



Dynamische Verkehrslage- analyse auf der Grundlage von gemittelten lokalen und streckenbezogenen Verkehrsdaten

Philipp Böhnke

Berichte aus dem DLR-Institut
für Verkehrssystemtechnik

Band 22



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Dynamische Verkehrslageanalyse auf der Grundlage von gemittelten lokalen und streckenbezogenen Verkehrsdaten

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart zur
Erlangung der Würde eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Philipp Lambert Böhnke
aus Aachen

Hauptberichter: Prof. Dr. Reinhart Kühne

Mitberichter: Prof. Dr. Peter Vortisch

Tag der mündlichen Prüfung: 07.05.2013

Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart

2013

Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik

Band 22

**Dynamische Verkehrslageanalyse
auf der Grundlage von gemittelten lokalen und
streckenbezogenen Verkehrsdaten**

Philipp Böhnke

Herausgeber:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Verkehrssystemtechnik
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

ISSN 1866-721X

DLR-TS 1.22

Braunschweig, im November 2013

Institutsdirektor:
Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Verfasser:
Dipl.-Ing. Philipp Böhnke

Vorwort des Herausgebers

Liebe Leserinnen und Leser,

In Ihren Händen halten Sie einen Band unserer Buchreihe „Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“. In dieser Reihe veröffentlichen wir spannende, wissenschaftliche Themen aus dem Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und aus seinem Umfeld. Einen Teil der Auflage stellen wir Bibliotheken und Fachbibliotheken für ihren Buchbestand zur Verfügung. Herausragende wissenschaftliche Arbeiten und Dissertationen finden hier ebenso Platz wie Projektberichte und Beiträge zu Tagungen in unserem Hause von verschiedenen Referenten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik.

Mit dieser Veröffentlichungsreihe verfolgen wir das Ziel, einen weiteren Zugang zu wissenschaftlichen Arbeiten und Ergebnissen zu ermöglichen. Wir nutzen die Reihe auch als praktische Nachwuchsförderung durch die Publikation der wissenschaftlichen Ergebnisse von Dissertationen unserer Mitarbeiter und auch externer Doktoranden. Veröffentlichungen sind wichtige Meilensteine auf dem akademischen Berufsweg. Mit der Reihe „Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“ erweitern wir das Spektrum der möglichen Publikationen um einen Baustein. Darüber hinaus verstehen wir die Kommunikation unserer Forschungsthemen als Beitrag zur nationalen und internationalen Forschungslandschaft auf den Gebieten Automotive, Bahnsysteme und Verkehrsmanagement.

Die vorliegende Dissertation unserer Buchreihe stellt zwei Verfahren vor, die eine dynamische Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose sowie eine ebenfalls dynamische Staulängenberechnung für den Autobahnverkehr ermöglichen. Grundlage der Verfahren ist die neu eingeführte Verkehrsgröße „charakteristische Zeitlücke“, die sich im Störfall mit Rückstauung am Störfallquerschnitt einstellt. Die in dieser Arbeit entwickelten Verfahren liefern eine fundierte Grundlage für eine verbesserte und vor allem aktuelle Verkehrslageinformation auf Autobahnen. Des Weiteren liefert diese Ausgabe einen wichtigen Beitrag zur Verkehrssicherheit, -qualität und Energieeffizienz, indem mit den beiden entwickelten Verfahren die Entwicklung neuer, innovativer Verkehrsbeeinflussungsstrategien ermöglicht wird.

Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Vorwort des Autors

Dank wem Dank gebührt!

An dieser Stelle sei all denen recht herzlich gedankt, die zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

Namentlich herausheben möchte ich meinen Doktorvater Herrn Prof. Dr. Reinhart Kühne für sein Vertrauen und seine Unterstützung nicht nur bei der Entstehung dieser Arbeit sowie Herrn Prof. Dr. Peter Vortisch für die anregenden Gespräche sowie die Übernahme des Koreferats. Herrn Prof. Dr. Christian Moormann danke ich für den Vorsitz in der Prüfungskommission.

Weiterhin bin ich Herrn Eike Bretschneider, verantwortlicher Abteilungs- und stellvertretender Institutsleiter, dankbar für seine Förderung sowie nicht zuletzt Herrn Prof. Dr. Karsten Lemmer, Institutsleiter des DLR Instituts Verkehrssystemtechnik, für das Angebot die Arbeit in der Institutsschriftenreihe zu veröffentlichen.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich während der Höhen und Tiefen in der Entstehungsphase dieser Arbeit stets unterstützt und ermutigt hat.

Philipp Böhnke

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers	iii
Vorwort des Autors	v
Abbildungsverzeichnis	xi
Kurzfassung	xv
Abstract	xvii
1 Einleitung und Übersicht	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Aufgabenstellung.....	2
1.3 Methodik und Gliederung der Arbeit	2
2 Grundlagen	5
2.1 Weg-Zeit-Diagramm	5
2.2 Mikroskopische und makroskopische Verkehrsflussanalyse.....	6
2.3 Makroskopische lokale und streckenbezogene Verkehrsgrößen.....	7
2.4 Messung vs. Modellierung von Verkehrsgrößen	8
2.5 Das Fundamentaldiagramm – ein Verkehrsmodell	8
2.6 Störfall und Stauung	10
2.7 Datenbasis	10
2.8 Zusammenfassung „Grundlagen“	12
3 Stand der Technik	13
3.1 Vorgehensweise Stand der Technik.....	13
3.2 Stand der Technik – Messverfahren für die Verkehrsdatenerhebung.....	13
3.3 Stand der Technik – kurzfristige Prognoseverfahren	17
3.4 Zusammenfassung „Stand der Technik“	19
4 Störfallanalyse	21
4.1 Vorgehensweise Störfallanalyse	21
4.2 Störfallanalyse auf Betrachtungsabschnittsebene	21
4.2.1 Störfall entsteht im stromabwärts liegenden Abschnitt.....	22
4.2.2 Störfall entsteht im Betrachtungsabschnitt	23
4.2.3 Störfall entsteht im stromaufwärts liegenden Abschnitt.....	25
4.3 Störfallanalyse auf Teilabschnittsebene	26

4.3.1	Eingeschwungene Verkehrszustände und Übergangszustände	27
4.3.2	1-Bereichsmodell	27
4.3.3	2-Bereichsmodell	28
4.3.4	3-Bereichsmodell	29
4.4	Zusammenfassung „Störfallanalyse“	30
5	Ausgesuchte Störfallsituationen.....	33
5.1	Vorgehensweise – Ausgesuchte Störfallsituationen	33
5.2	Ausgesuchte Störfälle – Störfall entsteht im stromabwärts liegenden Abschnitt.....	34
5.2.1	Rückstauwelle kommt im Betrachtungsabschnitt zum Stillstand (Beispiel 1.1).....	35
5.2.2	Rückstauwelle durchläuft den Betrachtungsabschnitt (Beispiel 1.2).....	38
5.2.3	Störung des Verkehrsflusses im gesamten Betrachtungsabschnitt (Beispiel 1.3).....	41
5.3	Ausgesuchte Störfälle – Störfall entsteht im Betrachtungsabschnitt	43
5.3.1	Störfall manifestiert sich weder am Ein- noch am Ausgangsquerschnitt (Beispiel 2.1).....	44
5.3.2	Störfall manifestiert sich nach längerer Zeit am Eingangsquerschnitt (Beispiel 2.2).....	46
5.3.3	Störfall manifestiert sich nach kurzer Zeit am Eingangsquerschnitt (Beispiel 2.3).....	49
5.4	Ausgesuchte Störfälle – Störfallursache wandert stromabwärts in den Betrachtungsabschnitt.....	51
5.4.1	Störfallursache wandert stromabwärts in den Betrachtungsabschnitt (Beispiel 3.1).....	52
5.5	Zusammenfassung „Ausgesuchte Störfallsituationen“	54
6	Charakteristische Zeitlücke t_{ch}.....	55
6.1	Ausgangslage	55
6.2	Herleitung der charakteristischen Zeitlücke t_{ch}	55
6.3	Überprüfung der charakteristischen Zeitlücke	57
6.4	Veranschaulichungsbeispiel Trichter.....	61
6.5	Zusammenfassung „Charakteristische Zeitlücke t_{ch} “	62
7	Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren – Theorie	65
7.1	Vorgehensweise und Aufbau.....	65
7.2	Fallunterscheidung über Indikatoren und Schwellwerte.....	66
7.3	Verkehrsmodell A und B.....	69
7.4	Das Basisverfahren (Prognose I)	70

7.5	Das Extrapolationsverfahren	72
7.6	Optimiertes Verfahren zur Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose (Prognose II)	73
7.7	Zusammenfassung „Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren – Theorie“	74
8	Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren – Überprüfung	75
8.1	Vorgehensweise – Überprüfung der Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren	75
8.2	Störfallursache im stromabwärts liegenden Abschnitt	76
8.3	Störfallursache im Betrachtungsabschnitt.....	83
8.4	Störfallursache im stromaufwärts liegenden Abschnitt	88
8.5	Betrachtung und Bewertung der Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren	90
8.5.1	Generelle Einsatzfähigkeit des Basisprognoseverfahrens	90
8.5.2	Generelle Einsatzfähigkeit des optimierten Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahrens	92
8.5.3	Bewertung der Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren	92
8.6	Zusammenfassung „Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren – Überprüfung“	95
9	Staulängenberechnungsverfahren – Theorie	97
9.1	Vorgehensweise und Aufbau.....	97
9.2	Verkehrsmodell S	99
9.3	Folgerungen aus den getroffenen Annahmen	100
9.4	Fundamentaldiagramm – Dreiecksfunktion	103
9.5	Dreiecksfunktion – horizontaler Phasensprung	107
9.6	Ermittlung der Staulängen	108
9.7	Ermittlung von K_1 und K_2	110
9.7.1	K_1 und K_2 über lokale Messwerte und Extrapolation	110
9.7.2	K_1 und K_2 über streckenbezogene Messung und Dreiecksfunktion.....	111
9.8	Fallunterscheidung nach Störfallsituation	113
9.9	Grenzen der Dreiecksfunktion	114
9.10	Zusammenfassung „Beitrag zur Staulängenberechnung – Theorie“	116
10	Staulängenberechnungsverfahren – Überprüfung	117
10.1	Vorgehensweise – Überprüfung des Staulängenberechnungsverfahrens.....	117
10.2	Störfallursache im stromabwärts liegenden Abschnitt	118
10.3	Störfallursache liegt im Betrachtungsabschnitt	126

10.4 Störfallursache im stromaufwärts liegenden Abschnitt	134
10.5 Betrachtung und Bewertung des „Staulängenberechnungsverfahrens“	136
10.5.1 Generelle Einsatzfähigkeit des Staulängenberechnungsverfahrens	137
10.5.2 Bewertung des Staulängenberechnungsverfahrens.....	139
10.6 Zusammenfassung „Staulängenberechnung – Überprüfung“	140
11 Zusammenfassung und Ausblick	143
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	147
Literaturverzeichnis.....	149

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Weg-Zeit-Diagramm.....	5
Abbildung 2-2:	Übersicht – Stauung und Stauende.....	10
Abbildung 2-3:	Schematische Abbildung - Betrachtungsabschnitt.....	11
Abbildung 3-1:	Baumdiagramm - Messverfahren.....	14
Abbildung 3-2:	Baumdiagramm – kurzfristige Prognoseverfahren.....	17
Abbildung 4-1:	Schematische Darstellung – Störfall entsteht im stromabwärts liegenden Abschnitt.....	22
Abbildung 4-2:	Schematische Darstellung – Störfall entsteht im Betrachtungsabschnitt (Stau manifestiert sich am Eingangsquerschnitt).....	23
Abbildung 4-3:	Schematische Darstellung – Störfall entsteht im Betrachtungsabschnitt (Stau manifestiert sich am Ausgangsquerschnitt).....	24
Abbildung 4-4:	Schematische Darstellung – Störfall entsteht im Betrachtungsabschnitt (Stau manifestiert sich weder am Ein- noch am Ausgangsquerschnitt)....	25
Abbildung 4-5:	Schematische Darstellung – Störfallursache im stromaufwärts liegenden Abschnitt.....	26
Abbildung 4-6:	Schematische Darstellung des 1-Bereichsmodells.....	28
Abbildung 4-7:	Schematische Darstellung des 2-Bereichsmodells.....	29
Abbildung 4-8:	Schematische Darstellung des 3-Bereichsmodells.....	30
Abbildung 4-9:	Lagebetrachtung der Störfälle (Betrachtungsabschnittsebene).....	30
Abbildung 4-10:	Lagebetrachtung der Störfälle (Teilabschnittsebene).....	31
Abbildung 5-1:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 1.1.....	36
Abbildung 5-2:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 1.1.....	36
Abbildung 5-3:	Ganglinien der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten – Beispiel 1.1.....	36
Abbildung 5-4:	Darstellung der besonderen Witterungsverhältnisse – Beispiel 1.1.....	38
Abbildung 5-5:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 1.2.....	39
Abbildung 5-6:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 1.2.....	39
Abbildung 5-7:	Ganglinien der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten – Beispiel 1.2.....	40

