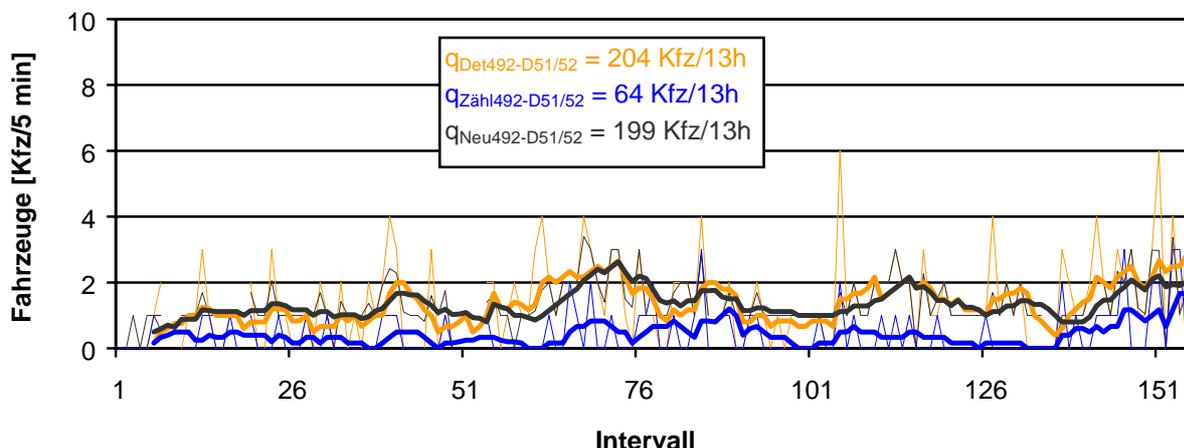
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 94,9 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 2 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 28 s
- Genauigkeit:
 - aufgrund der gemeinsamen Beurteilung zweier Detektoren und aufgrund der geringen Verkehrsstärke sind die einzelnen Fehler nicht bestimmbar

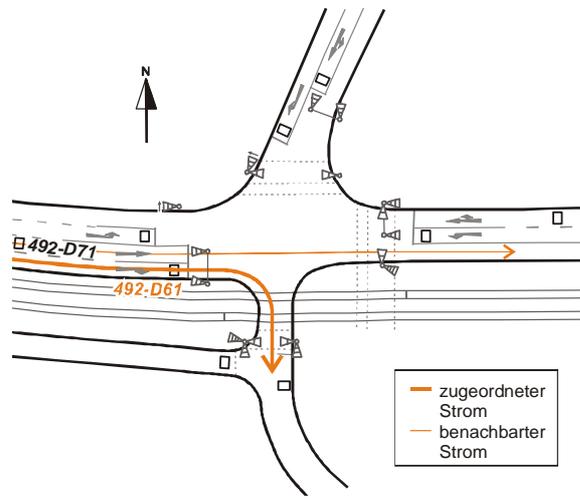
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	141 Kfz	136 Kfz
relative Abweichung	224 %	217 %
Korrelationskoeffizient	0,48	0,43
WMQF	1,45	1,20
WMQFP	3,39	2,80

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Anforderung und Bemessung
- Verkehrsstärke: 5 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 219 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

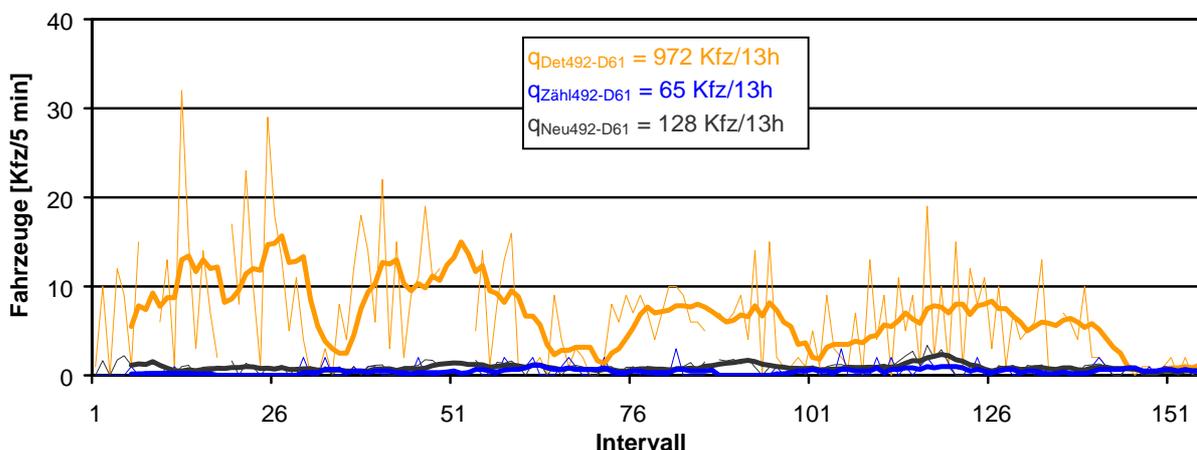
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 94,9 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 2 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 28 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 13 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden teilweise mitgezählt
 - Fehlertyp 3: der Strom wird vollständig gezählt
 - Fehlertyp 4: nicht beurteilbar

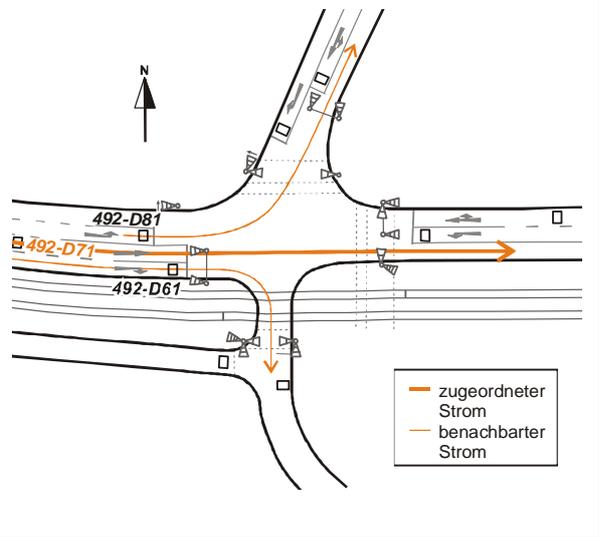
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	907 Kfz	63 Kfz
relative Abweichung	1395 %	98 %
Korrelationskoeffizient	-0,16	0,27
WMQF	8,83	0,93
WMQFP	19,97	2,10

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 30 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 194 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 2
- Verkehrsstärke auf den benachbarten Fahrstreifen: 5 Kfz/h; 62 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

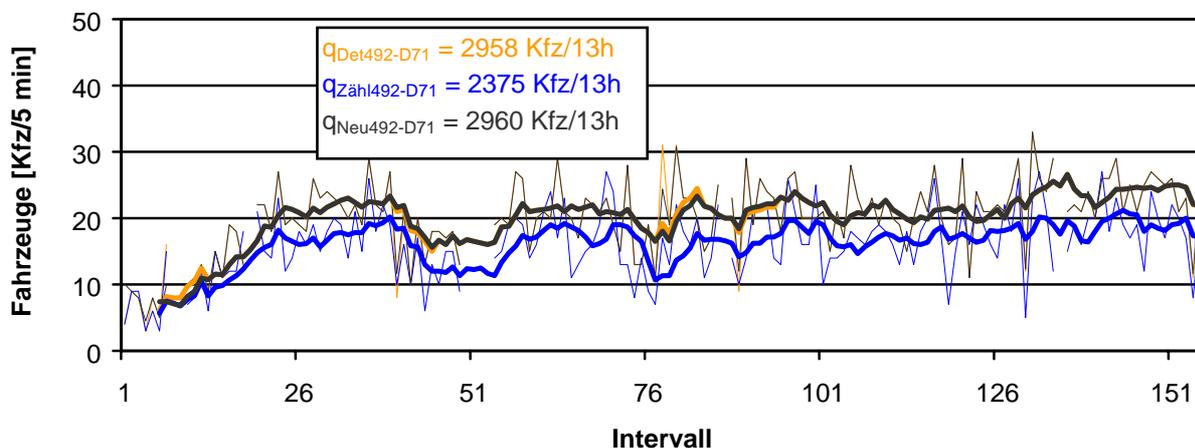
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 94,9 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 2 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 28 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 93 % / 64 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden nicht mitgezählt
 - Fehlertyp 3: der Strom wird vollständig gezählt
 - Fehlertyp 4: 1,2 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

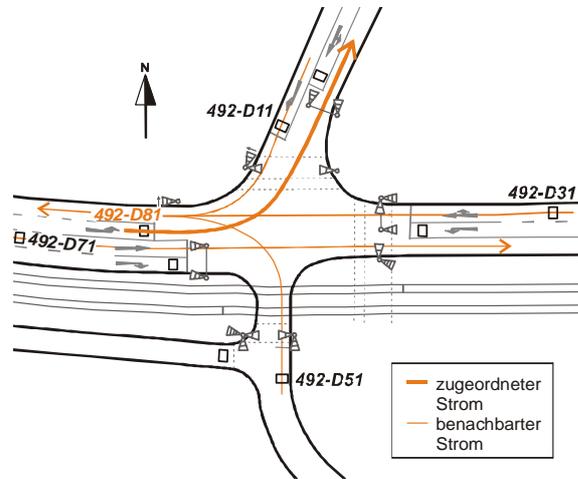
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	583 Kfz	585 Kfz
relative Abweichung	25 %	25 %
Korrelationskoeffizient	0,74	0,73
WMQF	5,66	5,61
WMQFP	0,35	0,35

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Anforderung und Bemessung
- Verkehrsstärke: 62 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 2
- Verkehrsstärke auf den benachbarten Fahrstreifen: 194 Kfz/h; 277 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

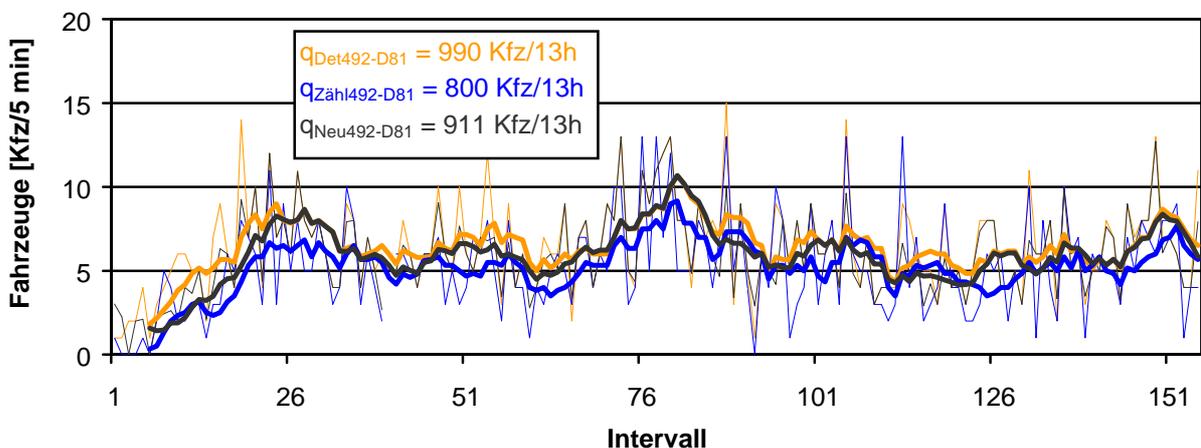
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 99,4 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 1 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 28 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 2 % / 0 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: der Strom wird vollständig gezählt
 - Fehlertyp 4: 23,8 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

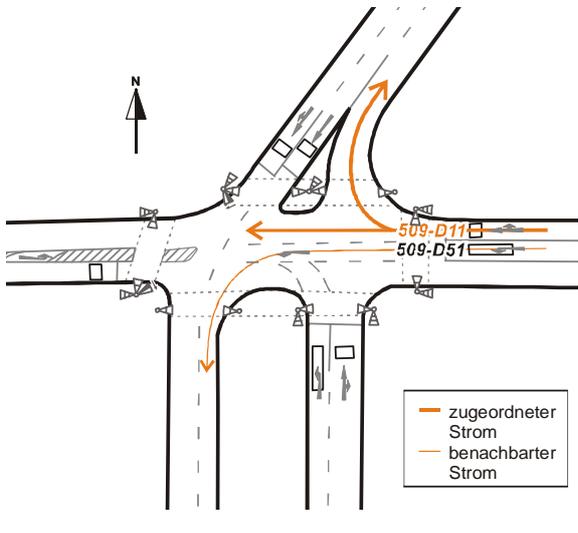
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	190 Kfz	111 Kfz
relative Abweichung	24 %	14 %
Korrelationskoeffizient	0,74	0,72
WMQF	2,39	2,17
WMQFP	0,46	0,42

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 452 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 3,25 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 119 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

Über einen Zeitraum von ca. 2 h wurden nur Verkehrsstärkedaten aber keine Informationen über Freigabezeiten übermittelt.

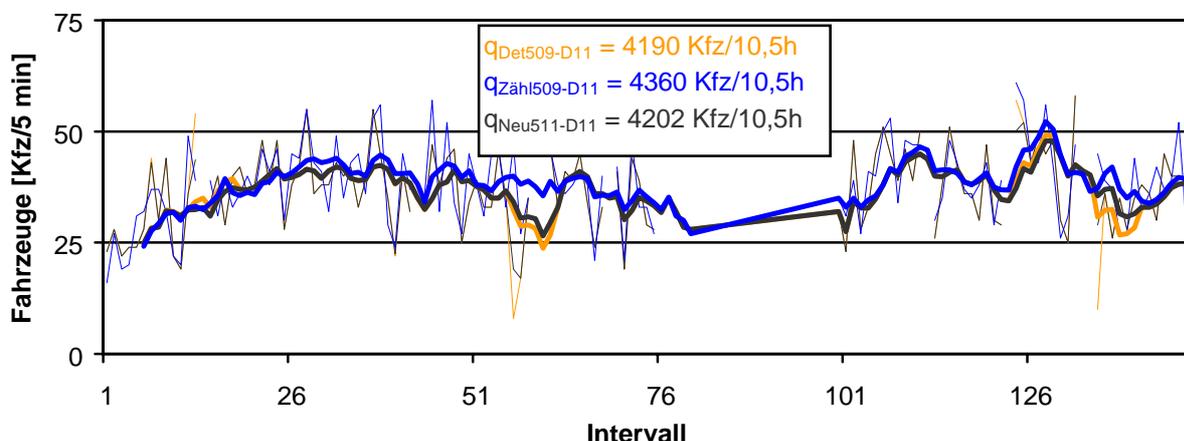
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 96,6 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 2 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 7 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 35 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: der Strom wird vollständig gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

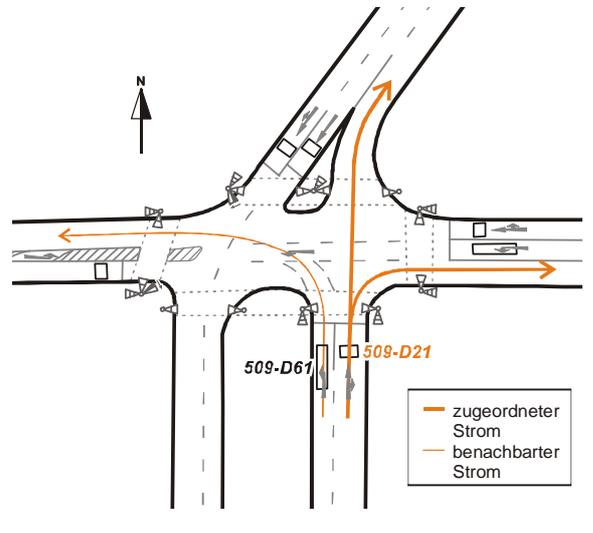
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-170 Kfz	-158 Kfz
relative Abweichung	-3,9 %	-3,6 %
Korrelationskoeffizient	0,65	0,72
WMQF	7,93	6,84
WMQFP	0,21	0,18

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 239 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 2,89 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 157 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

Über einen Zeitraum von ca. 2 h wurden nur Verkehrsstärkedaten aber keine Informationen über Freigabezeiten übermittelt.

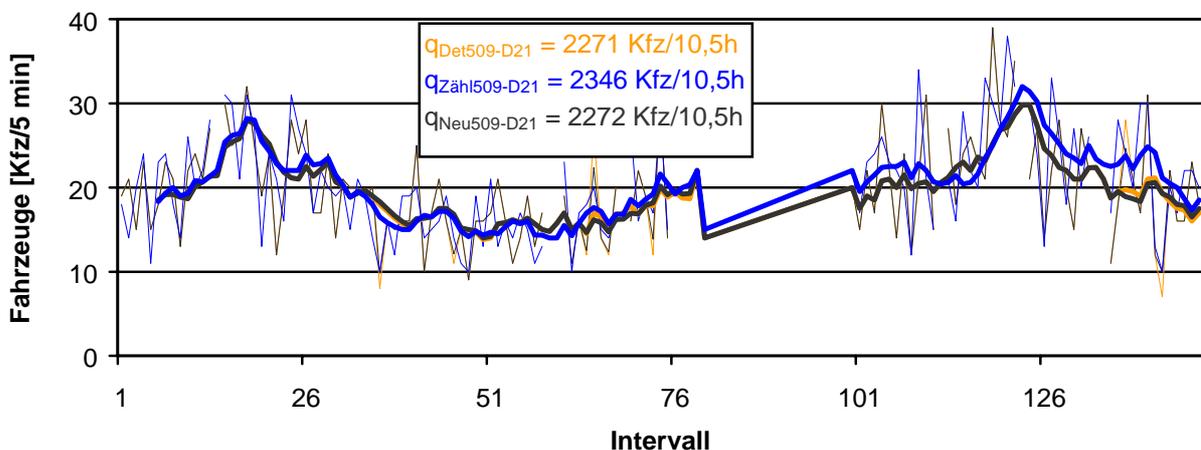
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 96,6 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 2 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 7 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 0 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: der Strom wird vollständig gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

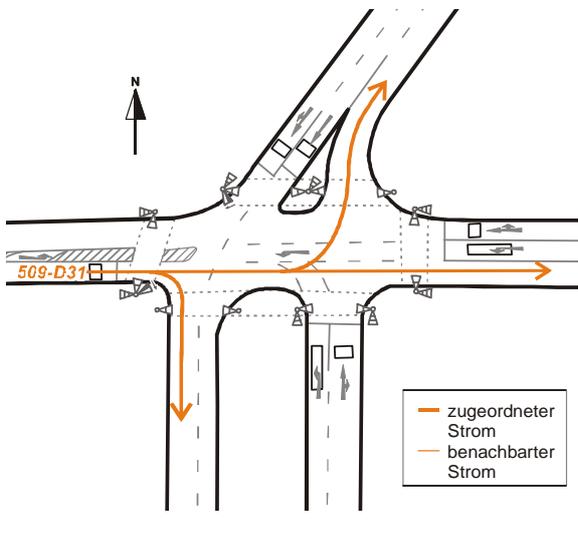
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-75 Kfz	-74 Kfz
relative Abweichung	3,2 %	3,2 %
Korrelationskoeffizient	0,68	0,68
WMQF	4,93	4,84
WMQFP	0,24	0,24

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 438 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 3,45 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 0
- Verkehrsstärke auf den benachbarten Fahrstreifen: -
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

Über einen Zeitraum von ca. 2 h wurden nur Verkehrsstärkedaten aber keine Informationen über Freigabezeiten übermittelt.

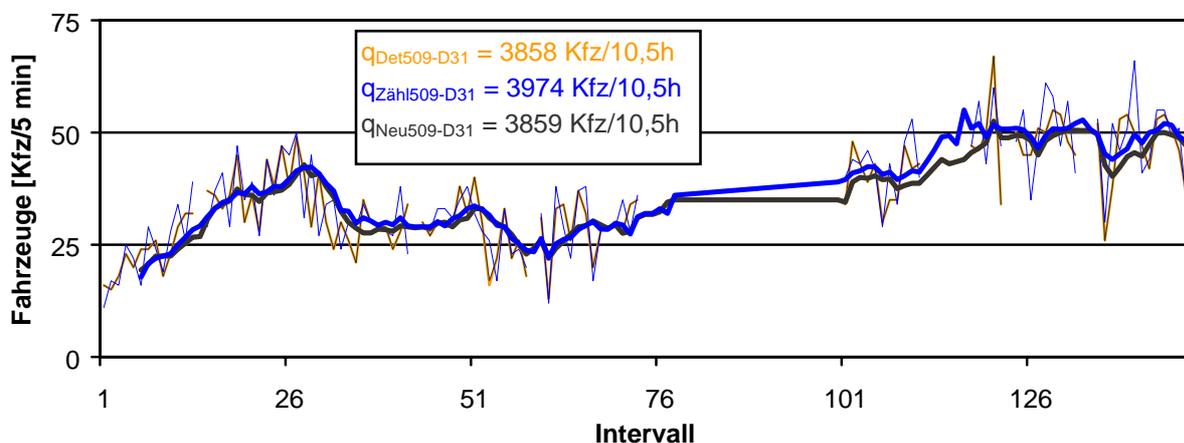
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 96,6 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 2 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 7 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: keine Nachbarströme vorhanden
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 3 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: 0,3 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

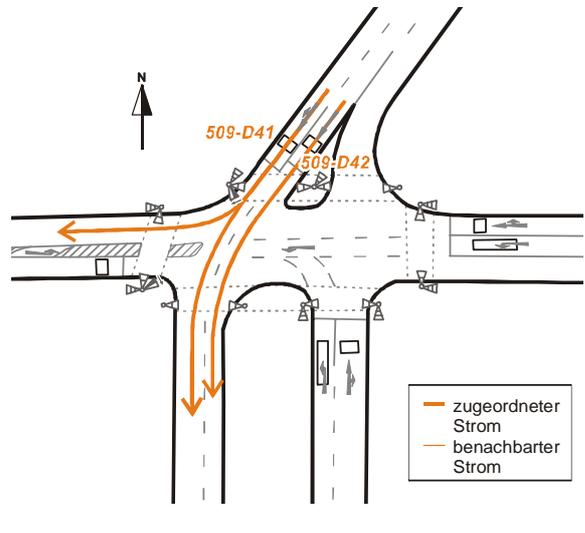
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-116 Kfz	-115 Kfz
relative Abweichung	-2,9 %	-2,9 %
Korrelationskoeffizient	0,86	0,86
WMQF	6,04	6,02
WMQFP	0,17	0,17

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 160 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 2,35 %
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

Die beiden Detektoren können aufgrund der Kameraaufstellung bei den empirischen Untersuchungen nur gemeinsam betrachtet werden.

Über einen Zeitraum von ca. 2 h wurden nur Verkehrsstärkedaten aber keine Informationen über Freigabezeiten übermittelt.

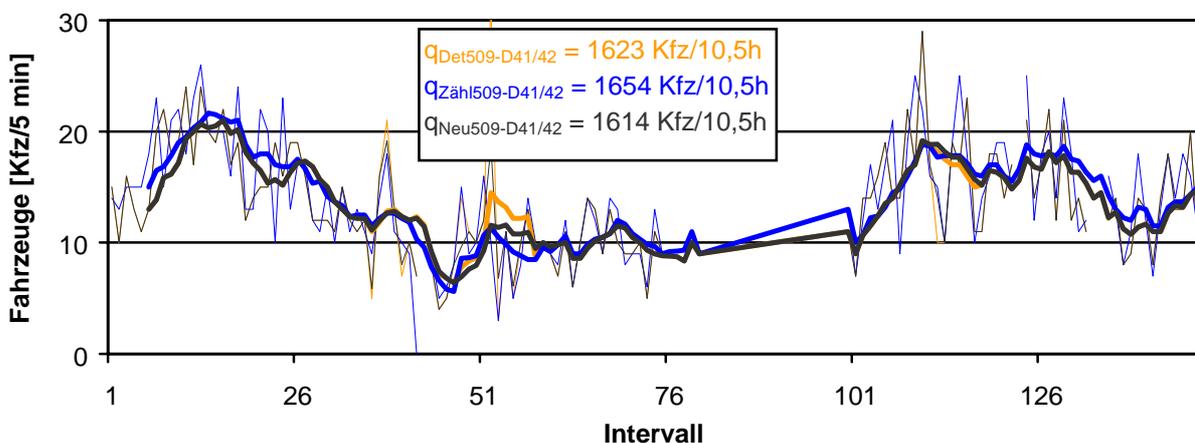
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 98,6 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 2 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 7 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: nicht beurteilbar
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 2 % der Ströme werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: nicht beurteilbar

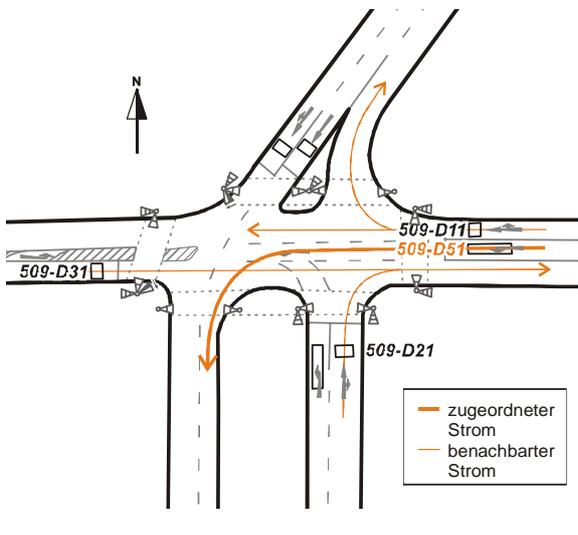
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-31 Kfz	-40 Kfz
relative Abweichung	-1,9 %	-2,4 %
Korrelationskoeffizient	0,73	0,79
WMQF	3,77	3,28
WMQFP	0,27	0,23

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 8 m
- Funktion: Stauererkennung
- Verkehrsstärke: 93 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 4,21 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 2
- Verkehrsstärke auf den benachbarten Fahrstreifen: 504 Kfz/h; 474 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

Über einen Zeitraum von ca. 2 h wurden nur Verkehrsstärkedaten aber keine Informationen über Freigabezeiten übermittelt.

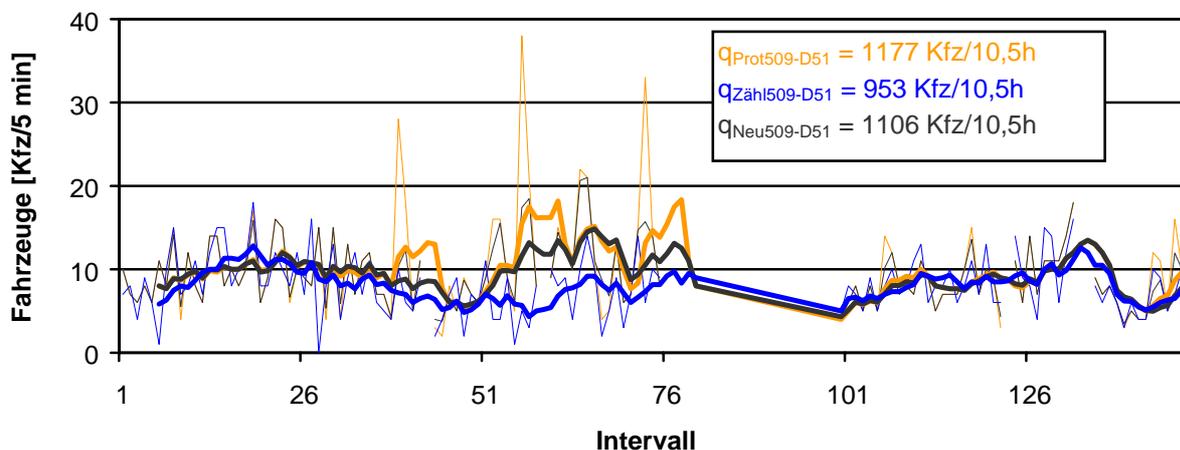
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 98,6 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 2 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 7 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 2 % / 0 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: der Strom wird vollständig gezählt
 - Fehlertyp 4: 9,9 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

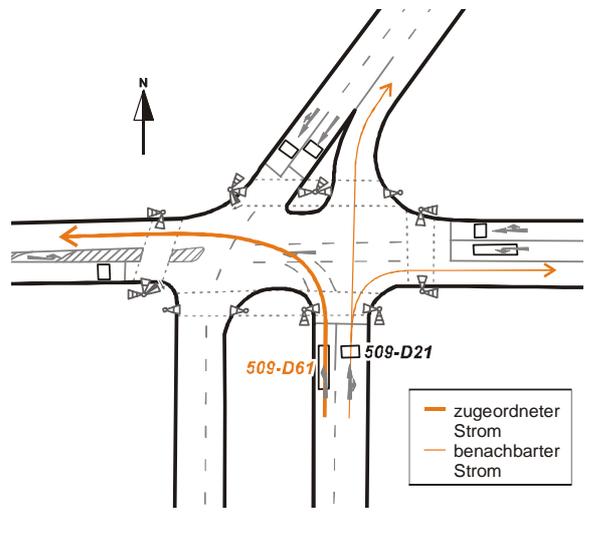
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	224 Kfz	153 Kfz
relative Abweichung	24 %	16 %
Korrelationskoeffizient	0,28	0,41
WMQF	6,06	4,18
WMQFP	0,75	0,52

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 8 m
- Funktion: Stauererkennung
- Verkehrsstärke: 114 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 3,13 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 301 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

Über einen Zeitraum von ca. 2 h wurden nur Verkehrsstärkedaten aber keine Informationen über Freigabezeiten übermittelt.