Abbildung 5-8:	Darstellung der besonderen Witterungsverhältnisse – Beispiel 1.2	41
Abbildung 5-9:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 1.3.....	42
Abbildung 5-10:	Ganglinien der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten – Beispiel 1.3	42
Abbildung 5-11:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 2.1.....	45
Abbildung 5-12:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 2.1	45
Abbildung 5-13:	Ganglinien der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten – Beispiel 2.1	45
Abbildung 5-14:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 2.2.....	47
Abbildung 5-15:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 2.2	47
Abbildung 5-16:	Ganglinien der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten – Beispiel 2.2	48
Abbildung 5-17:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 2.3.....	50
Abbildung 5-18:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 2.3	50
Abbildung 5-19:	Ganglinien der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten – Beispiel 2.3	50
Abbildung 5-20:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 3.1.....	52
Abbildung 5-21:	Ganglinien der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten – Beispiel 3.1	53
Abbildung 6-1:	Gegenüberstellung – reale Verkehrsverteilung und Modellannahme	56
Abbildung 6-2:	Verkehrsstärkeganglinien in Abhängigkeit von der räumlichen Lage der Störfallursache	59
Abbildung 6-3:	Vergleich der Verkehrsstärkeganglinien (gemittelt und ungemittelt) am Eingangs- und am Stützquerschnitt	60
Abbildung 6-4:	Veranschaulichungsbeispiel Trichter.....	61
Abbildung 7-1:	Flussdiagramm Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeits- prognoseverfahren.....	66
Abbildung 7-2:	Indikatoren und Schwellwerte zur Abgrenzung der Verkehrszustände....	67
Abbildung 7-3:	Schematische Darstellung – Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren	70

Abbildung 8-1:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (inkl. Prognose) – Beispiel 1.1	77
Abbildung 8-2:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (inkl. Prognose) – Beispiel 1.2	80
Abbildung 8-3:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (inkl. Prognose) – Beispiel 1.3	82
Abbildung 8-4:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (inkl. Prognose) – Beispiel 2.1	84
Abbildung 8-5:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (inkl. Prognose) – Beispiel 2.2	86
Abbildung 8-6:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (inkl. Prognose) – Beispiel 2.3	87
Abbildung 8-7:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (inkl. Prognose) – Beispiel 3.1	89
Abbildung 9-1:	Flussdiagramm Gesamtstaulängenberechnung	98
Abbildung 9-2:	Flussdiagramm Staulage	99
Abbildung 9-3:	Eingeschwungenes 1-Bereichsmodell mit gestörtem Verkehrsablauf (Überstauung des gesamten Betrachtungsabschnitts).....	101
Abbildung 9-4:	Eingeschwungenes 2-Bereichsmodell mit gestörtem Verkehrsablauf (Überstauung MQ_Y).....	101
Abbildung 9-5:	Eingeschwungenes 2-Bereichsmodell mit gestörtem Verkehrsablauf (Überstauung MQ_X).....	101
Abbildung 9-6:	Eingeschwungenes 3-Bereichsmodell mit gestörtem Verkehrsablauf (nicht manifestierte Stauung).....	102
Abbildung 9-7:	Vereinfachung des eingeschwungenen 3- in ein eingeschwungenes 2-Bereichsmodell.....	103
Abbildung 9-8:	Dreiecksfunktion als vereinfachte q-k-Relation	104
Abbildung 9-9:	Horizontaler Phasensprung.....	107
Abbildung 9-10:	Anzahl der Fahrzeuge-Strecke Diagramm	108
Abbildung 9-11:	Herleitung von $K_{\text{frei/gestört}}$ über die Dreiecksfunktion als vereinfachte q-k-Relation.....	112
Abbildung 9-12:	Anpassung der Dreiecksfunktion	115
Abbildung 9-13:	Verschiebung des streckenbezogenen Arbeitspunktes	115
Abbildung 10-1:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 1.1	119
Abbildung 10-2:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 1.1	119
Abbildung 10-3:	Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 125 \text{ km/h}$) – Beispiel 1.1	119
Abbildung 10-4:	Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 100 \text{ km/h}$) – Beispiel 1.1	120

Abbildung 10-5:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 1.2.....	122
Abbildung 10-6:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 1.2.....	122
Abbildung 10-7:	Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 120 \text{ km/h}$) – Beispiel 1.2.....	123
Abbildung 10-8:	Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 100 \text{ km/h}$) – Beispiel 1.2.....	123
Abbildung 10-9:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 1.3.....	125
Abbildung 10-10:	Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 125 \text{ km/h}$) – Beispiel 1.3.....	125
Abbildung 10-11:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 2.1.....	127
Abbildung 10-12:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 2.1.....	127
Abbildung 10-13:	Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 125 \text{ km/h}$) – Beispiel 2.1.....	128
Abbildung 10-14:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 2.2.....	129
Abbildung 10-15:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 2.2.....	129
Abbildung 10-16:	Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 125 \text{ km/h}$) – Beispiel 2.2.....	130
Abbildung 10-17:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 2.3.....	132
Abbildung 10-18:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 2.3.....	132
Abbildung 10-19:	Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 130 \text{ km/h}$) – Beispiel 2.3.....	132
Abbildung 10-20:	Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 100 \text{ km/h}$) – Beispiel 2.3.....	133
Abbildung 10-21:	Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 3.1.....	135
Abbildung 10-22:	Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 100 \text{ km/h}$) – Beispiel 3.1.....	135
Abbildung 10-23:	Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 90 \text{ km/h}$) – Beispiel 3.1.....	135

Kurzfassung

Worum geht es?

Maßgebliche Voraussetzung für die Auswahl bzw. Entwicklung von Verkehrsbeeinflussungsstrategien zur signifikanten Steigerung der Verkehrssicherheit, der Verkehrsqualität und der Energieeffizienz ist die Verfügbarkeit von zuverlässigen und aussagekräftigen Informationen zur aktuellen Verkehrslage.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren zur kurzfristigen Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose sowie zur Berechnung von zu erwartenden Staulängen sollen mit neuartiger Gewinnung von Verkehrsinformationen hierzu beitragen. Ziel dieser dynamischen Verfahren ist es, für die gerade in einen definierten Autobahnabschnitt von einigen Kilometern Länge einfahrenden Fahrzeuge entsprechende Verkehrsinformationen zu prognostizieren. Als ganzheitliche Verfahren sind diese generell für alle Verkehrszustände anwendbar, der Fokus liegt jedoch auf dem gestörten Verkehrszustand.

Wie wurde verfahren?

Die entwickelten Verfahren sind der Gruppe der rückgekoppelten, kurzfristigen Prognoseverfahren zuzuordnen, die auf aktuellen Eingangsdaten sowie Zeitreihen basieren. Als Eingangsdaten kommen dabei sowohl gemittelte lokale als auch streckenbezogene Verkehrsdaten zum Einsatz. Die exemplarisch in den angeführten Beispielen eingesetzten Verkehrsdaten sind über eine Minute aggregiert und beruhen auf induktiver Messtechnik. Hierdurch wird eine Fehlerfortpflanzung verfahrensbedingt nahezu ausgeschlossen. Generell sind aber auch andere Eingangsdaten, z.B. modellierte Verkehrsdaten, möglich. Der Prognosehorizont ist dynamisch und entspricht der erwarteten Reisezeit für die jeweils in den Autobahnabschnitt einfahrenden Fahrzeuge.

Eine Grundlage der vorgestellten Verfahren bildet der Indikator „charakteristische Zeitlücke t_{ch} “, der in der Arbeit definiert wird. Dieser entspricht der Bruttozeitlücke t_{brutto} , die sich während einer kapazitätsüberschreitenden Stauung am Störfallquerschnitt einstellt. Es kann gezeigt werden, dass die charakteristische Zeitlücke t_{ch} während eines Störfalls sehr stabil und charakteristisch für den gesamten im definierten Autobahnabschnitt vorherrschenden Verkehrsablauf ist. Sie sollte idealerweise am Störfallquerschnitt selbst bzw. stromabwärts kurz dahinter (bis zu ca. 2 km) lokal erhoben werden. Eine Erhebung im Rückstaubereich stromaufwärts vor dem Störfallquerschnitt ist ebenfalls möglich.

Unter Vernachlässigung von Überholvorgängen fließen die dem Autobahnabschnitt zufließenden Fahrzeuge in gleicher Reihenfolge auch wieder ab. Aus dem Produkt der charakteristischen Zeitlücke t_{ch} und der Anzahl der in diesem gestörten Abschnitt befindlichen Fahrzeuge ergibt sich dann die prognostizierte Reisezeit für das gerade in den Autobahnabschnitt einfahrende Fahrzeug.

Dieses in der Arbeit entwickelte Verfahren, das sogenannte Basisverfahren für den gestörten Verkehrsablauf mit Stauung, wird exemplarisch mit einem Prognoseverfahren für den nicht gestörten Verkehrsablauf gekoppelt. Hierdurch ergibt sich ein ganzheitliches Verfahren. Zur Abgrenzung der Arbeitsbereiche der beiden Verfahren werden Indikatoren mit dazugehörigen Schwellwerten definiert, die auf empirischen Untersuchungen und verkehrlichen Betrachtungen basieren.

Das ebenfalls entwickelte Staulängenberechnungsverfahren führt zu einem Verkehrsmodell, bei dem die charakteristische Zeitlücke t_{ch} mit einer vereinfachten Form des Fundamentaldiagramms, einer Dreiecksfunktion, verknüpft wird. Unter der Annahme, dass sich in einem gestörten Autobahnabschnitt nur Teilabschnitte mit freiem und/oder gestörtem Verkehrsfluss einstellen, befinden sich die dazugehörigen lokalen und streckenbezogenen Arbeitspunkte immer auf den kurzen Schenkeln der Dreiecksfunktion. Wird zusätzlich angenommen, dass der Verkehrsfluss in den Teilabschnitten stationär und homogen ist, ergibt sich beim Übergang von Teilabschnitten mit freiem zu gestörtem Verkehrsfluss ein horizontaler Sprung zwischen den Schenkeln. Über die physikalischen Zusammenhänge im „Anzahl Fahrzeuge–Weg-Diagramm“ sowie im Fundamentaldiagramm ergibt sich die prognostizierte Gesamtstaulänge für den definierten Autobahnabschnitt. Für bestimmte Störfallsituationen kann darüber hinaus zusätzlich die Ortslage des Störfalls im Betrachtungsabschnitt (Störfallanfang bzw. –ende) bestimmt werden.

Was wurde erreicht?

Zur praktischen Überprüfung der theoretischen Überlegungen zu den Prognoseverfahren wurden gemessene Verkehrsabläufe von ausgesuchten Störfallsituationen auf der Autobahn herangezogen. Dabei zeigt sich, dass die Verfahren robust sind und zumeist gute Prognoseergebnisse liefern. Im Falle der Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose kann unter den gegebenen Randbedingungen teilweise ein Prognosegewinn von mehreren Minuten erreicht werden.

Die entwickelten Verfahren liefern somit Grundlagen für eine verbesserte, aktuelle Verkehrslageinformation auf Autobahnen. Darauf aufbauend ist die Entwicklung von Verkehrsbeeinflussungsstrategien möglich, die hinsichtlich Verkehrssicherheit, Verkehrsqualität und Energieeffizienz optimiert sind.

Abstract

Objective

The goal of traffic management strategies is to achieve a significant improvement of traffic safety, traffic quality and energy efficiency. An essential prerequisite to select or develop efficient traffic control strategies is the availability of accurate and reliable information about the current traffic situation.

The systems presented compute a forecast of short term travel time respectively short term travel speed. In addition, this new and innovative approach to provide traffic information also computes the expected length of traffic congestion. As a result of these dynamic systems traffic forecasts within a defined highway section of a few kilometer lengths can be given for those vehicles just entering the section. All systems presented are integrated systems which mean that they are generally applicable to all traffic conditions. Nevertheless, the main focus of these systems is on disturbed traffic conditions.

Approach

The systems developed belong to the group of short-term forecast methods with feedback mechanism based on current traffic data as well as time series of historical data. Input data are both averaged local data and section-related data. All traffic data used in the given examples are collected by inductive measurement techniques and are aggregated over one minute. This procedure insures that error propagation is almost impossible. In general, however, other input data, e.g. model based traffic data, are also possible. The forecast horizon of the systems is dynamic and reflects the expected travel time of those vehicles just entering the related highway section.

Basis of the presented systems is the new defined indicator "characteristic time-gap t_{ch} ". This indicator corresponds to the common indicator "gross time-gap t_{gross} " in case of congestion. It can be shown that during congestion the characteristic time gap t_{ch} is very stable and also characteristic for the whole traffic flow within a defined highway section. It is best to measure t_{ch} directly at the location of the incident. If this is impossible, then the measurement should be downstream as closely as possible behind the incident within the next 2 km. Measurements inside the congested area - upstream the incident location - are also possible.

Neglecting passing maneuvers, the order of entering vehicles corresponds to the order with which they leave the section later on. The product of the characteristic time gap t_{ch} and the number of vehicles within the disturbed highway section at this time gives the forecasted travel time for a just entering vehicle.

This system, the so called "base method", which is developed for disturbed traffic conditions, is exemplarily combined with a forecasting system for good traffic conditions. The outcome of this is an integrated system.

For a distinction between disturbed and good traffic indicators together with corresponding thresholds are defined. These indicators and thresholds are based on empirical studies as well as on observations of traffic.

In addition, a second system is presented. This system calculates the expected length of traffic congestion based on a traffic model which combines (again) the characteristic time gap t_{ch} with a simplified triangular fundamental diagram. Assuming that the traffic conditions of all sub-sections within a given highway section with disturbed traffic conditions are either disturbed or good, all associated working points are always on one of the two legs of the triangle. Additionally assuming that the traffic flow within the sub-sections is stationary and homogeneous, the transition between sub-sections with disturbed and sub-section with good traffic conditions is a horizontal jump from one leg of the triangle to the other one. Because of physical relations within the "Number of cars vs. distance diagram" as well as within the fundamental diagram the expected length of traffic congestion can be forecasted for the highway section under consideration. For certain cases of incidents it is also possible to give information about the location of the congestion (start and end point).

Achievement

For the empirical verification of the theoretical approaches sketched above, measured traffic flow data for selected incident situations on highways are used. The analysis showed that the systems developed are robust and provide mostly good forecast results. This systems turn out to be advantageous: in some cases, the travel time and speed forecast was obtained several minutes earlier under the given boundary conditions.

In essence, the systems developed provide a basis to improve the current traffic information on highways. Based on this, new traffic management strategies can be developed that optimize traffic in terms of traffic safety, traffic quality and energy efficiency.

1 Einleitung und Übersicht

1.1 Motivation

Tagtäglich geschieht eine Vielzahl von Unfällen auf deutschen Autobahnen. Die möglichen Folgen für die Unfallbeteiligten sind vielschichtig und erstrecken sich vom Sach- über den Personenschaden bis hin zum Tod.

Allein im Jahr 2010 wurden insgesamt 18.829 Unfälle mit Personenschaden registriert, bei denen 29.303 Verkehrsteilnehmer verunglückten, davon 430 tödlich. Hauptunfallursachen auf Autobahnen sind eine nicht angepasste Geschwindigkeit, ein ungenügender Sicherheitsabstand sowie Fehler beim Überholvorgang. 38 % der Unfälle mit Personenschaden ereigneten sich dabei durch das Auffahren auf ein vorausfahrendes Fahrzeug [Bun11, Sta11].

Im Zuge einer EU-Initiative zur Steigerung der Verkehrssicherheit strebt das „Verkehrssicherheitsprogramm 2011“ in Deutschland eine Reduktion der Verkehrstoten – bezogen auf alle Straßenkategorien – um 40 % bis ins Jahr 2020 an. Eine der Maßnahmen, die zur Zielerreichung eingesetzt werden sollen, ist das Werben für mehr Regelakzeptanz. Dazu soll durch verstärkte Verkehrsaufklärung die Sinnhaftigkeit von Regeln und Vorschriften vermittelt werden [Bun11]. Hintergrund ist, dass Regeln und Vorschriften, die den Fahrzeugführern einsichtig erscheinen, stärker befolgt werden. Im Hinblick auf eine Unfallhäufung aufgrund von nicht angepassten Geschwindigkeiten gilt dies insbesondere für die Befolgung von Geschwindigkeitsbeschränkungen.

Speziell im Bereich von Verkehrsbeeinflussungsanlagen ist die Befolgung der angezeigten Verkehrszeichen maßgeblich für die Wirksamkeit der Anlage. Nur bei entsprechend hohem Befolgungsgrad können sich die gewählten Verkehrsbeeinflussungsstrategien positiv auf den Verkehrsfluss auswirken. Der Bau dieser Anlagen auf Autobahnen wird schon seit Jahren vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung gefördert. Auch zukünftig ist eine weitere Förderung dieser Anlagen an stau- oder unfallgefährdeten Strecken geplant und ebenfalls Bestandteil des Maßnahmenkatalogs im „Verkehrssicherheitsprogramm 2011“ [Bun11]. Ziel dieser Anlagen ist es, den Verkehrsfluss zu harmonisieren, vor Gefahren zu warnen, Sortier- und Verflechtungshilfen zu geben sowie die Betriebsdienste durch Baustellenprogramme zu unterstützen [Bun03]. Dazu werden derzeit Schilderbrücken mit Wechselverkehrszeichengebern eingesetzt, die neben den Gebots- (z.B. zulässige Höchstgeschwindigkeit) auch Verbots- (z.B. Überholverbote) und Warnzeichen (z.B. Unfall, Baustelle, Stau) anzeigen können. Zukünftig sind aber auch Verkehrsbeeinflussungsanlagen denkbar, die andere Verbreitungskanäle, z.B. On-Board-Anzeigen direkt in den Fahrzeugen, nutzen.

Wie auch immer Verkehrsbeeinflussungsanlagen in Zukunft aussehen werden, entscheidend für ihren Nutzen ist zum einen ein hoher Befolgungsgrad der geschalteten Wechselverkehrszeichen sowie zum anderen die Sinnhaftigkeit der zugrunde gelegten Verkehrsbeeinflussungsstrategie.

Maßgebliche Voraussetzung für die Auswahl bzw. Entwicklung von Strategien zur Verkehrsbeeinflussung mit dem Ziel einer signifikanten Steigerung von Verkehrssicherheit,

Verkehrsqualität und Energieeffizienz auf Autobahnen ist die Verfügbarkeit von aktuellen, zuverlässigen und aussagekräftigen Informationen zur Verkehrslage.

Die im weiteren Verlauf dieser Arbeit vorgestellten Verfahren und Methoden sollen mit neuartiger Gewinnung von Verkehrsinformationen hierzu beitragen.

1.2 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die methodische Entwicklung von Verfahren zur dynamischen Verkehrslageanalyse auf der Grundlage von gemittelten lokalen und streckenbezogenen Verkehrsdaten. Der Einsatzbereich der Verfahren ist dabei auf die Analyse des Verkehrsablaufs auf Autobahnen beschränkt. Die entwickelten Verfahren erlauben kurzfristige Verkehrslageprognosen hinsichtlich der zu erwartenden

1. Reisezeit bzw. Reisegeschwindigkeit
2. Staulänge

für ein gerade in einen definierten Autobahnabschnitt von einigen Kilometern Länge einfahrendes Fahrzeug.

Die folgenden Anforderungen werden der Verfahrensentwicklung zugrunde gelegt:

- Die Verfahren sollen allgemeingültig, robust und zuverlässig sein.
- Eine Fehlerfortpflanzung soll vermieden werden. Erreicht werden kann dies beispielsweise durch ein rückgekoppeltes Verfahren und den Einsatz von aktuell gemessenen Verkehrsdaten.
- Soweit möglich sollen im Sinne einer hohen Zuverlässigkeit und Robustheit gemessene statt modellierter Verkehrsdaten als Eingangsgrößen zum Einsatz kommen.
- Die für die Verfahren benutzten Eingangswerte sollen mit gängigen Techniken zur Verkehrsdatenerfassung erhoben werden können.

1.3 Methodik und Gliederung der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in elf thematische Kapitel, deren Inhalt im Folgenden kurz beschrieben wird.

In Kapitel 2 werden zunächst kurz die für die Arbeit wichtigsten Grundlagen erläutert, die nicht als „allgemein bekannt“ vorausgesetzt werden können. Zusätzlich werden wesentliche Begriffe definiert und ein Überblick über die zur Verfügung stehende Datenbasis gegeben.

Das Kapitel 3 gibt einen Überblick über den Stand der Technik, soweit dieser zur Einordnung der im weiteren Verlauf eingesetzten bzw. vorgestellten Mess- und Prognoseverfahren relevant ist.

Die in dieser Arbeit entwickelten und vorgestellten Verfahren befassen sich mit den Auswirkungen von Störfallsituationen auf den Verkehrsablauf innerhalb eines definierten Betrachtungsabschnitts auf Autobahnen. Was für Verkehrsabläufe sich aufgrund von

Störfallsituationen im Betrachtungsabschnitt ausbilden und wie diese auf Betrachtungsabschnitts- bzw. Teilabschnittsebene betrachtet werden können, wird in Kapitel 4 analysiert.

Die Ergebnisse aus Kapitel 4 werden dann dazu genutzt, beispielhafte Störfälle aus der für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Datenbasis auszuwählen. Dabei decken die ausgewählten Störfälle alle in Kapitel 4 identifizierten Störfallsituationen ab.

In Kapitel 5 werden diese ausgesuchten Störfallsituationen detailliert bezüglich ihrer Auswirkungen auf den Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt analysiert. Die ausgewählten Störfallsituationen werden dann im Weiteren dazu verwendet, die Einsatzfähigkeit und Zuverlässigkeit der vorgestellten theoretischen Überlegungen und Verfahren an praktischen Beispielen zu überprüfen.

Als ein wesentlicher Indikator zur Untersuchung des Einflusses von Störfallursachen auf den Verkehrsablauf in den Teilabschnitten wird im Zuge dieser Arbeit die charakteristische Zeitlücke identifiziert, die in Kapitel 6 näher erläutert wird. Diese Zeitlücke ist von zentraler Bedeutung für die nachfolgenden Prognoseverfahren.

Basierend auf der charakteristischen Zeitlücke, wird im nachfolgenden Kapitel 7 ein neuartiges dynamisches Verfahren zur Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose entwickelt und vorgestellt. Zur Überprüfung der Funktion dieses Verfahrens in der Praxis wird es auf die in Kapitel 5 ausgesuchten Störfallsituationen angewendet. Die Ergebnisse dieser Überprüfung sowie eine Bewertung des Prognoseverfahrens hinsichtlich seines Einflusses auf die Verkehrssicherheit, die Verkehrsqualität und die Energieeffizienz sind in Kapitel 8 dargestellt.

In Kapitel 9 wird ein neuartiges Verfahren zur Staulängenprognose hergeleitet. Das hergeleitete Staulängenprognoseverfahren baut dabei ebenfalls auf der in Kapitel 6 eingeführten charakteristischen Zeitlücke auf. Zur Überprüfung des theoretischen Ansatzes werden in Kapitel 10 wiederum die zuvor in Kapitel 5 genannten realen Störfallsituationen herangezogen.