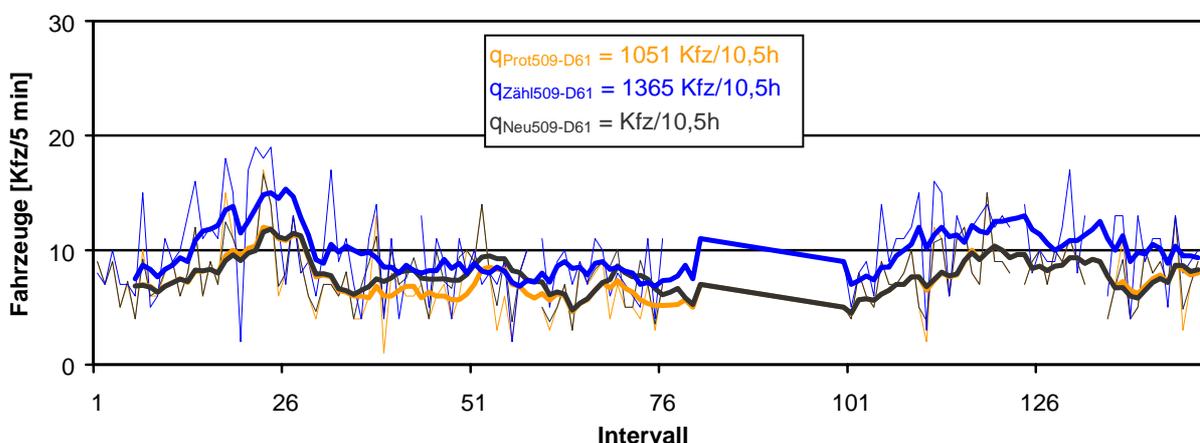
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 98,6 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 2 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 7 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 0 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 21 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

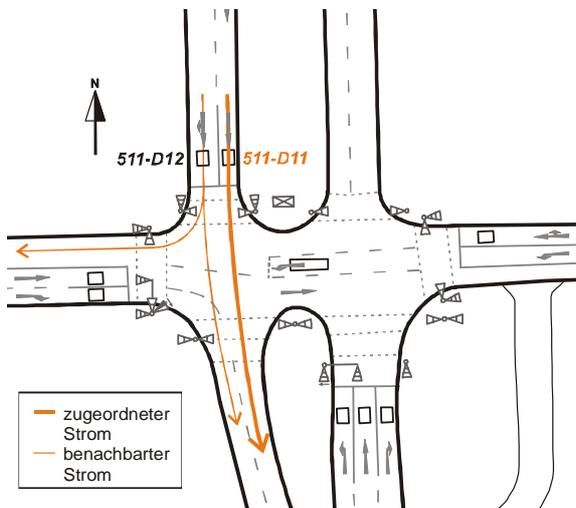
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-265 Kfz	-220 Kfz
relative Abweichung	-22,6 %	-18,8 %
Korrelationskoeffizient	0,67	0,60
WMQF	3,64	3,65
WMQFP	0,37	0,37

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 219 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 1,75 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 102 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

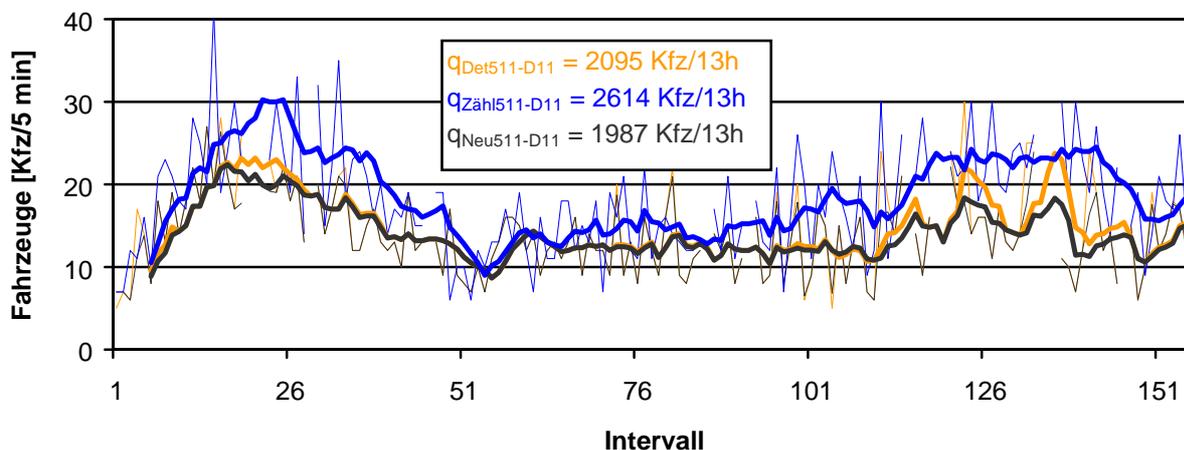
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 92,9 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 3 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 24 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 0 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 21 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

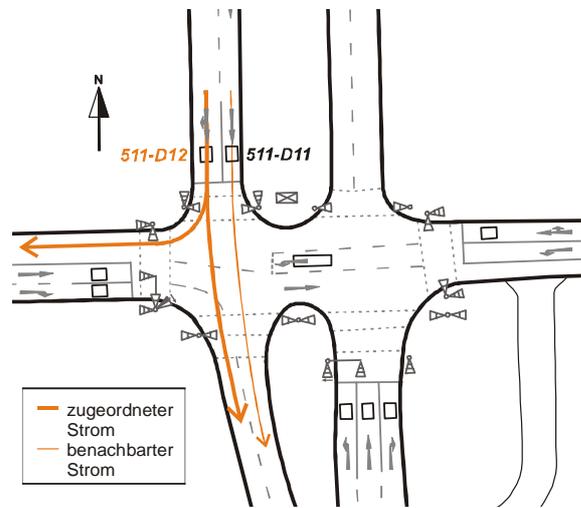
Analyse der Datenverbesserung

	Original-daten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-550 Kfz	-627 Kfz
relative Abweichung	-22 %	-24 %
Korrelationskoeffizient	0,47	0,47
WMQF	7,46	7,38
WMQFP	0,41	0,40

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 102 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 2,37 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 219 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

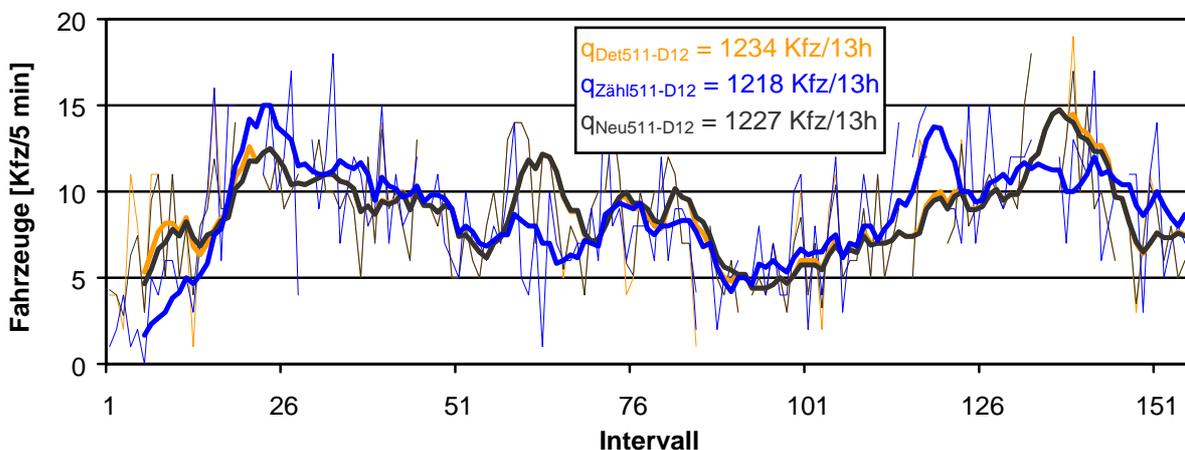
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 92,9 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 3 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 24 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 2 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 8 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: 5,2 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

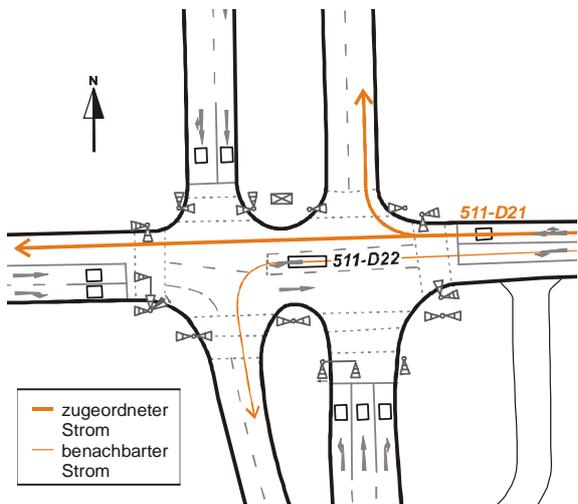
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	16 Kfz	9 Kfz
relative Abweichung	1 %	1 %
Korrelationskoeffizient	0,50	0,50
WMQF	3,67	3,57
WMQFP	0,43	0,42

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 434 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 2,09 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 133 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

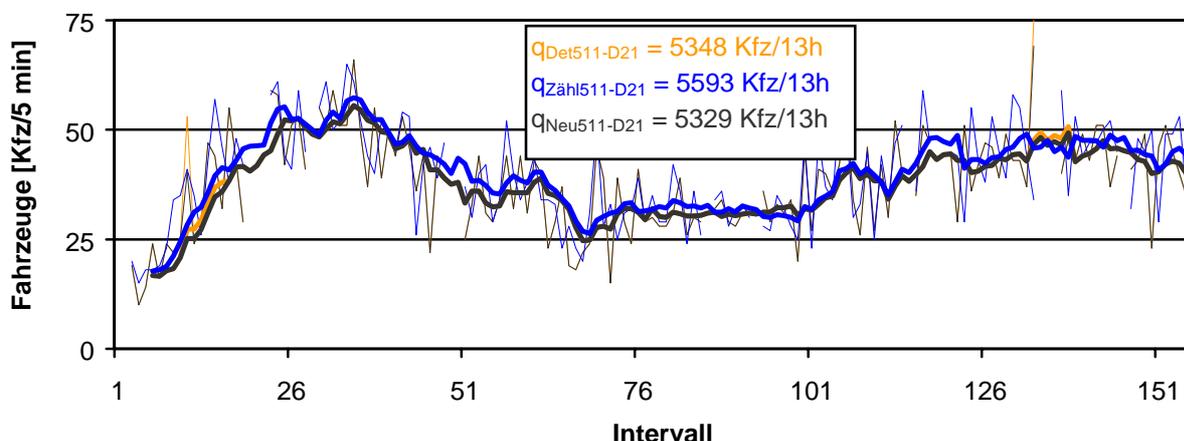
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 92,9 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 3 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 24 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 23 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 2 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Ströme gezählt

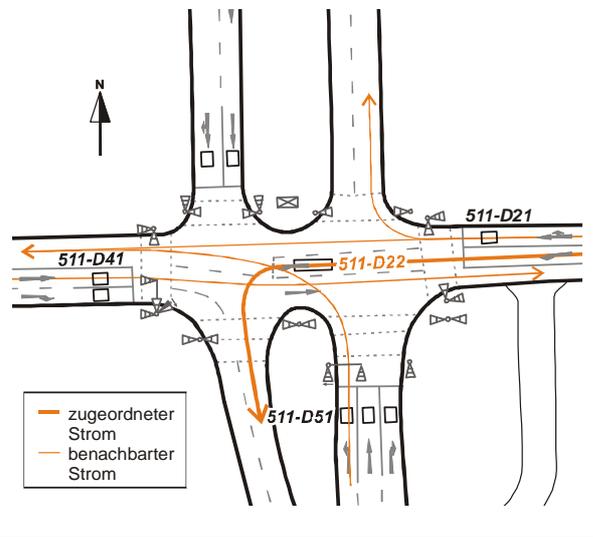
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-245 Kfz	-264 Kfz
relative Abweichung	-4,4 %	-4,7 %
Korrelationskoeffizient	0,68	0,69
WMQF	9,19	8,96
WMQFP	0,23	0,22

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: -25 m
- Länge: 8 m
- Funktion: Stauererkennung
- Verkehrsstärke: 133 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 2,37 %
- der Detektor liegt innerhalb der Konfliktfläche; benachbarte Fahrstreifen sind daher nicht zweifelsfrei einzugrenzen

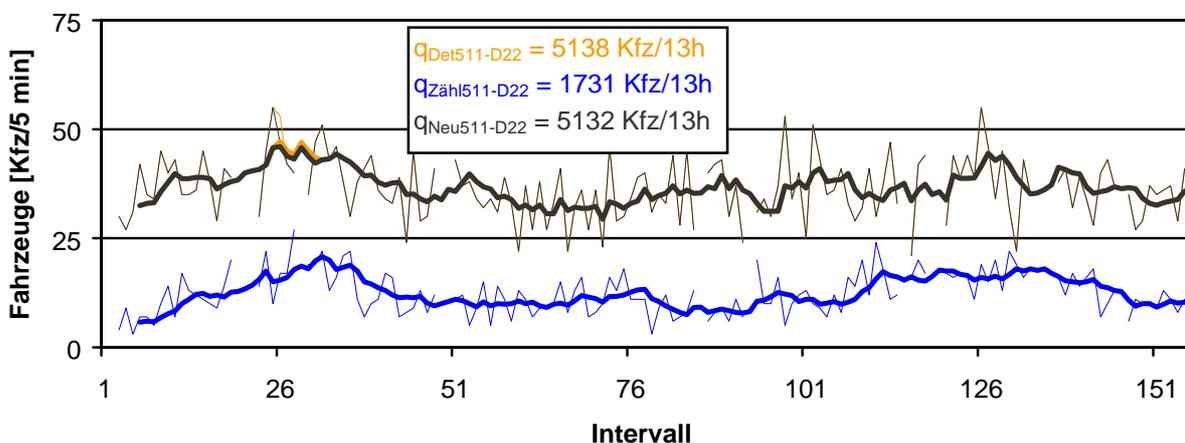
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 92,9 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 3 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 24 s
- Genauigkeit:
 - aufgrund des insgesamt sehr großen Fehlers sind die einzelnen Ursachen nicht zweifelsfrei bestimmbar