Abschließend erfolgen im letzten Kapitel, Kapitel 11, eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf.

2 Grundlagen

Ziel: In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über wesentliche verkehrstechnische Grundlagen und Definitionen gegeben, auf denen die nachfolgende Arbeit aufbaut. Abschließend wird die zur Verfügung stehende Datenbasis dargestellt, die im weiteren Verlauf zur Überprüfung der entwickelten Prognoseverfahren herangezogen wird.

2.1 Weg-Zeit-Diagramm

Eine vollständige Betrachtung von Verkehrsabläufen ist im Weg-Zeit-Diagramm (x-t-Diagramm) möglich. In diesem Diagramm wird der Bewegungsablauf eines jeden Fahrzeugs als Trajektorie dargestellt. Die Trajektorie beschreibt die räumlich-zeitliche Bewegung (Fahrverlauf) der einzelnen Fahrzeuge. Stehen die Trajektorien aller Fahrzeuge zur Verfügung, so ist der betrachtete Verkehrsablauf vollständig beschrieben.

Eine Analyse der Verkehrsabläufe in diesem Diagramm kann lokal, momentan oder streckenbezogen durchgeführt werden.

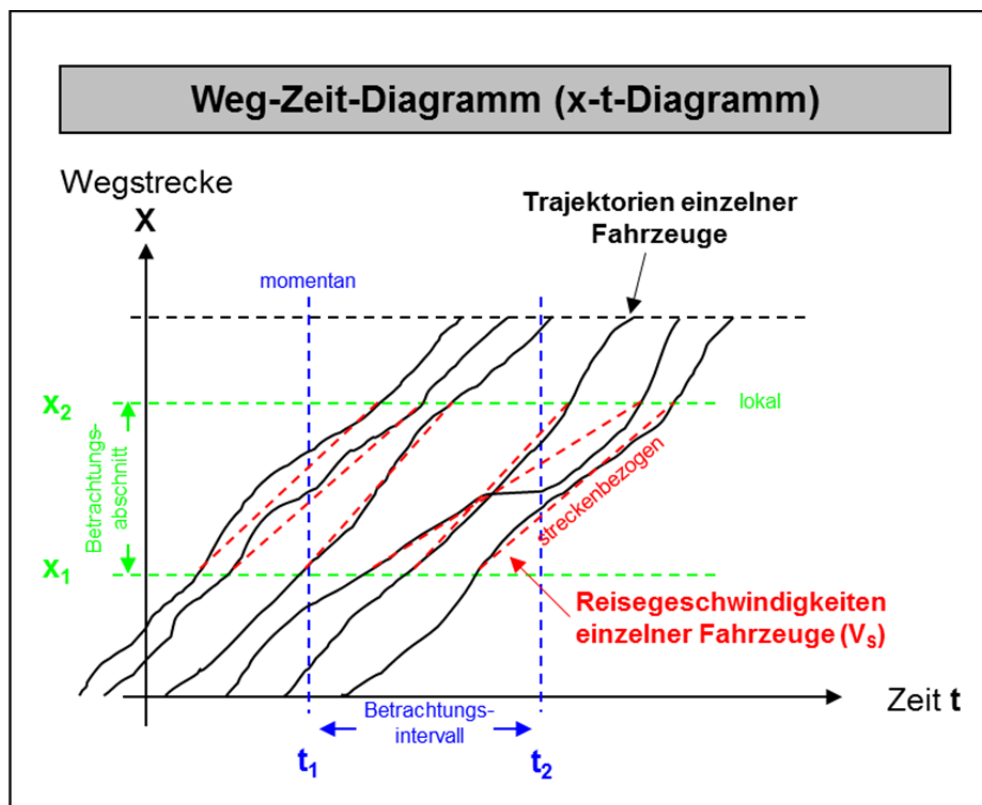


Abbildung 2-1: Weg-Zeit-Diagramm

Es ergeben sich somit drei wesentliche Betrachtungsweisen der Fahrzeugtrajektorien in der Weg-Zeit-Ebene:

1. Lokale Verkehrsflussanalyse
Hierbei wird der Verkehrsfluss lokal, also an einem bestimmten Ort, über frei wählbare fortlaufende Zeitintervalle betrachtet. Die lokale Verkehrsflussanalyse ist eine eindimensionale Analyse in Zeitrichtung t .
Zu den lokalen Verkehrsgrößen gehören die lokale Geschwindigkeit v_{MQ} sowie die Verkehrsstärke q_{MQ} (vgl. Abbildung 2-1, grüne Beschriftung).
2. Momentane Verkehrsflussanalyse
Hierbei wird der Verkehrsfluss momentan, also zu einem bestimmten Zeitpunkt, über frei wählbare Streckenabschnitte betrachtet. Die momentane Verkehrsflussanalyse ist eine eindimensionale Analyse in Wegrichtung x .
Zu den momentanen Verkehrsgrößen gehören die Verkehrsdichte K_{mom} sowie die momentane Geschwindigkeit V_{mom} (vgl. Abbildung 2-1, blaue Beschriftung).
3. Streckenbezogene Verkehrsflussanalyse
Hierbei wird der Verkehrsfluss innerhalb eines frei wählbaren Streckenabschnitts fortlaufend betrachtet. Die streckenbezogene Verkehrsflussanalyse ist eine zweidimensionale Analyse in Weg- und Zeitrichtung (x, t) .
Die Reisegeschwindigkeit des einzelnen Fahrzeugs ergibt sich dabei aus der Linearisierung seiner tatsächlichen Trajektorie zwischen aufeinanderfolgenden Messquerschnitten.
Zu den streckenbezogenen Verkehrsgrößen gehören die Reisegeschwindigkeit V_s sowie die Verkehrsdichte K_s (vgl. Abbildung 2-1, rote Beschriftung)

In dieser Arbeit wird eine Kombination von lokaler und streckenbezogener Verkehrsflussanalyse durchgeführt.

2.2 Mikroskopische und makroskopische Verkehrsflussanalyse

Bei der Untersuchung von verkehrlichen Zusammenhängen kann weiterhin zwischen einer mikroskopischen und einer makroskopischen Verkehrsflussanalyse unterschieden werden [For05].

Mikroskopisch:

Bei einer mikroskopischen Verkehrsflussanalyse wird das Bewegungsverhalten der einzelnen Fahrzeuge fahrstreifenbezogen, als singuläre Einheit, untersucht. Dazu wird das Fahrverhalten jedes Einzelfahrzeugs betrachtet und in Beziehung zum Fahrverhalten der benachbarten Fahrzeuge gesetzt. Aus der Interaktion zwischen den einzelnen Fahrzeugen ergibt sich dann der Verkehrsablauf für das betrachtete Fahrzeugkollektiv [Erl07 / FFV01].

Wesentliche Verkehrsgrößen zur Beschreibung des Verkehrsablaufs bei einer mikroskopischen Verkehrsbetrachtung sind:

- Zeitlücke
(Zeitunterschied zwischen den Durchgängen der Bezugspunkte aufeinanderfolgender Fahrzeuge eines Fahrzeugstromes an einem Messquerschnitt)
- Weglücke
(räumlicher Abstand zwischen den Bezugspunkten aufeinanderfolgender Fahrzeuge eines Fahrzeugstromes zu einem Zeitpunkt)

Makroskopisch:

Wird das Fahrverhalten von verschiedenen Einzelfahrzeugen über ein Intervall gemittelt, so stellt sich eine Homogenisierung ein. Derartige Intervalle können über die Zeit, den Weg oder aber über Fahrzeugkollektive gebildet werden. Dabei ist der Grad der Homogenisierung direkt von der Größe des Intervalls abhängig. Die so gemittelten Verkehrsdaten beschreiben dann nicht länger das Fahrverhalten eines bestimmten Einzelfahrzeugs, sondern vielmehr das mittlere Fahrverhalten des Kollektivs der betrachteten Fahrzeuge. Diese Betrachtung des mittleren Fahrverhaltens wird als makroskopische Verkehrsflussanalyse bezeichnet [Erl07 / FFV01].

Wesentliche Verkehrsgrößen zur Beschreibung des Verkehrsablaufs bei einer makroskopischen Verkehrsbetrachtung sind:

- Verkehrsstärke q (Fahrzeuge/Zeitintervall)
- Verkehrsdichte K_s (Fahrzeuge/Wegintervall)
- Lokale Geschwindigkeit v (gemittelt z.B. über ein Zeitintervall)
- Reisegeschwindigkeit V_s (gemittelt z.B. über ein Wegintervall)

In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich makroskopische Verkehrsbetrachtungen durchgeführt. Die Mittelung erfolgt über Zeitintervalle. Eine Betrachtung von Einzelfahrzeugdaten (mikroskopische Verkehrsflussanalyse) findet nicht statt.

2.3 Makroskopische lokale und streckenbezogene Verkehrsgrößen

Vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Betrachtungsweisen für die Fahrzeugtrajektorien im Weg-Zeit-Diagramm (Kapitel 2.1) sowie unter Berücksichtigung der Unterscheidung nach mikro- bzw. makroskopischer Verkehrsflussanalyse (Kapitel 2.2) werden in dieser Arbeit zusammenfassend nur makroskopische lokale und streckenbezogene Verkehrsgrößen betrachtet.

Zu den makroskopischen lokalen Verkehrsgrößen gehören die Verkehrsstärke sowie die mittlere lokale Geschwindigkeit. Zu den makroskopischen streckenbezogenen Verkehrsgrößen zählen die Verkehrsdichte und die mittlere Reisegeschwindigkeit.

Da im weiteren Verlauf der Arbeit nur makroskopische Verkehrsgrößen verwendet werden (Aggregationsintervall 1 Minute), wird im Folgenden auf das Attribut „mittlere“ verzichtet. Bei Mittlungen, die über das Aggregationsintervall hinausgehen (z.B. 5- oder 10-Minutenwerte), werden die Verkehrsgrößen mit dem Adjektiv „gemittelt“ versehen, und das gewählte Mittelungsintervall ist zusätzlich angegeben.

Zur Bezeichnung von lokalen Verkehrsgrößen werden Kleinbuchstaben verwendet, streckenbezogene Verkehrsgrößen sind durch Großbuchstaben gekennzeichnet.

2.4 Messung vs. Modellierung von Verkehrsgrößen

Die in den folgenden Kapiteln benötigten Verkehrsgrößen, die sowohl zur Analyse des Verkehrsablaufs als auch als Eingangsgrößen für die entwickelten und vorgestellten Prognoseverfahren eingesetzt werden, können entweder gemessen oder aber mittels geeigneter Modelle berechnet werden.

Steht zur Erhebung der erforderlichen Verkehrsgrößen eine zuverlässige Messmethode zur Verfügung, so wird im Weiteren die Messung der Modellierung vorgezogen. Ausschlaggebend für die Bevorzugung der Messung ist, dass die Messung nur einer potentiellen Fehlerquelle, dem Messfehler, unterliegt.

Im Gegensatz dazu ergeben sich bei einer Modellierung von Verkehrsgrößen mindestens zwei potentielle Fehlerquellen. Zur Modellierung von Verkehrsgrößen werden zum einen ein geeignetes Modell und zum anderen geeignete Modelleingangswerte benötigt. Die erforderlichen Modelleingangswerte sind ihrerseits entweder modelliert oder aber gemessen. Es ergeben sich somit bei der Modellierung mindestens ein potentieller Modell- sowie zusätzlich ein potentieller Messfehler.

Zuweilen ist es wirtschaftlich nicht sinnvoll oder aber auch einfach technisch (noch) nicht möglich, die gewünschten Verkehrsgrößen zu messen. In einem solchen Fall besteht nur die Möglichkeit, die entsprechenden Verkehrsgrößen zu modellieren. Verkehrswerte, die in der Zukunft liegen, können aus diesem Grunde generell nur über ein Modell, in diesem Fall ein Prognosemodell, gewonnen werden.

In der vorliegenden Arbeit wird in der Regel der jeweils aktuelle Verkehrszustand mittels gemessener Verkehrsgrößen und zukünftige Verkehrszustände über die hergeleiteten neuartigen Prognosemodelle beschrieben.

Zu welchem Modellierungszweck auch immer Modelle eingesetzt werden, das Ziel aller Modelle ist es, die abzubildende Wirklichkeit so vereinfacht wie möglich, jedoch so komplex wie nötig abzubilden. Die Komplexität der Modelle ist dabei direkt von der jeweiligen Abbildungsaufgabe abhängig [Hel97]. Vereinfachungen bei der Modellerstellung führen immer zu Einschränkungen der Allgemeingültigkeit des Modells.

2.5 Das Fundamentaldiagramm – ein Verkehrsmodell

Das Fundamentaldiagramm, als Darstellungsform der funktionalen Abhängigkeit zwischen den Verkehrsgrößen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit, ist aus der Fachliteratur bekannt. In dieser Arbeit kommt eine spezielle Variante, die Dreiecksfunktion als vereinfachte q - k -Relation, zum Einsatz (vgl. Kapitel 9.4 und [For05]).

Fundamentaldiagramme können sowohl für lokale als auch für streckenbezogene Verkehrsgrößen aufgestellt werden [For00]. In der nachfolgenden Arbeit wird zwischen lokalen und streckenbezogenen Fundamentaldiagrammen unterschieden. Ausschlaggebend für diese

Unterscheidung sind die bei der Erstellung des Fundamentaldiagramms berücksichtigten beiden Eingangsgrößen, aus denen sich die dritte Verkehrsgröße direkt ableiten lässt.

Als Eingangsgrößen für das lokale Fundamentaldiagramm werden die lokalen Verkehrsgrößen lokale Geschwindigkeit v und Verkehrsstärke q in die Fundamentalbeziehung eingesetzt, die an einem festen Messquerschnitt erhoben werden. Die resultierende „lokale“ Verkehrsdichte k ergibt sich entsprechend der Fundamentalbeziehung aus dem Quotienten dieser beiden Verkehrsgrößen (vgl. Formel 2.1).

$$k = \frac{q}{v} \quad (2.1)$$

mit:

- q = lokale Verkehrsstärke
(in dieser Arbeit gemessen)
- v = lokale Geschwindigkeit
(in dieser Arbeit gemessen)
- k = „lokale“ Verkehrsdichte

Als Eingangsgrößen für das streckenbezogenen Fundamentaldiagramm werden die streckenbezogenen Verkehrsgrößen Reisegeschwindigkeit V_S und Verkehrsdichte K_S eingesetzt, die über streckenbezogene Messverfahren erhoben werden. Die resultierende „streckenbezogene“ Verkehrsstärke Q_S ergibt sich entsprechend der Fundamentalgleichung aus dem Produkt der beiden Verkehrsgrößen.

$$Q_S = V_S \cdot K_S \quad (2.2)$$

mit:

- Q_S = „streckenbezogene“ Verkehrsstärke
- V_S = streckenbezogene Reisegeschwindigkeit
(in dieser Arbeit gemessen)
- K_S = streckenbezogene Verkehrsdichte
(in dieser Arbeit gemessen)

2.6 Störfall und Stauung

Nachfolgend sind die Definitionen der Begriffe Störfall und Stauung dargestellt, wie sie im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet werden.

Unter dem Begriff Störfall wird eine verkehrliche Beeinträchtigung verstanden. Jeder Störfall ist auf eine Störfallursache zurückzuführen. Die Störung entsteht dadurch, dass die der Störfallursache stromabwärts zufließenden Fahrzeuge ihre aktuelle Geschwindigkeit signifikant verlangsamen müssen. Dabei ist es unerheblich, ob sich die Störfallursache selbst bewegt oder ortsfest ist.

Fließen der Störfallursache mehr Fahrzeuge zu, als diese passieren können, so bildet sich stromabwärts vor der Störfallursache eine (Rück-)Stauung. Dabei wird unter dem Begriff (Rück-)Stauung eine signifikante Steigerung der Verkehrsdichte verstanden.

Die Stauung, auch Stau genannt, hat eine räumliche Ausdehnung, die von Stauanfang und Stauende begrenzt wird. Der Stauanfang fällt mit der maßgeblichen Störfallursache zusammen. Stromabwärts hinter der Störfallursache stellt sich ein weitestgehend freier Verkehrsablauf ein. Auf das Stauende fahren die der Stauung zufließenden Fahrzeuge auf. Es liegt stromabwärts vor der Störfallursache (vgl. Abbildung 2-2).

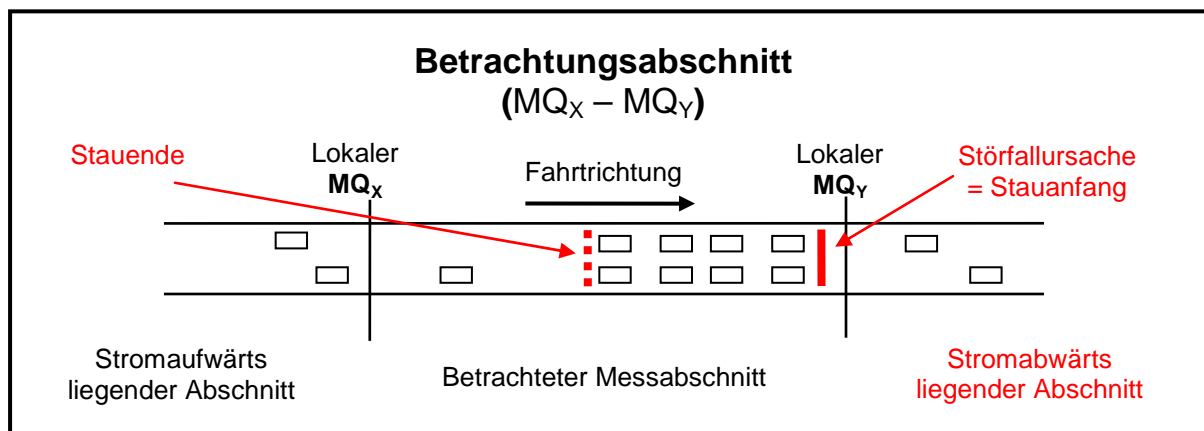


Abbildung 2-2: Übersicht – Stauung und Stauende

2.7 Datenbasis

Zur praktischen Überprüfung der im weiteren Verlauf theoretisch hergeleiteten Methoden und Verfahren werden reale Verkehrsabläufe herangezogen. Als Datenbasis stehen dazu gemessene Verkehrsgrößen der Verkehrsbeeinflussungsanlage Hohenstadt–Riedheim an der Bundesautobahn A8 zur Verfügung. Die gut 40 km lange Verkehrsbeeinflussungsanlage ist in streckenbezogene Messabschnitte von ca. 4 km Länge unterteilt. Neben einem Ein- und einem Ausgangsquerschnitt (MQ_x , MQ_y), in deren räumlicher Nähe Schilderbrücken mit Wechselverkehrszeichen vorzufinden sind, verfügen die Messabschnitte teilweise zusätzlich über einen mittig angeordneten Hilfsquerschnitt (MQ_{xy}).

Die infrastrukturellen Randbedingungen der einzelnen Messabschnitte der Verkehrsbeeinflussungsanlage variieren teilweise stark und sind somit nicht immer vergleichbar. Als Datenbasis für die Überprüfung werden nur vergleichbare Messabschnitte mit ähnlichen infrastrukturellen Randbedingungen herangezogen.

Die ausgewählten Messabschnitte verfügen über eine zweistreifige Richtungsfahrbahn ohne größere Gefälle Strecken. Weiterhin beinhalten sie keine größeren Zu- bzw. Abfahrten (z.B. Autobahnabfahrten, Autobahnkreuze bzw. -dreiecke, Tank- und Rastanlagen). Sowohl an den Ein- und Ausgangsquerschnitten als auch an den Hilfsquerschnitten werden mittels induktiver Messtechnik (Induktionsschleife) die lokalen Verkehrsgrößen Geschwindigkeit v und Verkehrsstärke q erhoben. Daneben werden für die einzelnen Messabschnitte mittels Mustererkennung und korrelativer Messtechnik [For00 / For03] die streckenbezogenen Verkehrsgrößen Reisegeschwindigkeit V_s und Verkehrsdichte K_s ermittelt. Zusätzlich stehen ebenfalls Informationen über den Anteil Lkw-ähnlicher Fahrzeuge sowie Wetterdaten zur Verfügung.

Sowohl die lokalen als auch die streckenbezogenen Verkehrsgrößen werden vor Ort von der Verkehrsbeeinflussungsanlage querschnittbezogen (über beide Fahrstreifen) zusammengefasst und zu Minutenwerten aggregiert. Alle Verkehrsgrößen stehen somit ausschließlich als kontinuierliche Minutenwerte zur Verfügung.

Abbildung 2-3 gibt einen schematischen Überblick über die Anordnung der Messquerschnitte sowie die zur Verfügung stehenden maßgeblichen Verkehrsgrößen innerhalb der Messabschnitte. Zu beachten ist, dass der mittig angeordnete Hilfsquerschnitt (grün eingefärbt) nicht in jedem Messabschnitt vorzufinden ist.

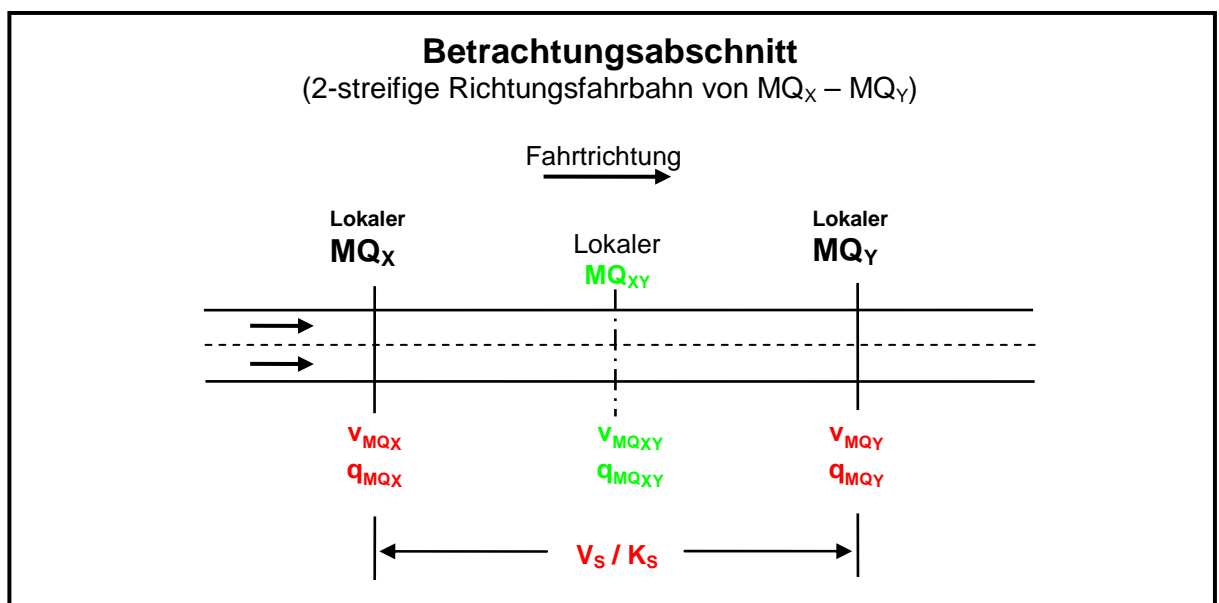


Abbildung 2-3: Schematische Abbildung - Betrachtungsabschnitt

2.8 Zusammenfassung „Grundlagen“

Im vorangegangenen Kapitel sind wesentliche Grundlagen und Definitionen dieser Arbeit kurz zusammengefasst. Dabei wird sowohl auf die verschiedenen Möglichkeiten der Verkehrsflussanalyse im Weg-Zeit-Diagramm (lokal, momentan, streckenbezogen) als auch auf Unterschiede bei der Anzahl der betrachteten Fahrzeuge (mirko- bzw. makroskopisch) eingegangen. Weiterhin wird kurz der Unterschied zwischen Messung und Modellierung von Verkehrsgrößen erläutert und auf das Fundamentaldiagramm, als ein für diese Arbeit wesentliches Modell, in lokaler und streckenbezogener Auslegung eingegangen. Aufgrund der Tatsache, dass das Modellieren von Verkehrsgrößen mit mehr potentiellen Fehlerquellen (Messfehler und Modellfehler) behaftet ist als das Messen (Messfehler), werden im weiteren Verlauf, soweit möglich, gemessene Verkehrsgrößen den modellierten vorgezogen. Eine Definition der Begriffe Störfall und Stauung, wie sie im Folgenden verwendet wird, sowie ein kurzer Überblick über die zur Verfügung stehende Datenbasis beschließen das Kapitel.