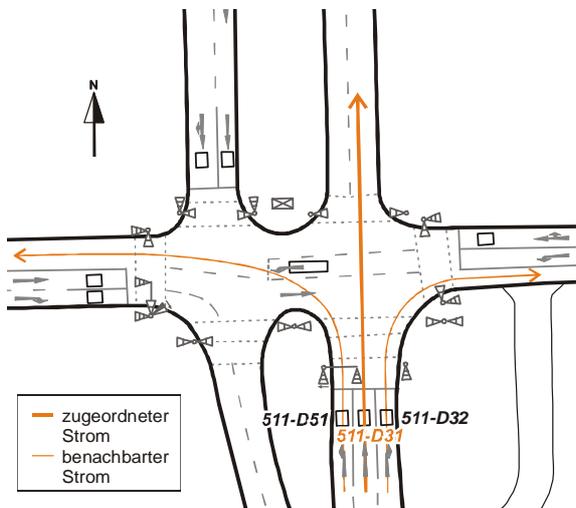
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	3407 Kfz	3401 Kfz
relative Abweichung	197 %	197 %
Korrelationskoeffizient	0,09	0,09
WMQF	25,69	25,64
WMQFP	2,08	2,07

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 316 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 3,36 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 2
- Verkehrsstärke auf den benachbarten Fahrstreifen: 159 Kfz/h; 66 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

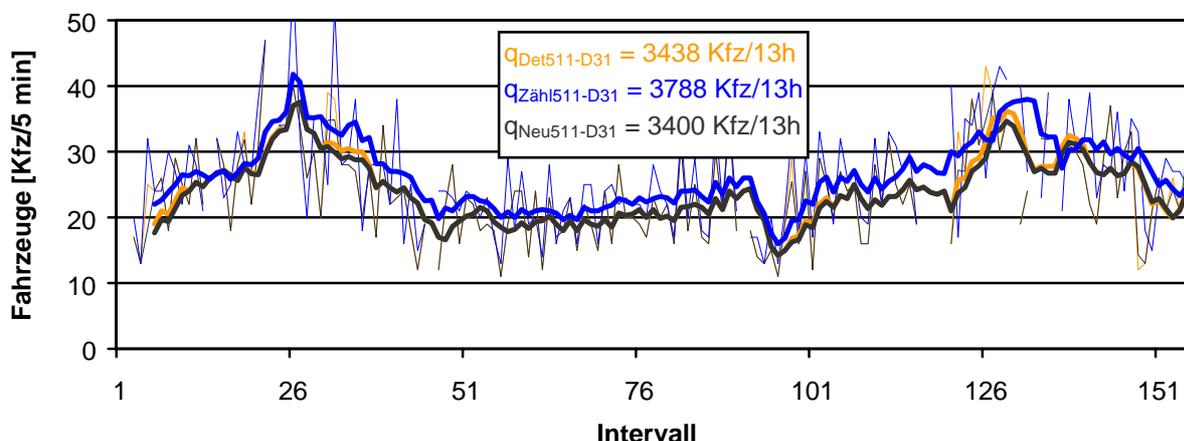
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 93,6 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 3 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 24 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 18 % / 13 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 3 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

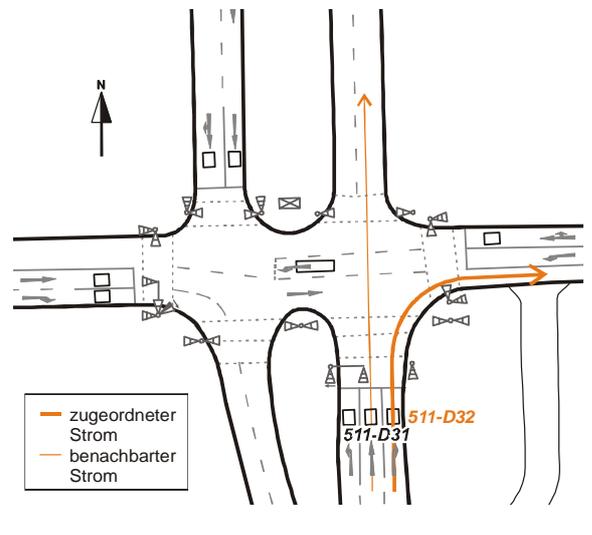
Analyse der Datenverbesserung

	Original-daten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-350 Kfz	-388 Kfz
relative Abweichung	-9,2 %	-10,2 %
Korrelationskoeffizient	0,66	0,67
WMQF	6,74	6,62
WMQFP	0,26	0,25

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 159 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 1,61 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 316 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

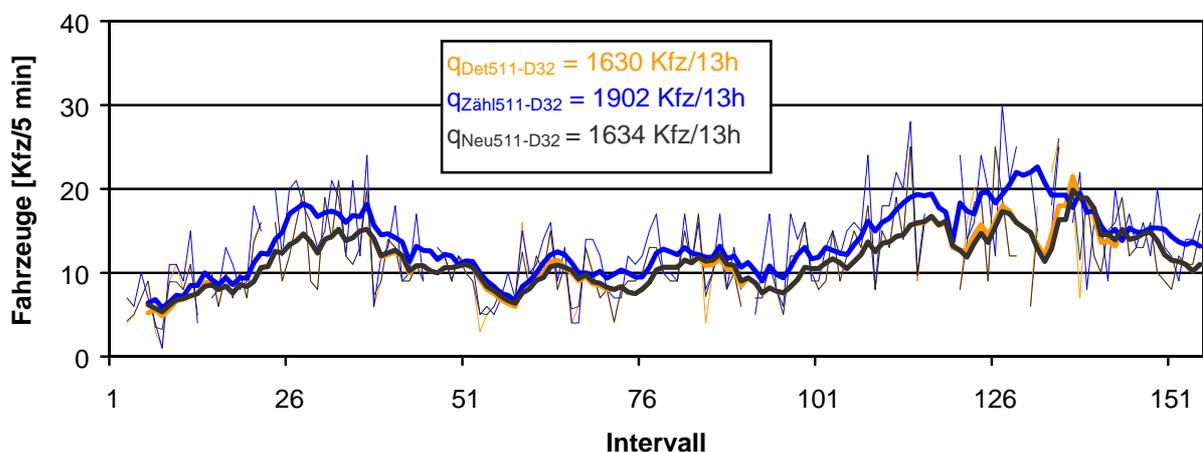
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 93,6 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 3 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 24 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 0 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 14 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

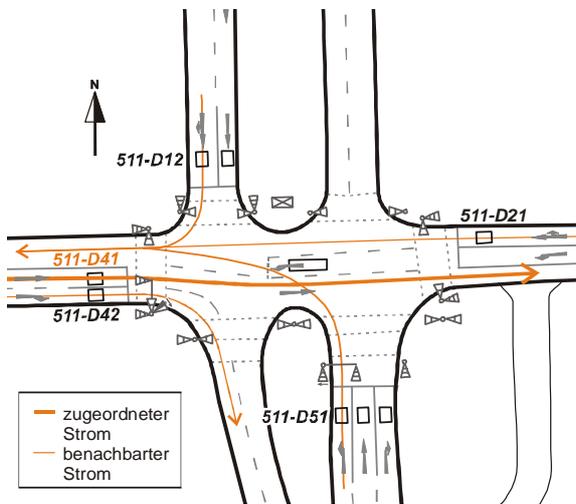
Analyse der Datenverbesserung

	Original-daten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-272 Kfz	-268 Kfz
relative Abweichung	-14,3 %	-14,1 %
Korrelationskoeffizient	0,68	0,64
WMQF	4,56	4,43
WMQFP	0,34	0,34

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 519 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 1,61 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 2
- Verkehrsstärke auf den benachbarten Fahrstreifen: 81 Kfz/h; 444 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

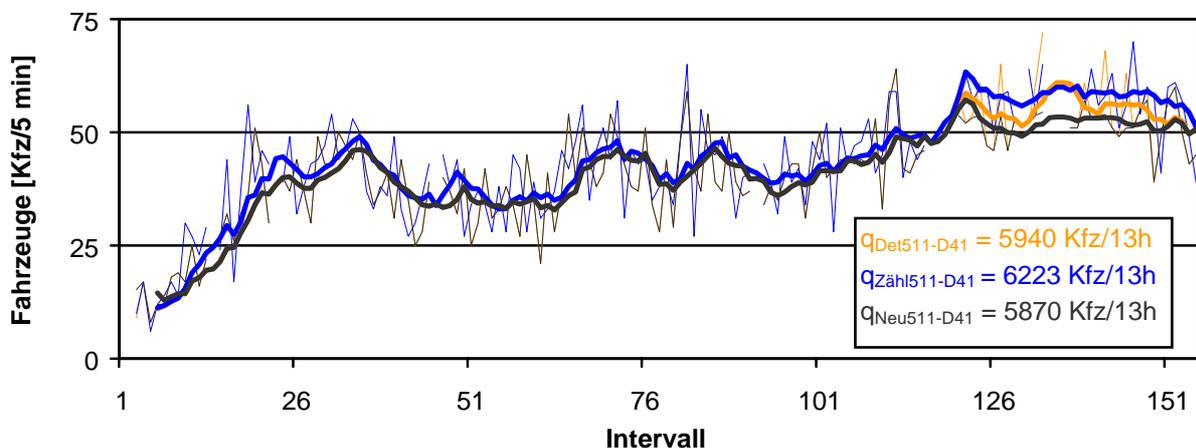
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 93,6 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 3 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 24 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 0 % / 9 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 14 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: 2,7 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

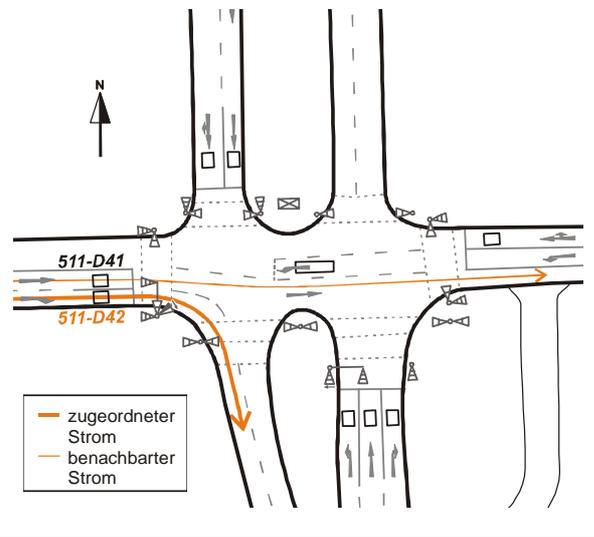
Analyse der Datenverbesserung

	Original-daten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-283 Kfz	-268 Kfz
relative Abweichung	-14,3 %	-14,1 %
Korrelationskoeffizient	0,68	0,69
WMQF	4,56	4,43
WMQFP	0,34	0,34

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 81 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 1,81 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 519 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

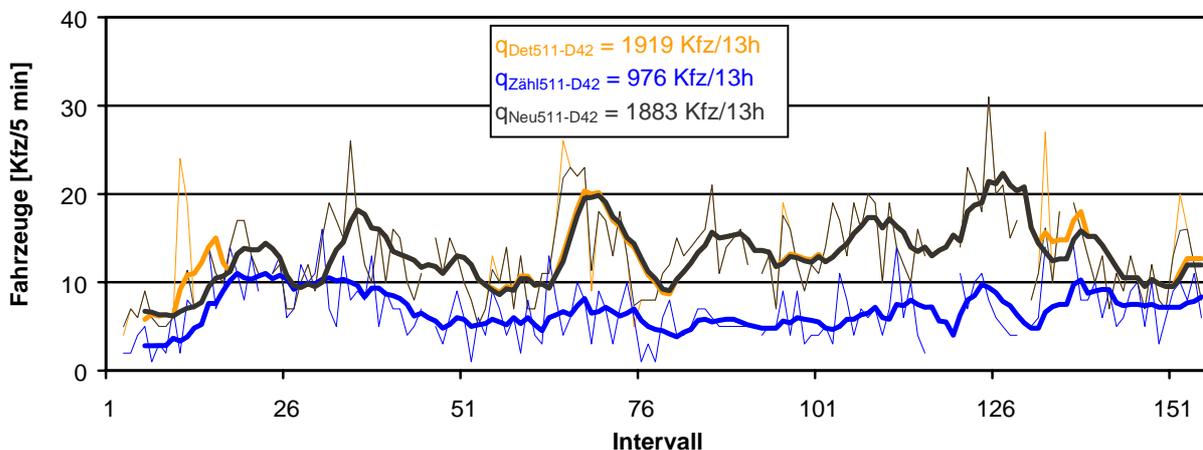
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 93,6 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 3 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 24 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 23 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 70 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: 10,7 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

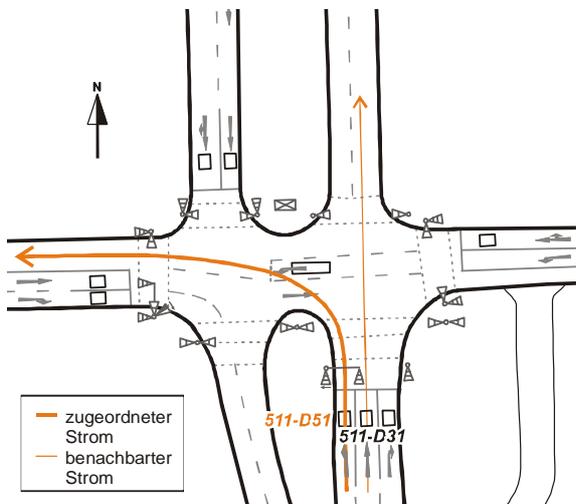
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	943 Kfz	907 Kfz
relative Abweichung	96,6 %	92,9 %
Korrelationskoeffizient	0,26	0,25
WMQF	8,42	8,03
WMQFP	1,25	1,18

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 66 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 2,25 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 316 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

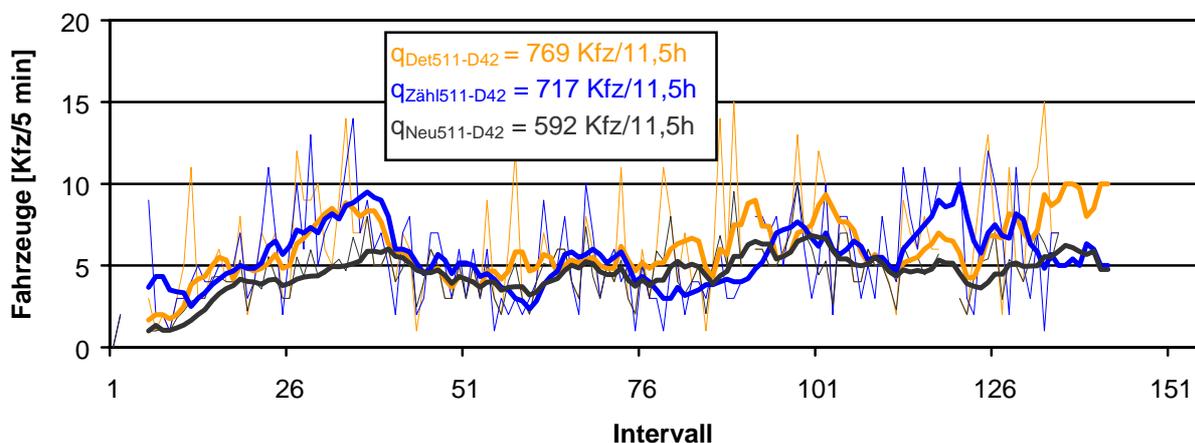
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 86,5 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 19 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 24 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 10 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 8 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

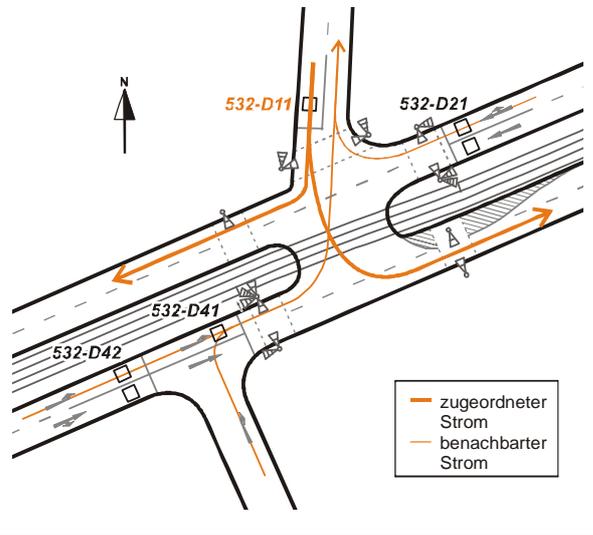
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	52 Kfz	-125 Kfz
relative Abweichung	7,3 %	-17,4 %
Korrelationskoeffizient	0,37	0,51
WMQF	3,42	2,67
WMQFP	0,62	0,48

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Anforderung
- Verkehrsstärke: 71 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 149 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

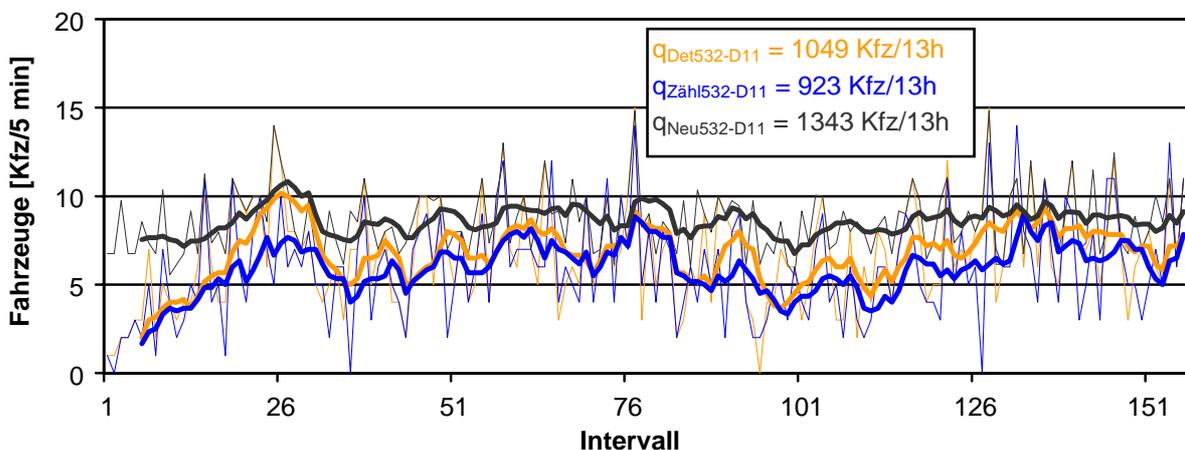
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 100 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: -
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 6 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 0 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: der Strom wird vollständig gezählt
 - Fehlertyp 4: 12,7 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

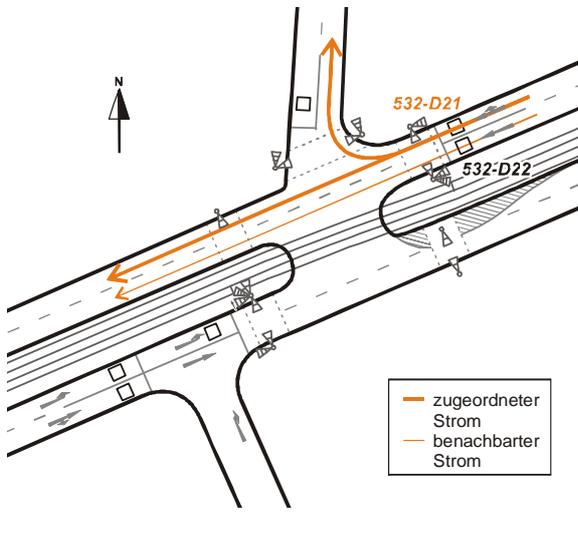
Analyse der Datenverbesserung

	Original-daten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	126 Kfz	420 Kfz
relative Abweichung	13,65 %	45,68 %
Korrelationskoeffizient	0,75	0,60
WMQF	2,23	3,57
WMQFP	0,38	0,60

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 105 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 592 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

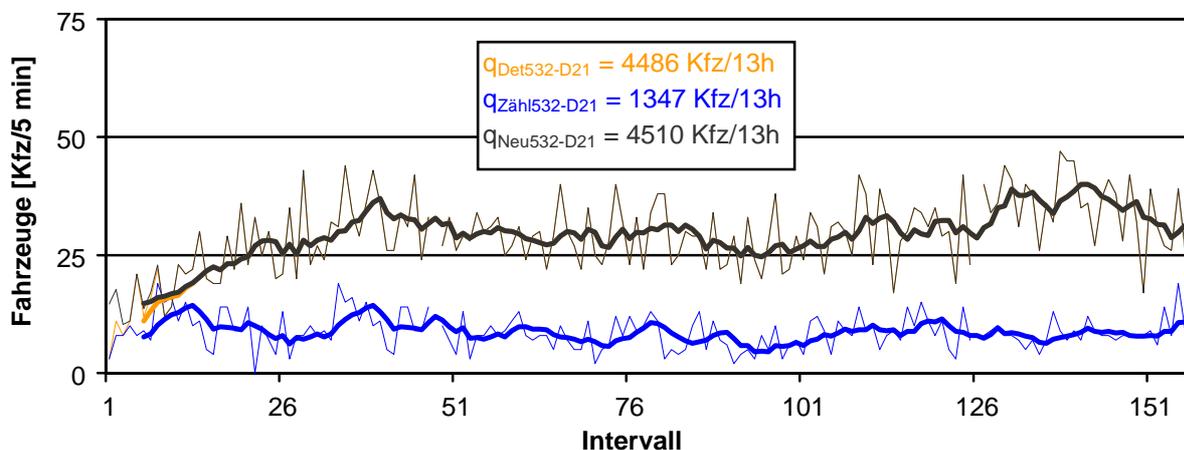
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 100 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: -
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 6 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 53 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden nicht mitgezählt
 - Fehlertyp 3: 57 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: 40 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

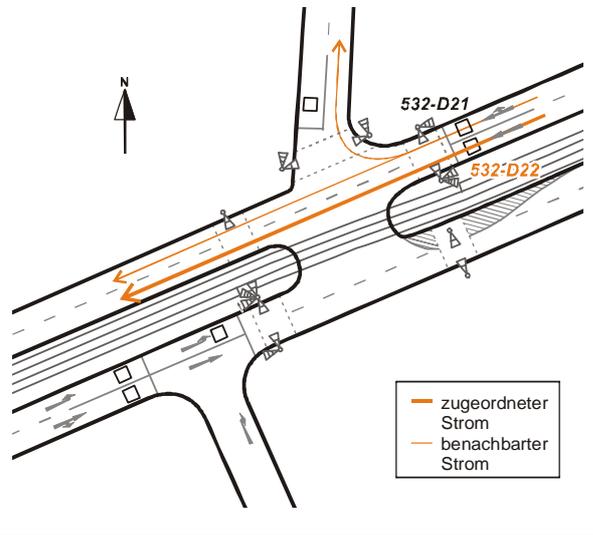
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	3139 Kfz	3163 Kfz
relative Abweichung	233 %	234,8 %
Korrelationskoeffizient	0,14	0,14
WMQF	22,02	22,6
WMQFP	2,51	2,52

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 592 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 105 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

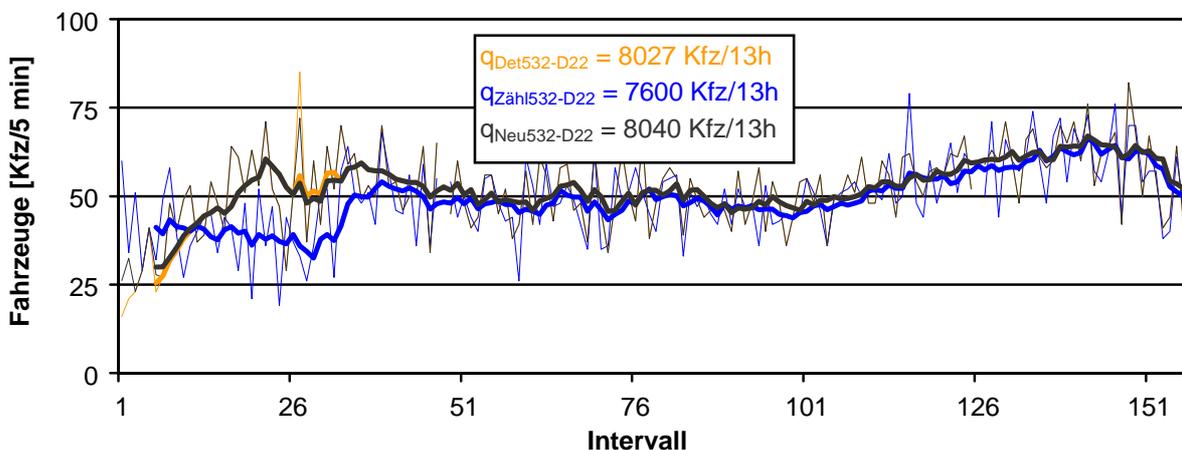
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 100 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: -
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 6 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 13 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden eventuell mitgezählt
 - Fehlertyp 3: der Strom wird vollständig gezählt
 - Fehlertyp 4: 3,2 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

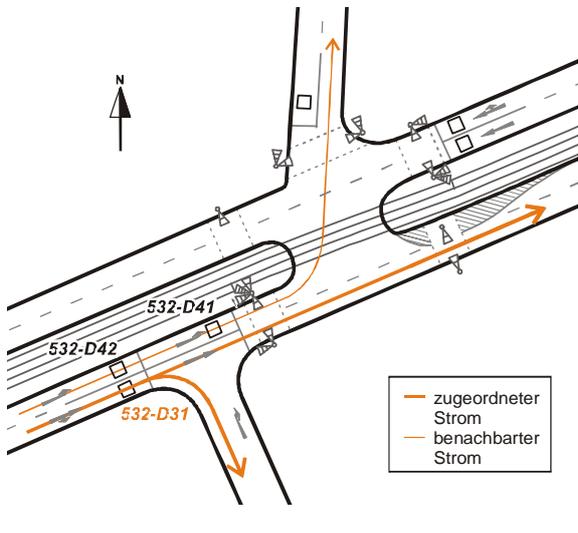
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	427 Kfz	440 Kfz
relative Abweichung	6 %	6 %
Korrelationskoeffizient	0,48	0,51
WMQF	11,89	11,27
WMQFP	0,23	0,22

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 653 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 42 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

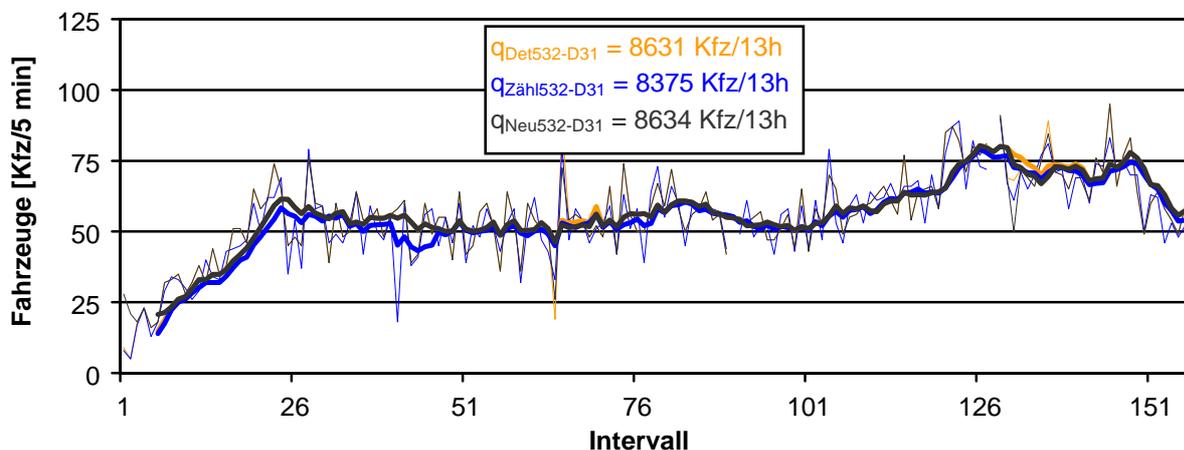
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 100 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: -
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 6 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 33 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden nicht mitgezählt
 - Fehlertyp 3: der Strom wird vollständig gezählt
 - Fehlertyp 4: 0,9 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

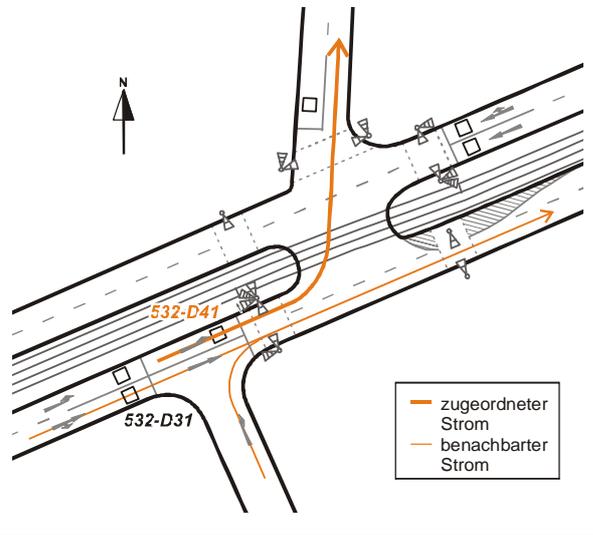
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	256 Kfz	259 Kfz
relative Abweichung	3 %	3 %
Korrelationskoeffizient	0,91	0,90
WMQF	6,71	6,94
WMQFP	0,12	0,12