3 Stand der Technik

Ziel: Im folgenden Kapitel wird kurz der Stand der Technik für die Mess- und Prognoseverfahren dargestellt, die einen relevanten Bezug zu den in der folgenden Arbeit eingesetzten bzw. vorgestellten Verfahren haben. Der Fokus liegt dabei sowohl auf dem Bereich der streckenbezogenen Messverfahren als auch auf dem Bereich der kurzfristigen Prognoseverfahren.

3.1 Vorgehensweise Stand der Technik

Zur besseren Einordnung der Messverfahren, die der eingesetzten Datenbasis zugrunde liegen, sowie der in der weiteren Arbeit vorgestellten Verfahren zur Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose (vgl. Kapitel 7) und zur Staulängenprognose (vgl. Kapitel 0) wird im Folgenden ein kurzer Überblick über den Stand der Technik gegeben. Der Überblick umfasst dabei sowohl Mess- als auch die Prognoseverfahren, die jeweils als Baumdiagramme dargestellt sind. Diejenigen Äste der Baumdiagramme, die direkten Bezug zu den eingesetzten bzw. vorgestellten Verfahren haben, sind zur besseren Übersicht farblich grün hervorgehoben. Diejenigen Äste, die keine direkte Relevanz für die Verfahren haben, sind farblich violett markiert und werden nicht weiter verfolgt.

3.2 Stand der Technik – Messverfahren für die Verkehrsdatenerhebung

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über den Stand der Technik bei den Messverfahren zur Verkehrsdatenerhebung gegeben. Eine Vielzahl von unterschiedlichen Mess- und Erhebungsverfahren wurde in den letzten 30 Jahren entwickelt und eingesetzt.

Ziel jedes ganzheitlichen Messverfahrens ist es, unabhängig von den aktuellen verkehrlichen (z.B. freier Verkehr, Stau) oder aber umfeldbezogenen Randbedingungen (z.B. Nebel, Schnee) möglichst genaue Messwerte zu erheben.

Alle Messverfahren unterliegen dabei physikalischen Grenzen, die nicht überschritten werden können. Wird das physikalische Messprinzip des eingesetzten Sensors beeinträchtigt, z.B. durch einen verdreckten Optiksensoren (Linse) bei einem bildgebenden System, kann es zu Messfehlern und/oder Messausfällen kommen.

Das Baumdiagramm (vgl. Abbildung 3-1) gibt einen schematischen Überblick über den Stand der Technik bei den Verkehrsdatenerhebungsverfahren.

Diese Verfahren lassen sich unterteilen in Verfahren zur *streckenbezogenen* und *lokalen Datenerhebung*. Verfahren zur lokalen Verkehrsdatenerhebung (z.B. Radar, Infrarot, Induktionsschleife) sind aus der Messpraxis bekannt und werden im Weiteren nicht näher erläutert. Die *streckenbezogene Datenerhebung* lässt sich wiederum in *Messverfahren* sowie *modellbasierte Verfahren* unterteilen. *Modellbasierte Verfahren* beruhen auf lokal erhobenen Verkehrsgrößen sowie einem geeigneten Berechnungsmodell. Direkte Relevanz für die im Folgenden eingesetzte Datenbasis haben nur die streckenbezogenen Messverfahren, auf die im weiteren Verlauf näher eingegangen wird. Diese *Messverfahren* lassen sich nach der

zugrunde liegenden Messtechnik in *Fahrzeug wiedererkennende* und *Fahrzeug verfolgende Verfahren* unterteilen. Beide Verfahren haben direkte Relevanz für das neuartige Prognoseverfahren und werden im Folgenden näher betrachtet.

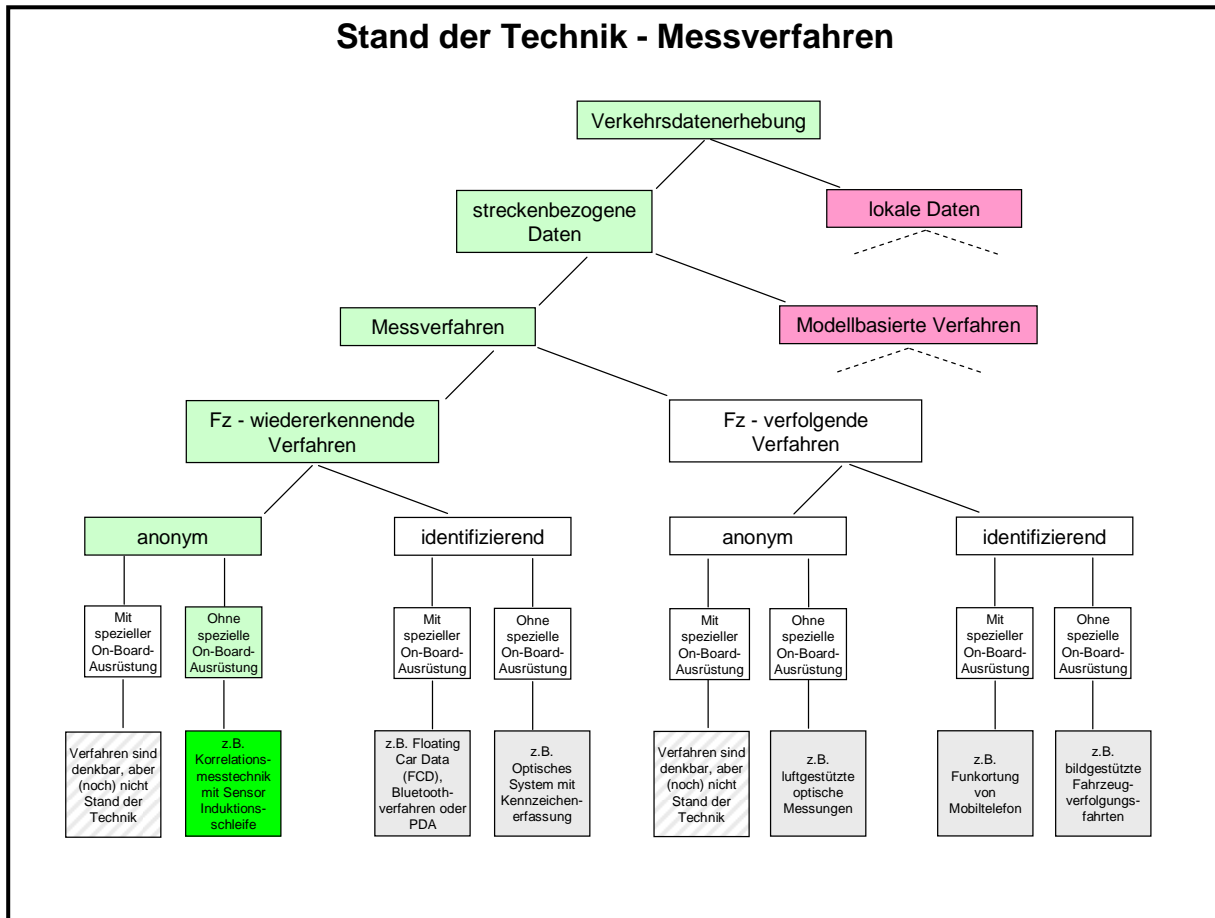


Abbildung 3-1: Baumdiagramm - Messverfahren

Fahrzeug wiedererkennende Verfahren

Fahrzeug wiedererkennende Verfahren basieren auf dem Messprinzip, Fahrzeuge aufgrund ihrer physikalischen Spezifikationen, sogenannten Mustern, an zwei aufeinanderfolgenden Messquerschnitten wiederzuerkennen. Die den erfassten Fahrzeugen zugeordneten Muster werden dabei so gewählt, dass eine (möglichst) eindeutige Zuordnung zwischen Fahrzeug und Muster gewährleistet ist. Das am Eingangsquerschnitt eines Betrachtungsabschnitts erzeugte Muster wird mit den zeitlich später erzeugten Mustern am Ausgangsquerschnitt abgeglichen und dem passenden Muster zugeordnet. Unter Berücksichtigung der zugehörigen Zeitstempel werden hieraus die streckenbezogenen Verkehrsgrößen ermittelt [For03 / Bun06]. *Wiedererkennende Verfahren* unterteilen sich nach Art der eingesetzten Muster in *anonyme* und *identifizierende* Verfahren. Bei den anonymen Verfahren ist, im Gegensatz zu den identifizierenden Verfahren, eine Identifizierung des Fahrzeughalters bzw. der Fahrzeuginsassen nicht möglich. Sowohl die *anonymen* Verfahren als auch die *identifizierenden* Verfahren unterteilen sich in Verfahren *mit* und *ohne spezielle On-Board-Ausrüstung*. Spezielle On-Board-Ausrüstung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Fahrzeuge mit Zusatzausstattung (fest installierte oder mobile Geräte) ausgerüstet sind, die serienmäßig nicht in allen Fahrzeugen verfügbar ist (z.B. Mobilfunk, Satellitenortung).

Zu der *Gruppe der Fahrzeug wiedererkennenden, anonymen Systeme ohne spezielle On-Board-Ausrüstung* zählt beispielsweise die Korrelationsmesstechnik mit dem Sensor Induktionsschleife. Hierauf beruht die dieser Arbeit zugrunde liegende Datenbasis. Aufgrund der individuellen, induktiven Verstimmungskurven von unterschiedlichen Fahrzeugen können diese an verschiedenen Messstellen wiedererkannt und korreliert werden, ohne den Fahrer zu identifizieren. Aus der zeitlichen und räumlichen Differenz zwischen der Mustergewinnung und der Musterwiedererkennung werden die streckenbezogenen Verkehrsgrößen berechnet [For03 / For00 / Böh80].

Die *Gruppe der Fahrzeug wiedererkennenden, anonymen Systeme mit spezieller On-Board-Ausrüstung* ist gegenwärtig noch nicht Stand der Technik, generell sind solche Systeme jedoch denkbar und werden nur der Vollständigkeit halber im Diagramm aufgeführt.

Als Beispiel für die *Gruppe der Fahrzeug wiedererkennenden, identifizierenden Verfahren mit spezieller On-Board-Ausrüstung* sei an dieser Stelle das Floating Car Data (FCD) System genannt. Dabei verfügt jedes Messfahrzeug über ein Ortungssystem, einen Datenspeicher und, wenn es sich um eine Online-Messung handelt, über eine Datenübertragungseinrichtung (z.B. Mobilfunk). Über das Ortungssystem wird die Position des Fahrzeugs ermittelt, die dem entsprechenden Zeitstempel und der Fahrzeug-ID zugeordnet wird. Aufeinanderfolgende Positionsmeldungen werden auf eine digitale Karte projiziert. Aus dem zeitlichen und dem räumlichen Abstand zwischen den Punkten wird dann die Reisegeschwindigkeit berechnet [KSM+05 / VO05 / SV03].

Ein Beispiel für die *Gruppe der Fahrzeug wiedererkennenden, identifizierenden Verfahren ohne spezielle On-Board-Ausrüstung* sind die optischen Systeme mit Kennzeichenerfassung. An definierten Ein- und Ausgangsquerschnitten wird jedes Fahrzeug anhand seines Kennzeichens eindeutig identifiziert und einem Zeitstempel zugeordnet. Aus der zeitlichen und räumlichen Differenz der beiden Beobachtungen werden streckenbezogene Verkehrsgrößen berechnet [Ins08 / FPS09].

Fahrzeug verfolgende Verfahren

Fahrzeug verfolgende Verfahren basieren auf dem Messprinzip, Fahrzeuge während der gesamten Fahrzeit durch den Messabschnitt zu verfolgen. Dabei ist zu jedem Zeitpunkt der aktuelle Standort des verfolgten Fahrzeugs bekannt. Die gesuchten streckenbezogenen Verkehrsgrößen können dann anhand der Bewegungstrajektorien der einzelnen Fahrzeuge ermittelt werden.