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Anforderung und Bemessung
- Verkehrsstärke: 44 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 653 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

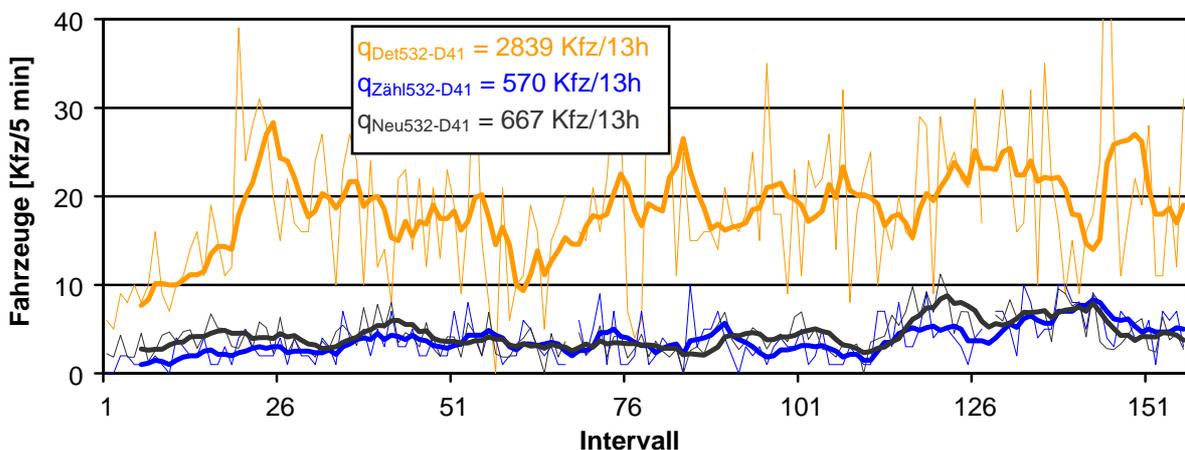
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 99 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 1 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 6 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 33 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden eventuell mitgezählt
 - Fehlertyp 3: 80 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

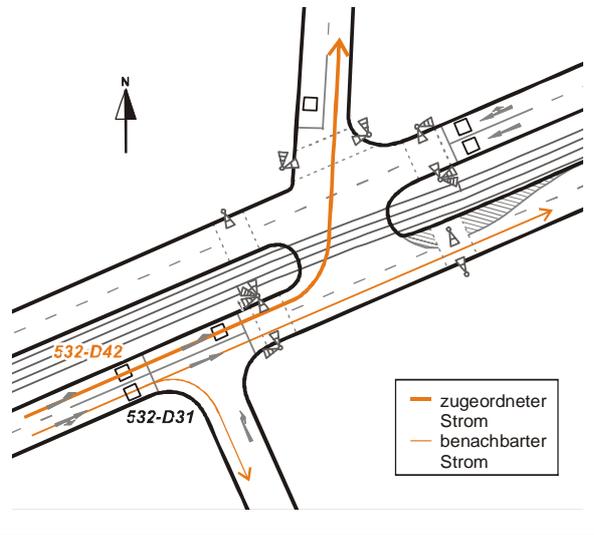
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	2269 Kfz	97 Kfz
relative Abweichung	398 %	17 %
Korrelationskoeffizient	0,03	0,52
WMQF	17,12	2,32
WMQFP	4,61	0,62

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Anforderung und Bemessung
- Verkehrsstärke: 42 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 653 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

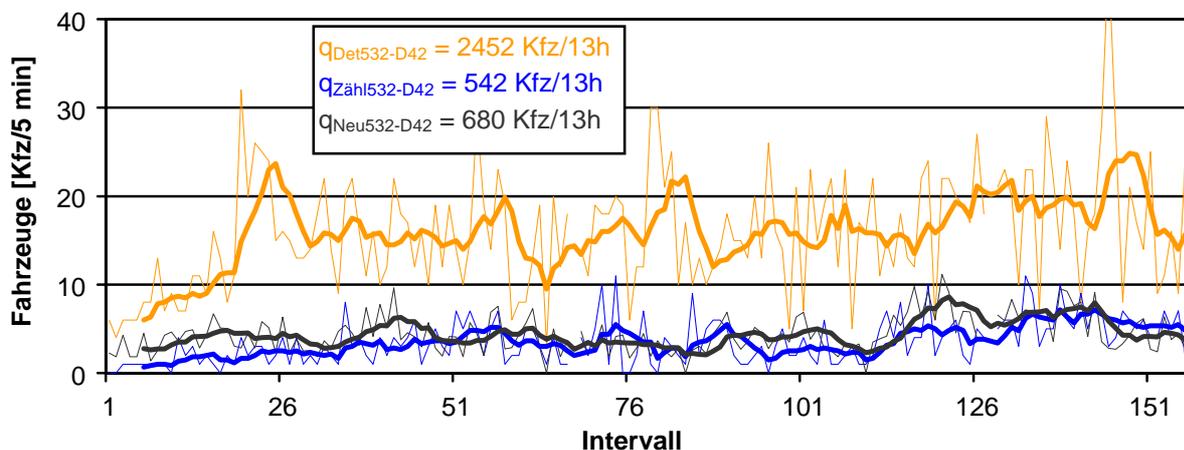
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 99 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 1 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 6 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 30 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden eventuell mitgezählt
 - Fehlertyp 3: 90 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

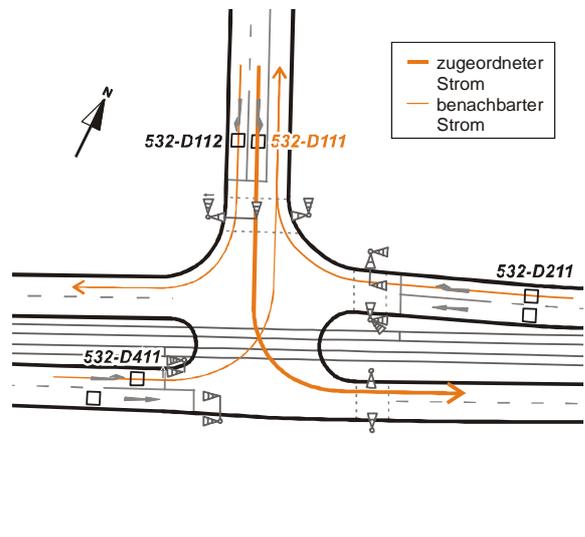
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	1910 Kfz	138 Kfz
relative Abweichung	352 %	25 %
Korrelationskoeffizient	0,18	0,46
WMQF	14,13	2,60
WMQFP	4,00	0,73

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 5 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Anforderung und Bemessung
- Verkehrsstärke: 45 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 2
- Verkehrsstärke auf den benachbarten Fahrstreifen: 22 Kfz/h; 93 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

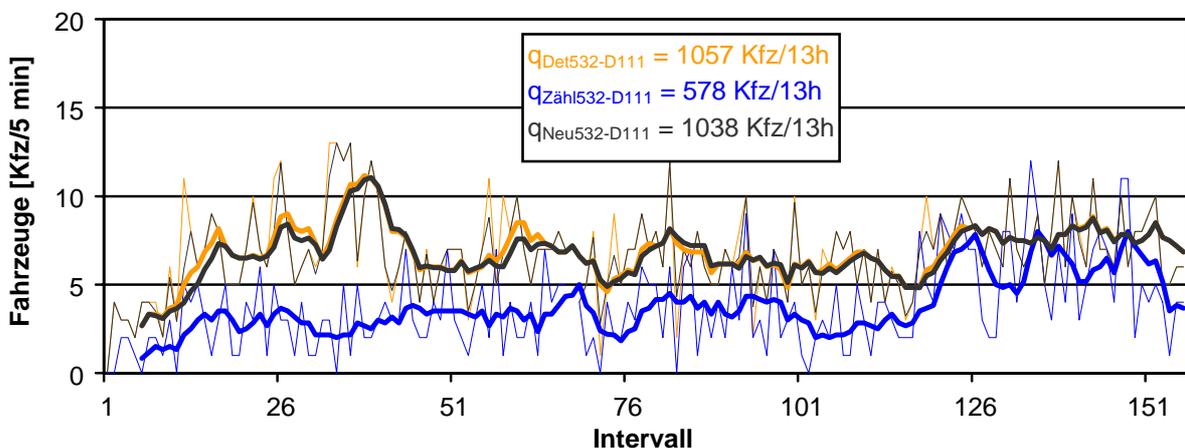
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 99 % korrekt protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 1 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 6 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 51 % / 38 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 52 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: 3,1 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

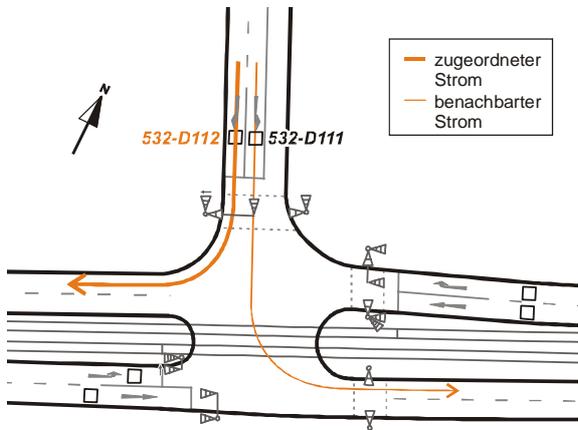
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	479 Kfz	460 Kfz
relative Abweichung	83 %	80 %
Korrelationskoeffizient	0,34	0,36
WMQF	4,21	4,02
WMQFP	1,23	0,94

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 5 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Anforderung und Bemessung
- Verkehrsstärke: 22 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 45 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

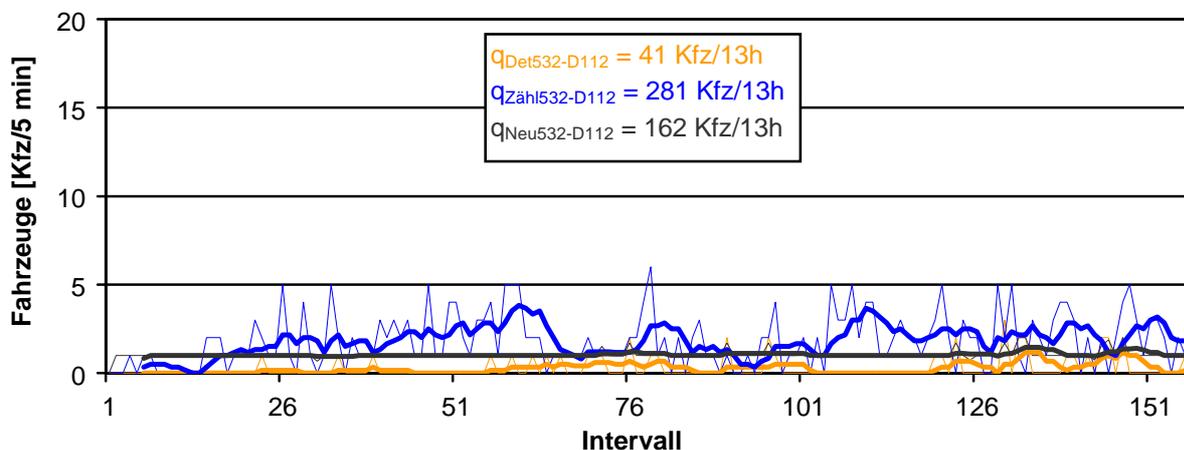
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 99 % korrekt protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 1 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 6 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 0 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: der Strom wird vollständig gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

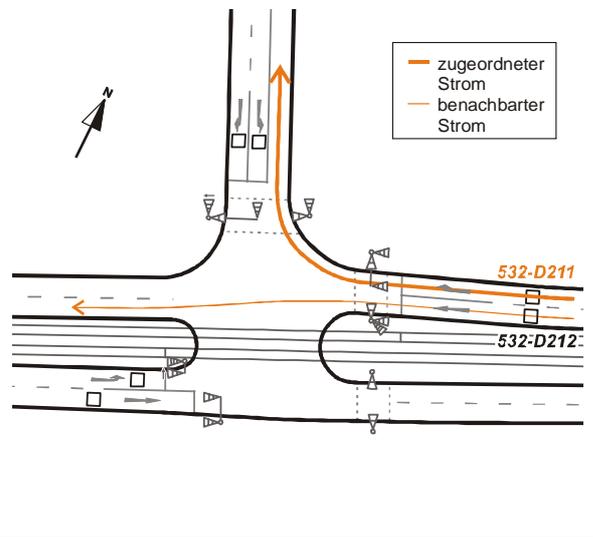
Analyse der Datenverbesserung

	Original-daten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-240 Kfz	-119 Kfz
relative Abweichung	-85 %	-42 %
Korrelationskoeffizient	0,04	-0,02
WMQF	2,23	1,72
WMQFP	1,23	0,94

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 20 m
- Länge: 2 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 47 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 638 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

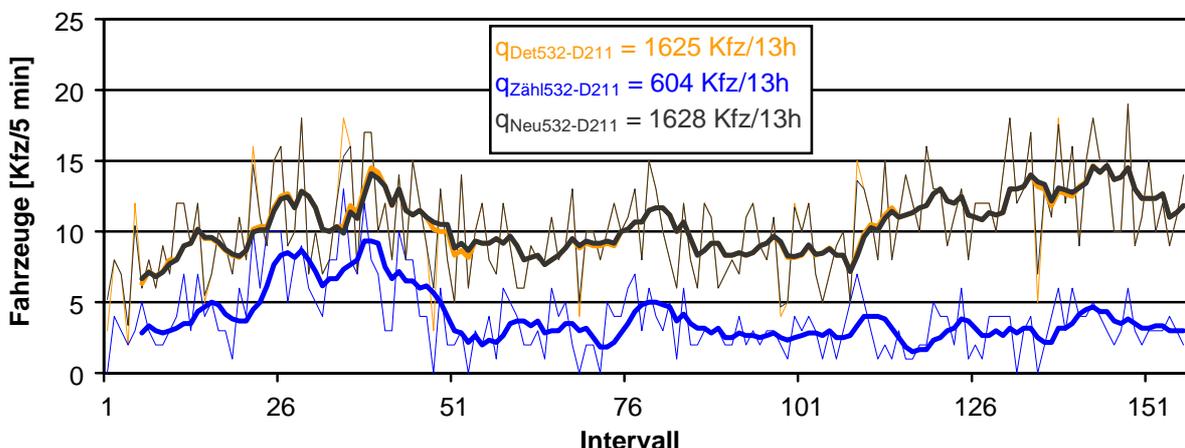
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 100 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: -
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 6 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 11 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden nicht mitgezählt
 - Fehlertyp 3: der Strom wird vollständig gezählt
 - Fehlertyp 4: 7,4 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

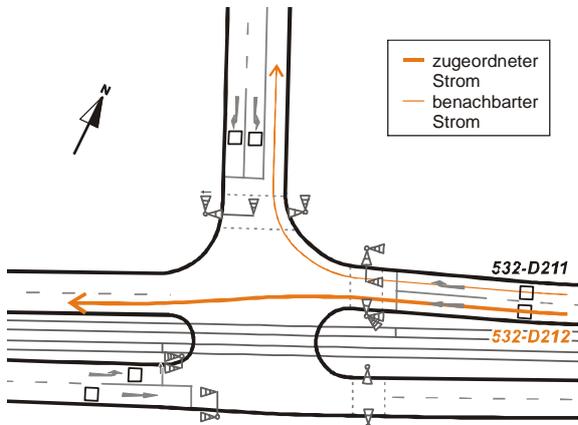
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	1021 Kfz	1024 Kfz
relative Abweichung	169 %	170 %
Korrelationskoeffizient	0,49	0,47
WMQF	7,25	7,25
WMQFP	1,87	1,86

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 20 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 638 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 47 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

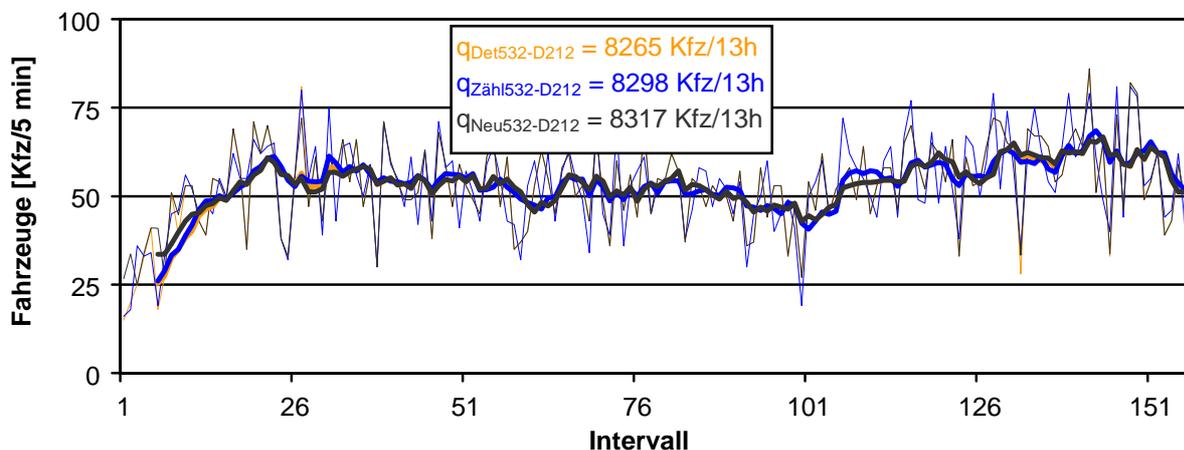
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 100 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: -
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 6 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 19 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden nicht mitgezählt
 - Fehlertyp 3: der Strom wird vollständig gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

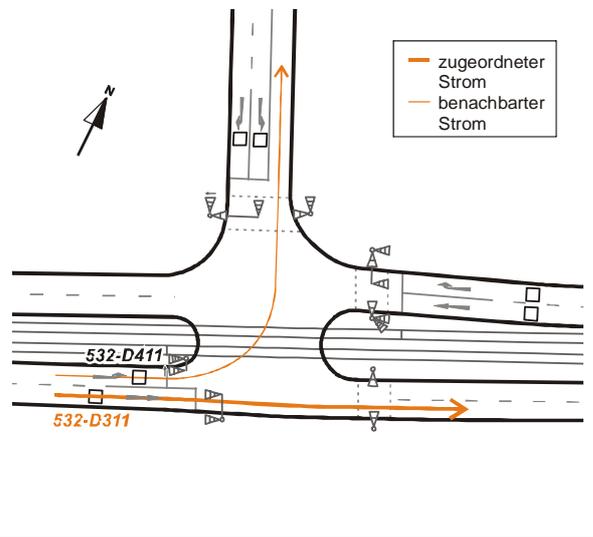
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-33 Kfz	19 Kfz
relative Abweichung	0 %	0 %
Korrelationskoeffizient	0,83	0,80
WMQF	7,54	7,87
WMQFP	0,14	0,15

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 15 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 646 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 46 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

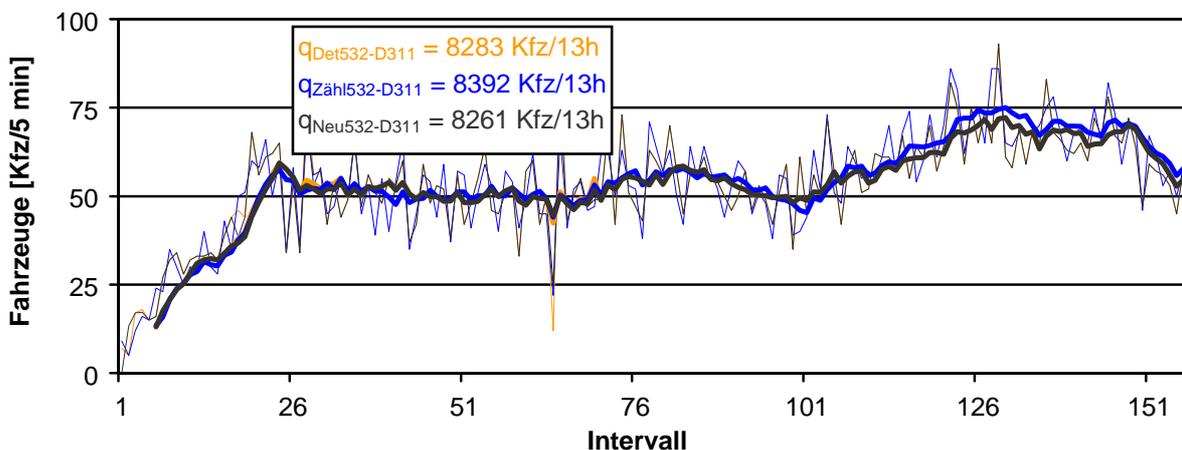
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 100 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: -
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 6 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 2 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden nicht mitgezählt
 - Fehlertyp 3: 3 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: 1,6 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

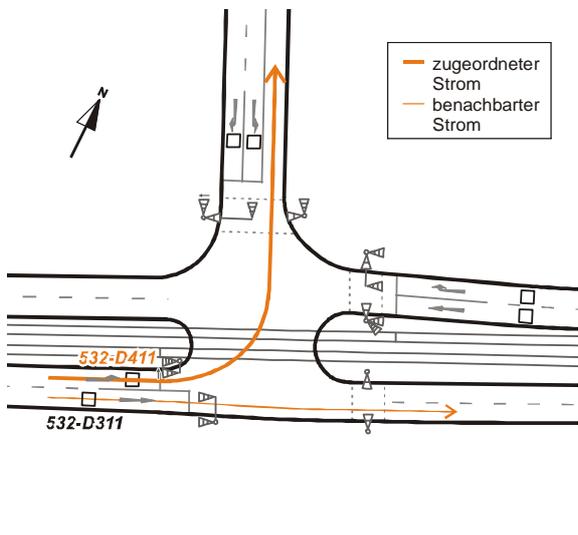
Analyse der Datenverbesserung

	Original-daten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-109 Kfz	-131 Kfz
relative Abweichung	-1 %	-2 %
Korrelationskoeffizient	0,92	0,91
WMQF	6,21	6,34
WMQFP	0,12	0,12

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 5 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Anforderung und Bemessung
- Verkehrsstärke: 46 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 646 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

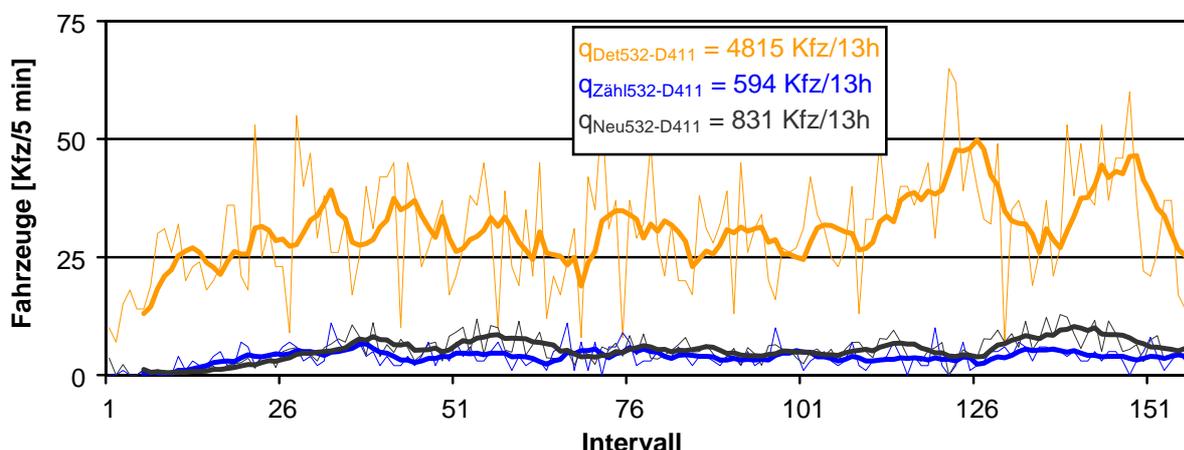
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 100 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: -
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 6 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 58 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden teilweise mitgezählt
 - Fehlertyp 3: 100 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

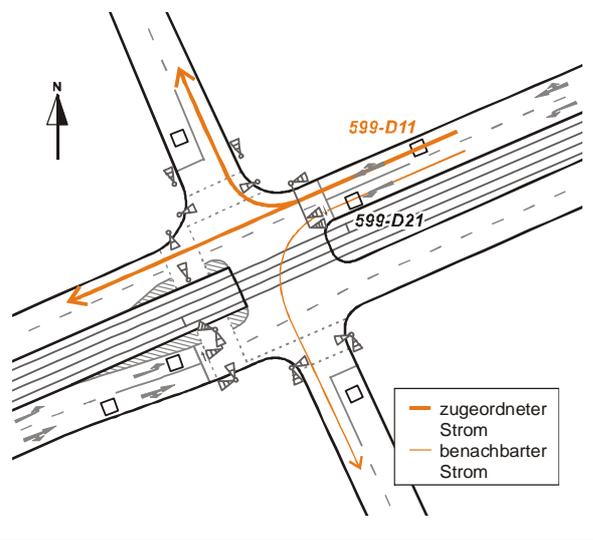
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	4221 Kfz	237 Kfz
relative Abweichung	711 %	40 %
Korrelationskoeffizient	-0,19	0,43
WMQF	29,81	3,19
WMQFP	7,80	0,83

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 15 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 690 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 67 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

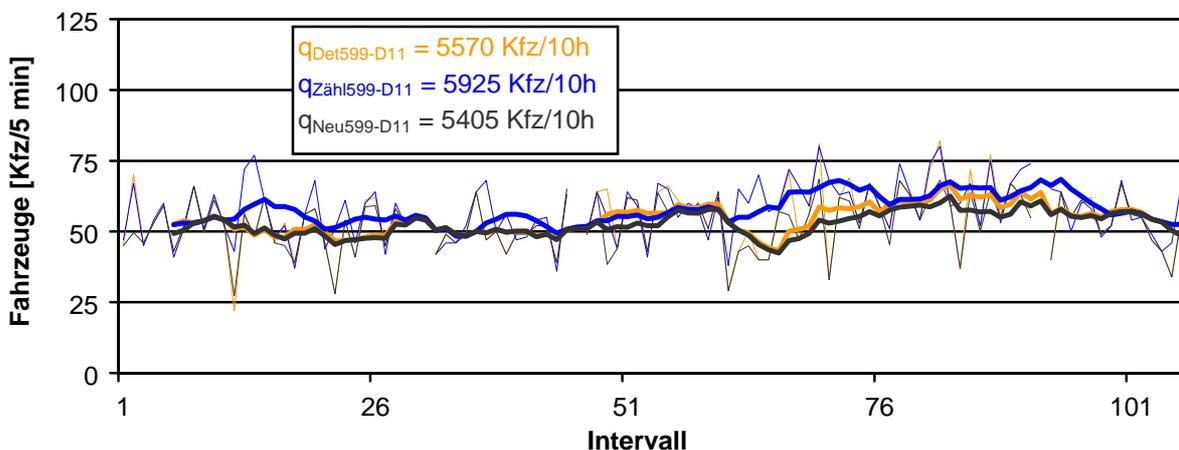
Analyse der Datenqualität

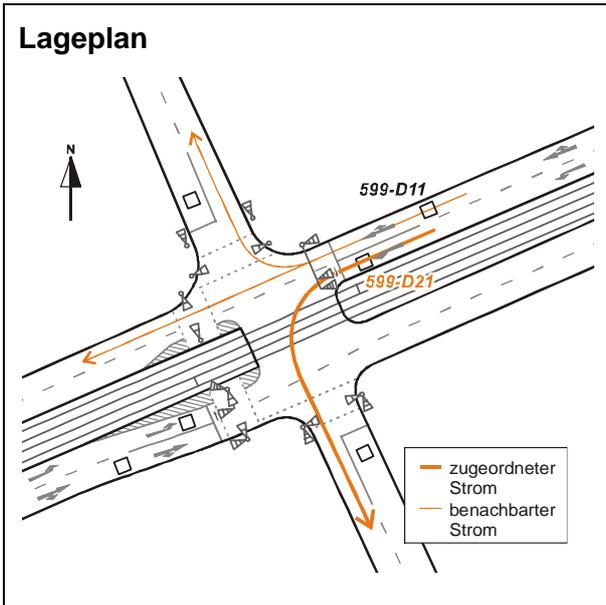
- Zuverlässigkeit:
 - 99 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 1 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 2 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 5 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden nicht mitgezählt
 - Fehlertyp 3: 2 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: 0,3 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

Analyse der Datenverbesserung

	Original-daten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-355 Kfz	-520 Kfz
relative Abweichung	-6 %	-9 %
Korrelationskoeffizient	0,68	0,62
WMQF	9,12	9,84
WMQFP	0,16	0,17