Verfolgende Verfahren unterteilen sich ebenfalls nach der Art der eingesetzten Sensorik in *anonyme* und *identifizierende* Verfahren. Bei den anonymen Verfahren ist, im Gegensatz zu den identifizierenden Verfahren, eine Identifizierung des Fahrzeughalters bzw. der Fahrzeuginsassen nicht möglich. Sowohl die *anonymen* Verfahren als auch die *identifizierenden* Verfahren unterteilen sich, analog zu den wiedererkennenden Verfahren, in Verfahren *mit* und *ohne spezielle On-Board-Ausrüstung*. Spezielle On-Board-Ausrüstung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Fahrzeuge mit Zusatzausstattung (fest installierte oder mobile Geräte) ausgerüstet sein müssen, die nicht serienmäßig in allen Fahrzeugen verfügbar ist (z.B. Mobiltelefon, PDA).

Zu der *Gruppe der Fahrzeug verfolgenden, anonymen Systeme ohne spezielle On-Board-Ausrüstung* zählt beispielsweise die luftgestützte optische Messung. Bei diesem Messverfahren transportiert eine Trägerplattform (z.B. Flugzeug, Hubschrauber, Luftschiff) eine bildgebende Messsensorik über den Messabschnitt und ermöglicht so eine luftgestützte, flächige Erfassung der Verkehrslage. Fahrzeuge werden über einen gewissen Zeitraum von der Sensorik verfolgt und aufgenommen. Unter Berücksichtigung der relativen Geschwindigkeit der Optik (z.B. Fluggeschwindigkeit), der Flughöhe und der Bildfrequenz können dann streckenbezogene Verkehrsgrößen für den Beobachtungszeitraum erhoben werden. Durch die gleichzeitige Beobachtung aller Fahrzeuge im Betrachtungsabschnitt kann dann die mittlere Reisegeschwindigkeit aller Fahrzeuge generiert werden [KRB05]. Die luftgestützte mobile Verkehrsdatenerfassung ist aufgrund der Auflösung der eingesetzten bildgebenden Messsensorik sowie des (quasi senkrechten) Aufnahmewinkels ein anonymes Messverfahren. Es lassen sich weder Insassen noch Kennzeichen identifizieren.

Die *Gruppe der Fahrzeug verfolgenden, anonymen Systeme mit spezieller On-Board-Ausrüstung* ist gegenwärtig noch nicht Stand der Technik, generell sind solche Systeme jedoch denkbar und werden ebenfalls nur der Vollständigkeit halber im Diagramm aufgeführt.

Als Beispiel für die *Gruppe der Fahrzeug verfolgenden, identifizierenden Verfahren mit spezieller On-Board-Ausrüstung* sei an dieser Stelle die Funkortung von Mobiltelefonen genannt. Ein in Deutschland eingeschaltetes Mobiltelefon ist immer einer sogenannten Location Area zuzuordnen, die ein aus ca. 50 Mobilfunkantennen bestehendes Gebiet abdeckt. Der Mobilfunkbetreiber weiß zu jedem Zeitpunkt, in welcher Location Area sich das entsprechende Mobiltelefon befindet. Übertritte von einer in eine andere Location Area werden registriert. Aus diesen Informationen lassen sich Bewegungsmuster der Mobiltelefone ableiten, die wiederum zur Generierung von streckenbezogenen Verkehrsgrößen herangezogen werden [Sch08].

Ein Beispiel für die *Gruppe der Fahrzeug verfolgenden, identifizierenden Verfahren ohne spezielle On-Board Ausrüstung* sind bildgestützte Fahrzeugverfolgungsfahrten. Ein mit entsprechendem Messequipment ausgestattetes Fahrzeug verfolgt das zu untersuchende Messobjekt (Fahrzeug). Abstand und Relativgeschwindigkeit des Messobjektes in Bezug auf das Messfahrzeug werden entweder mittels Abstandssensorik erhoben oder aber konstant gehalten. Die Bewegungstrajektorien des Messfahrzeugs werden direkt gemessen. Aus der Relativgeschwindigkeit, dem Abstand und den Bewegungstrajektorien des Messfahrzeugs lassen sich streckenbezogene Verkehrsgrößen (Bewegungstrajektorien) für das verfolgte Messobjekt berechnen. Über die Videotechnik ist eine Identifizierung des Kennzeichens und damit des Fahrzeughalters möglich [Deu11].

3.3 Stand der Technik – kurzfristige Prognoseverfahren

Im Folgenden wird ein Überblick über den Stand der Technik bei kurzfristigen Prognoseverfahren für streckenbezogene Verkehrsgrößen gegeben. Ziel der Prognoseverfahren ist es, zukünftige Verkehrsflüsse für einen definierten Prognosehorizont so zuverlässig wie möglich vorherzusagen. Alle Prognoseverfahren bestehen aus einem Prognosemodell sowie den entsprechenden Eingangsgrößen. Die Qualität der eingesetzten Eingangsdaten beeinflusst dabei entscheidend die Aussagefähigkeit des Prognoseergebnisses.

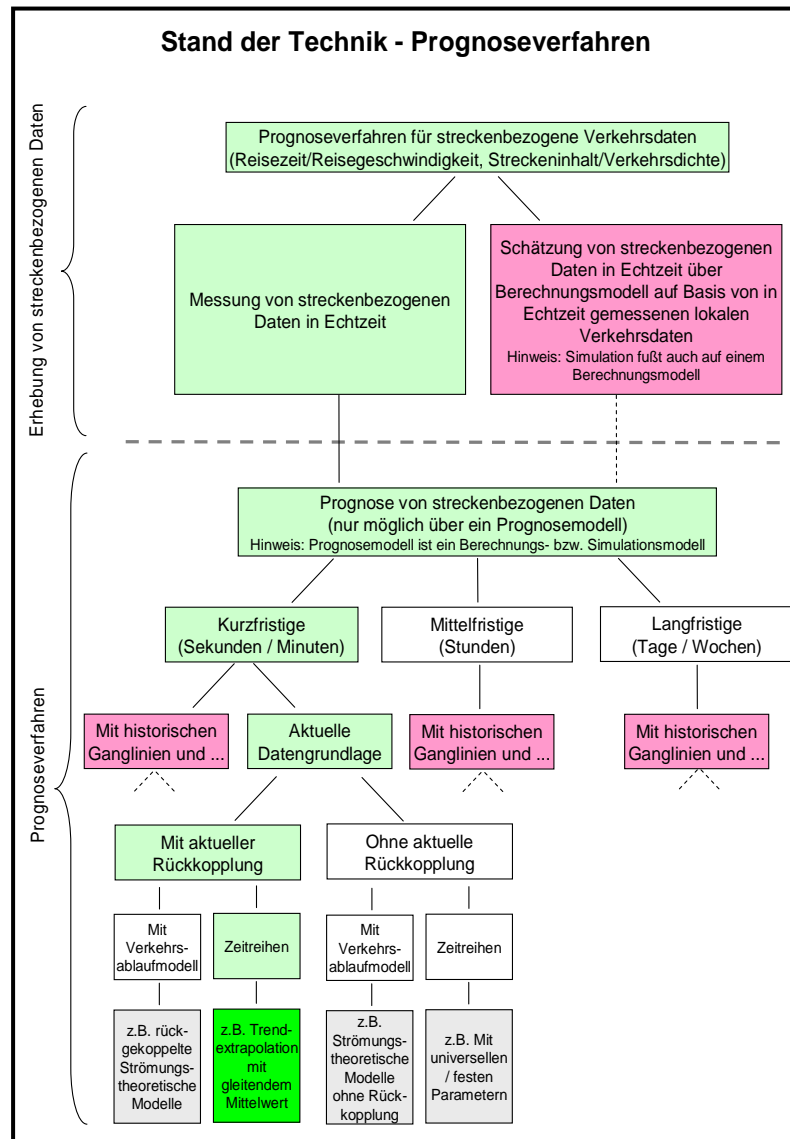


Abbildung 3-2: Baumdiagramm – kurzfristige Prognoseverfahren

Das Baumdiagramm (Abbildung 3-2) gibt den Stand der Technik für kurzfristige Prognoseverfahren wieder.

Eingangsdaten für die Prognoseverfahren zur Erzeugung von streckenbezogenen Verkehrsdaten sind aktuelle und/oder historische, streckenbezogene Verkehrsdaten. Relevanz für die im Folgenden vorgestellten Prognoseverfahren hat nur die direkte Messung von streckenbezogenen Daten (vgl. Kapitel 3.2). Auf modellbasierte Verfahren zur Schätzung / Modellierung von streckenbezogenen Daten mittels Berechnungsmodellen oder

Simulation wird im weiteren Verlauf nicht näher eingegangen (vgl. hierzu unter anderem: [For00 / Ker09 / NS92 / BJ76 / Van06]). Die auf den streckenbezogenen Daten aufbauenden Prognoseverfahren unterteilen sich nach ihrem Prognosehorizont in kurzfristige, mittelfristige und langfristige Prognoseverfahren. Dabei variiert der Prognosehorizont von Sekunden- bzw. Minutenwerten bei der kurzfristigen Prognose (bis ca. 30 Minuten), über Stundenwerte bei der mittelfristigen Prognose (bis ca. 2 Stunden) bis hin zu Tages- bzw. Wochenwerten bei der langfristigen Prognose (bis ca. 1 Woche) [For00]. Scharfe Grenzen zwischen den Prognosehorizonten existieren nicht.

Im weiteren Verlauf werden nur Prognosen mit kurzfristigem Prognosehorizont näher betrachtet, da die nachfolgend entwickelten Verfahren in diesem Bereich anzusiedeln sind. Kurzfristige Prognoseverfahren unterteilen sich in Verfahren, die ihre Prognosen unter anderem auf historischen Daten aufbauen, und in Verfahren, deren Prognosen nur auf aktuellen Daten basieren. Als historische Daten werden hierbei diejenigen Daten bezeichnet, die bereits in der Vergangenheit (z.B. vor Minuten, Stunden oder Tagen) erhoben wurden. Unter aktuellen Werten werden neben dem letzten „aktuellen“ Messwert ebenfalls Messwerte der nahen Vergangenheit verstanden. Generell gilt, dass die Gewichtung der aktuellen Daten mit steigendem Prognosehorizont abnimmt. Prognosen mit kurzfristigem Zeithorizont basieren maßgeblich auf aktuellen Daten [For03]. Im weiteren Verlauf werden nur Verfahren betrachtet, deren Prognose auf aktuellen Daten basiert. Diese unterteilen sich in Verfahren mit und ohne Rückkopplung. Bei den Verfahren ohne Rückkopplung findet kein Vergleich der prognostizierten Ergebnisse mit den, mit zeitlichem Verzug gemessenen, tatsächlichen Messwerten statt. Eine Anpassung (Lernprozess) des Verfahrens bzw. der zugrunde gelegten Randbedingungen ist nicht möglich. Es kann zu einer Fehlerfortpflanzung kommen. Bei Verfahren mit aktueller Rückkopplung werden die Prognosewerte mit den zeitlich nachlaufenden Messwerten verglichen. In die neue Prognose fließen nur die aktuellen Messwerte ein, alte Prognosewerte haben keinen Einfluss. Eine Fehlerfortpflanzung ist nicht möglich, da fehlerhafte Prognosewerte bei der nächsten Prognose durch Messwerte ersetzt werden. Sowohl die rückgekoppelten als auch die Verfahren ohne Rückkopplung können unterschieden werden in Verfahren mit und ohne Anwendung eines Verkehrsmodells. Verfahren ohne Verkehrsmodell basieren auf einer Zeitreihenanalyse. Verkehrliche Randbedingungen bleiben hierbei unberücksichtigt. Bei Verfahren mit Verkehrsmodell werden hingegen spezielle verkehrliche Randbedingungen berücksichtigt.