Ganglinienvergleich





Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Anforderung und Bemessung
- Verkehrsstärke: 67 Kfz/h
- Lkw-Anteil: nicht erhoben
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 690 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

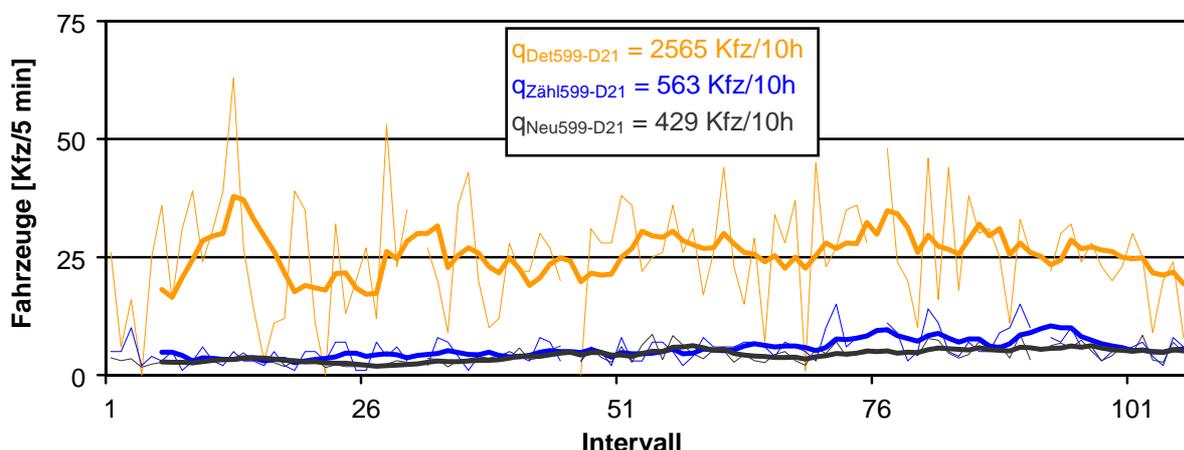
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 99 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 1 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 2 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 56 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden teilweise mitgezählt
 - Fehlertyp 3: 70 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

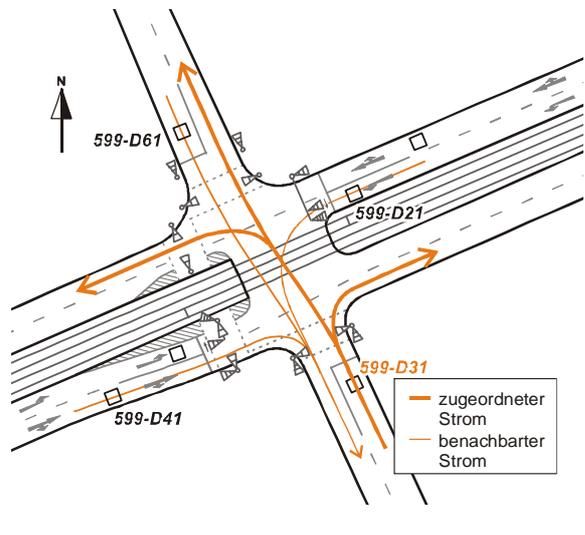
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	2002 Kfz	-134 Kfz
relative Abweichung	356 %	-24 %
Korrelationskoeffizient	0,09	0,47
WMQF	22,94	2,88
WMQFP	4,16	0,52

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Anforderung und Bemessung
- Verkehrsstärke: 44 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 1,86 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 87 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

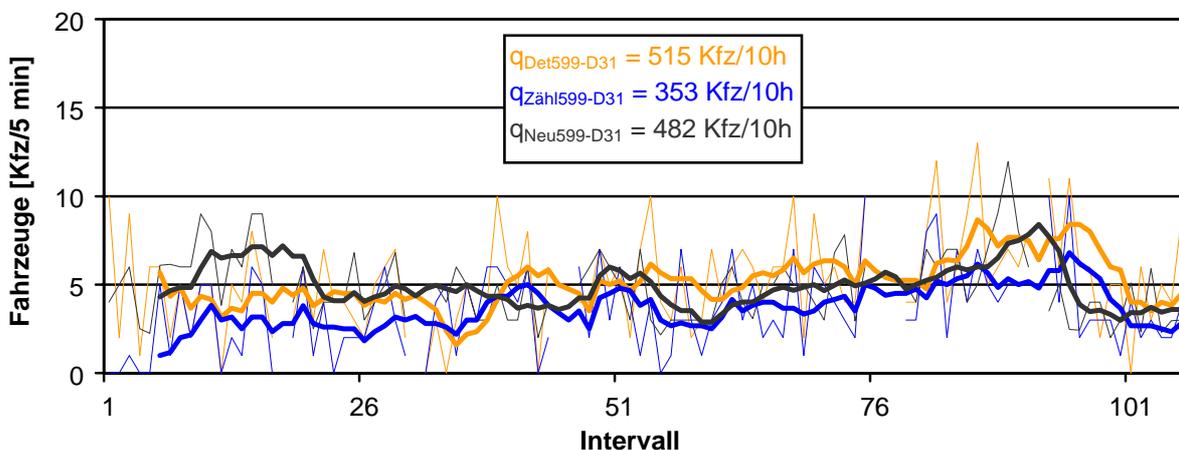
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 99 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 1 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 2 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 14 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: der Strom wird vollständig gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

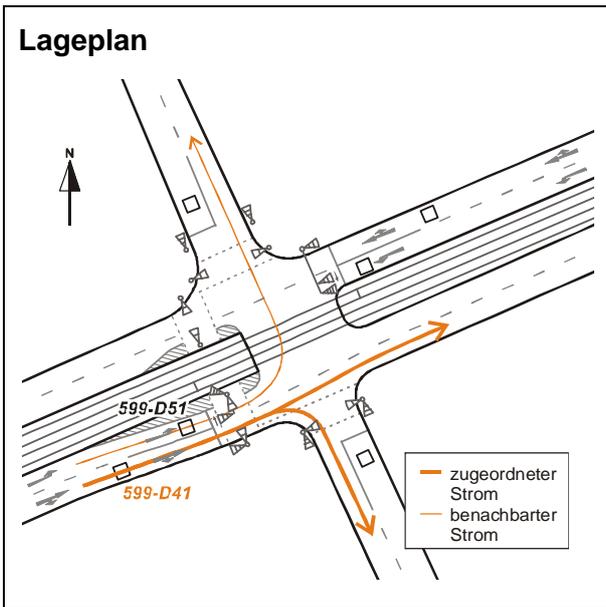
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	162 Kfz	129 Kfz
relative Abweichung	46 %	37 %
Korrelationskoeffizient	0,61	0,26
WMQF	2,81	2,96
WMQFP	0,79	0,83

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 15 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Bemessung
- Verkehrsstärke: 714 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 2,64 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 35 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

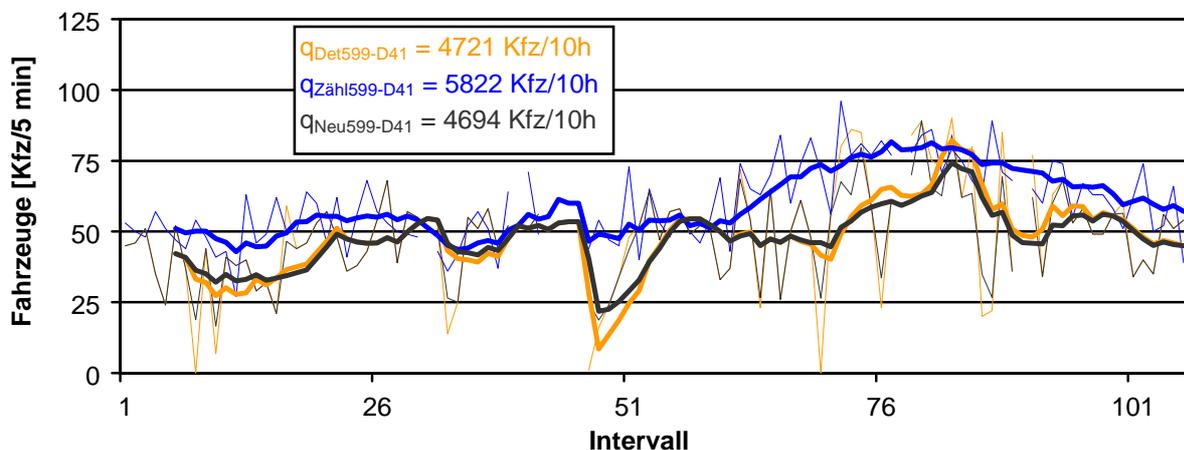
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 99 % protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 1 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 2 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 99 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 10 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: 1,9 % nicht vorhandene Fahrzeuge werden gezählt

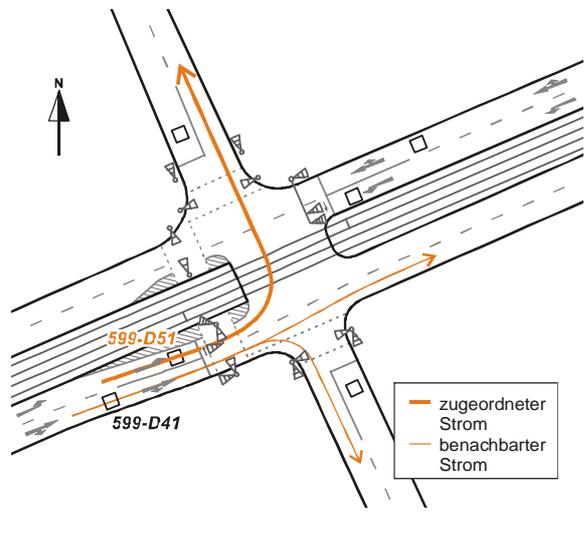
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	-1101 Kfz	-1128 Kfz
relative Abweichung	-19 %	-19 %
Korrelationskoeffizient	0,39	0,40
WMQF	21,86	19,46
WMQFP	0,37	0,33

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Anforderung und Bemessung
- Verkehrsstärke: 35 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 0 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 714 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: ja

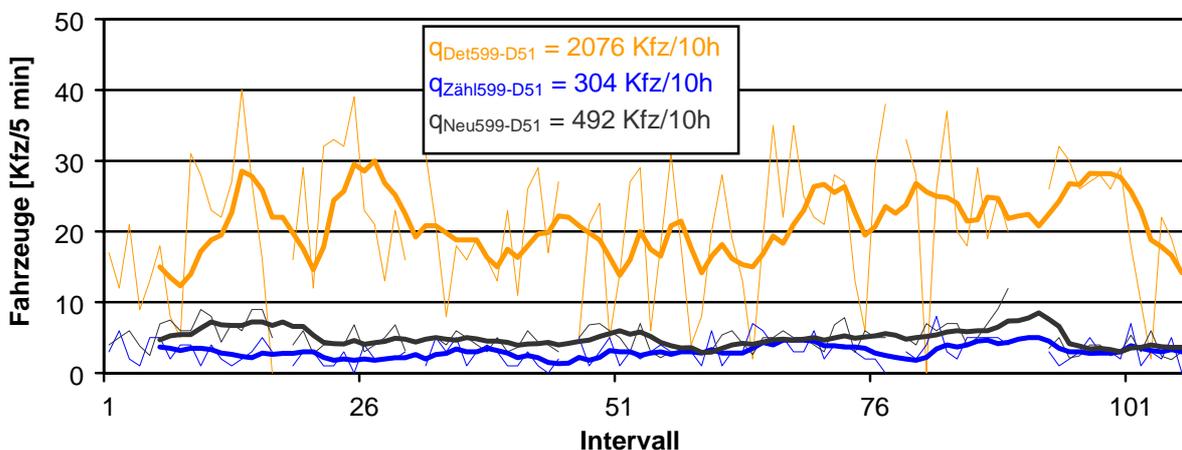
Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 99 % korrekt protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 1 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 2 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 51 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: Straßenbahnfahrzeuge werden teilweise mitgezählt
 - Fehlertyp 3: 99 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

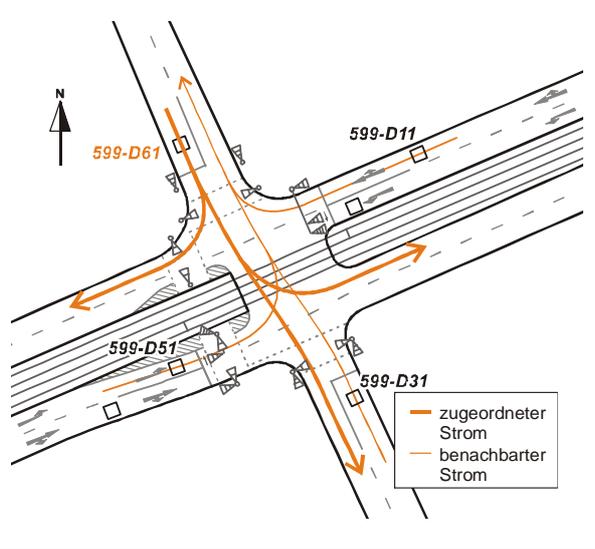
Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	1772 Kfz	188 Kfz
relative Abweichung	583 %	62 %
Korrelationskoeffizient	-0,20	0,10
WMQF	20,20	3,04
WMQFP	6,64	1,00

Ganglinienvergleich



Lageplan



Allgemeine Informationen

- Abstand von der Haltelinie: 3 m
- Länge: 3 m
- Funktion: Anforderung und Bemessung
- Verkehrsstärke: 42 Kfz/h
- Lkw-Anteil: 0,86 %
- Anzahl benachbarter Fahrstreifen: 1
- Verkehrsstärke auf dem benachbarten Fahrstreifen: 66 Kfz/h
- Straßenbahn in weniger als 10 m Entfernung: nein

Analyse der Datenqualität

- Zuverlässigkeit:
 - 99 % korrekt protokollierte Intervalle
 - längster fehlender Datensatz: 1 Int.
 - Variation der Länge der Aggregationsintervalle: 2 s
- Genauigkeit:
 - Fehlertyp 1: 14 % der Nachbarströme werden mitgezählt
 - Fehlertyp 2: keine Straßenbahn in der Nähe
 - Fehlertyp 3: 4 % des Stroms werden nicht gezählt
 - Fehlertyp 4: es werden keine nicht vorhandenen Fahrzeuge gezählt

Analyse der Datenverbesserung

	Originaldaten	bearbeitete Daten
absolute Abweichung	134 Kfz	144 Kfz
relative Abweichung	38 %	41 %
Korrelationskoeffizient	0,42	0,47
WMQF	2,77	2,34
WMQFP	0,79	0,66

Ganglinienvergleich