Beispiele für kurzfristige Prognoseverfahren unter Verwendung von Verkehrsmodellen sind strömungstheoretische Modelle mit und ohne Rückkopplung. Ein Beispiel für ein kurzfristiges Prognoseverfahren mit Rückkopplung basierend auf einer Zeitreihenanalyse ist die Trendextrapolation unter Berücksichtigung eines gleitenden Mittelwertes, wie sie auch in dem im Folgenden vorgestellten Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren eingesetzt wird. Dokumentiert sind solche Verfahren beispielsweise in dem MARZ 99 [Bun99 / Her01]. Beispiele für kurzfristige Verfahren ohne Rückkopplung basierend auf Zeitreihen sind Zeitreihenuntersuchungen mit universellen (festen) Parametern.

Nicht immer lassen sich das Verfahren zur Erhebung von streckenbezogenen Verkehrsdaten und das darauf aufbauende Prognoseverfahren eindeutig trennen (sequentielle Verfahren). Bei einigen komplexen Prognoseverfahren findet eine Vernetzung beider Schritte statt (parallele Verfahren).

3.4 Zusammenfassung „Stand der Technik“

Das vorangegangene Kapitel gibt einen kurzen Überblick über den Stand der Technik in den Bereichen der streckenbezogenen Verkehrsdatenerhebung und der kurzfristigen Prognoseverfahren. Der Fokus liegt dabei auf den Bereichen, die besondere Relevanz für die in den folgenden Kapiteln eingesetzte Datenbasis sowie die dort vorgestellten Verfahren haben.

Die entwickelten Verfahren sind der Gruppe der rückgekoppelten kurzfristigen Prognoseverfahren zuzuordnen, die auf aktuellen Eingangsdaten sowie Zeitreihen basieren. Ein Vorteil von rückgekoppelten Prognoseverfahren besteht darin, dass eine Fehlerfortpflanzung verfahrensbedingt nahezu ausgeschlossen ist. Die Gültigkeit möglicher fehlerhafter Prognosewerte ist auf die Dauer des zugrunde gelegten Prognoseintervalls begrenzt.

Die in der Datenbasis zur Verfügung stehenden Verkehrsgrößen, die als Eingangsgrößen in den entwickelten Prognoseverfahren eingesetzt werden, beruhen auf einem „Fahrzeug wiedererkennenden“ Messverfahren mit dem Sensor Induktionsschleifen. Damit sind sowohl die lokalen als auch die streckenbezogenen Verkehrsgrößen der verwendeten Datenbasis erhoben worden. Das Verfahren ist den anonymen Messverfahren zuzuordnen, die ohne spezielle On-Board-Ausrüstung arbeiten und auf Korrelationsmesstechnik basieren.

4 Störfallanalyse

Ziel: Ziel dieses Kapitels ist es, die Auswirkungen verschiedener Störfälle auf den Verkehrszustand im Betrachtungsabschnitt zu untersuchen.

Dazu werden die Auswirkungen anhand der Lage der ausschlaggebenden Störfallursache sowie des weiteren Verlaufs der Störfallausbreitung klassifiziert. Bei den einzelnen Analysen wird jeweils nur eine Störfallursache betrachtet.

4.1 Vorgehensweise Störfallanalyse

Grundlage für die im weiteren Verlauf der Arbeit vorgestellten Verfahren zur Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose sowie zur Staulängenberechnung sind fundierte Kenntnisse über den im Betrachtungsabschnitt herrschenden Verkehrszustand.

Um einen möglichst genauen Überblick der möglichen Störfallsituation im Betrachtungsabschnitt zu bekommen, wird eine Untersuchung des gestörten Betrachtungsabschnitts auf zwei unterschiedlichen Ebenen durchgeführt. Die übergeordnete wird im Folgenden Betrachtungsabschnitts-, die untergeordnete Teilabschnittsebene genannt.

Bei einer Untersuchung auf Betrachtungsabschnittsebene wird der gesamte Betrachtungsabschnitt selbst als kleinste Einheit angesehen. Die Einheit erstreckt sich somit vom Ein- bis zum Ausgangsquerschnitt ($MQ_x - MQ_y$). Eine weitere Unterteilung findet nicht statt. Bei einer Untersuchung auf Teilabschnittsebene hingegen werden die Teilabschnitte als kleinste Einheit betrachtet, die sich störfallbedingt im Betrachtungsabschnitt ausbilden können. Die Summe aller Teilabschnitte bildet den Betrachtungsabschnitt.

Nachfolgend wird bei der Analyse der Störfälle bzw. deren Auswirkungen vorausgesetzt, dass jeweils nur eine Störfallursache zugrunde liegt. Liegen gleichzeitig mehrere Störfallursachen zugrunde, kann es zu Überlagerungseffekten kommen. Zur Analyse von Überlagerungseffekte ist es ebenfalls sinnvoll, zunächst die Auswirkungen der zugrunde liegenden einzelnen Störfallursachen gesondert zu betrachten, um dann Aussagen zu den überlagerten Störfallsituationen bzw. deren Auswirkungen abzuleiten. Eine Betrachtung von überlagerten Auswirkungen ist nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

4.2 Störfallanalyse auf Betrachtungsabschnittsebene

Bei der Störfallanalyse auf Betrachtungsabschnittsebene wird, wie zuvor ausgeführt, der Betrachtungsabschnitt als kleinste Einheit angesehen. Eine weitere Unterteilung des Betrachtungsabschnitts in Teilabschnitte findet nicht statt.

Ziel dieser Analyse ist es zu untersuchen, ob eine Störung des Verkehrsflusses im Betrachtungsabschnitt vorliegt und wo sich ggf. der Störfall gebildet hat.

Hierbei wird eine Störung des Verkehrsflusses im Betrachtungsabschnitt auf nur eine ausschlaggebende Störfallursache zurückgeführt. Es können folgende Fälle unterschieden werden:

- Störfall entsteht im stromabwärts liegenden Abschnitt
- Störfall entsteht im Betrachtungsabschnitt
- Störfall entsteht im stromaufwärts liegenden Abschnitt

In Abhängigkeit vom Entstehungsort des Störfalls wächst die Störung in den Betrachtungsabschnitt hinein oder aber bildet sich im Betrachtungsabschnitt selbst. Als Indikatoren, um festzustellen, ob eine Störung im Betrachtungsabschnitt vorliegt und wo sich ggf. der Störfall gebildet hat, werden im Weiteren die über den Betrachtungsabschnitt gemittelte streckenbezogene Reisegeschwindigkeit V_s sowie die lokal gemessenen Geschwindigkeiten am Ein- und Ausgangsquerschnitt (v_{MQ_x} , v_{MQ_y}) herangezogen.

4.2.1 Störfall entsteht im stromabwärts liegenden Abschnitt

Kommt es aufgrund einer Störfallursache im stromabwärts liegenden Abschnitt zu einer Stauung, infolge deren der Ausgangsquerschnitt MQ_y des Betrachtungsabschnitts überstaut wird, so wächst der Stau entgegen der Fahrtrichtung in den Betrachtungsabschnitt hinein (vgl. Abbildung 4-1).

Dieses Stauphänomen zeigt sich im Betrachtungsabschnitt dadurch, dass die lokal gemessene Geschwindigkeit v_{MQ_y} vor der streckenbezogenen Reisegeschwindigkeit V_s einbricht. Folgt den Einbrüchen von v_{MQ_y} und V_s mit einem zeitlichen Nachlauf zusätzlich ein Einbruch der lokal gemessenen Geschwindigkeit v_{MQ_x} am Eingangsquerschnitt, liegt eine vollständige Überstauung des Betrachtungsabschnitts vor. Die Störfallursache befindet sich dann im stromabwärts liegenden Abschnitt.

Steigt jedoch die lokale Geschwindigkeit am Ausgangsquerschnitt v_{MQ_y} wieder signifikant an, bei gleichbleibend niedrigem Niveau der streckenbezogenen Reisegeschwindigkeit V_s , so ist die Störfallursache in den Betrachtungsabschnitt hineingewandert.

Mögliche Störfallursachen im stromabwärts liegenden Abschnitt, die zu einer Rückstauung entgegen der Fahrtrichtung in den Betrachtungsabschnitt hineinführen, sind vielfältig. Generell kann jede Ursache einen solchen Störfall hervorrufen, bei der es zu einer Rückstauung kommt. Beispielhaft seien hier eine hohe Verkehrsdichte, die zu einem sogenannten Stau aus dem Nichts führen kann, sowie Unfälle bzw. Arbeitsstellen genannt.

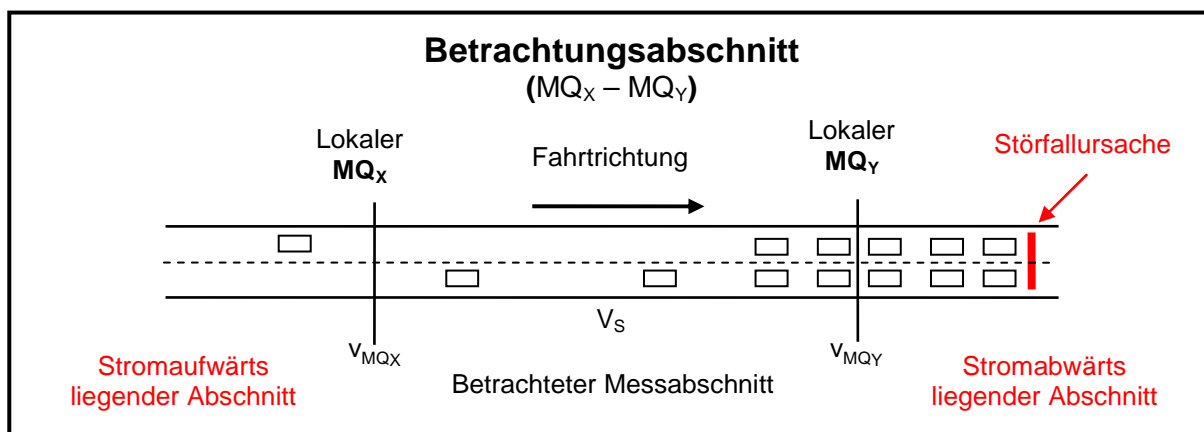


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung – Störfall entsteht im stromabwärts liegenden Abschnitt

4.2.2 Störfall entsteht im Betrachtungsabschnitt

Kommt es aufgrund einer Störfallursache im Betrachtungsabschnitt zu einer Rückstauung oder aber zu einer sich in Fahrtrichtung ausbreitenden Stauung, so ergeben sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten der Störfallausbreitung:

- Stau manifestiert sich am Ein- bzw. Ausgangsquerschnitt
- Stau manifestiert sich nicht am Ein- bzw. Ausgangsquerschnitt

Stau manifestiert sich am Ein- bzw. Ausgangsquerschnitt

Unter dem Begriff „manifestieren“ wird im Folgenden verstanden, dass sich die Auswirkungen der Störfallursache im Betrachtungsabschnitt am Ein- bzw. Ausgangsquerschnitt anhand signifikant abnehmender lokaler Geschwindigkeiten v_{MQ_X} oder v_{MQ_Y} zeigen.

Für den Eingangsquerschnitt MQ_X ist dieses genau dann der Fall, wenn die Anzahl der sich vor dem Störfall stauenden Fahrzeuge derart zunimmt, dass MQ_X überstaut wird (Abbildung 4-2). Dieses Stauphänomen zeigt sich im Betrachtungsabschnitt dadurch, dass zuerst die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit V_S einbricht. Mit einem zeitlichen Nachlauf bricht ebenfalls die lokal gemessene Geschwindigkeit v_{MQ_X} am Eingangsquerschnitt ein. Die lokal gemessene Geschwindigkeit am Ausgangsquerschnitt v_{MQ_Y} bleibt unverändert hoch. Die Störfallursache befindet sich dann zu jedem Zeitpunkt im Betrachtungsabschnitt.

Mögliche Störfallursachen im Betrachtungsabschnitt, die zu einer Überstauung des Eingangsquerschnitts führen, sind vielfältig. Generell kann jede Ursache einen solchen Störfall hervorrufen, bei der es zu einer Rückstauung kommt. Häufige Ursachen sind wiederum beispielsweise hohe Verkehrsdichten, die zu einem sogenannten Stau aus dem Nichts führen können, sowie Unfälle bzw. Arbeitsstellen.

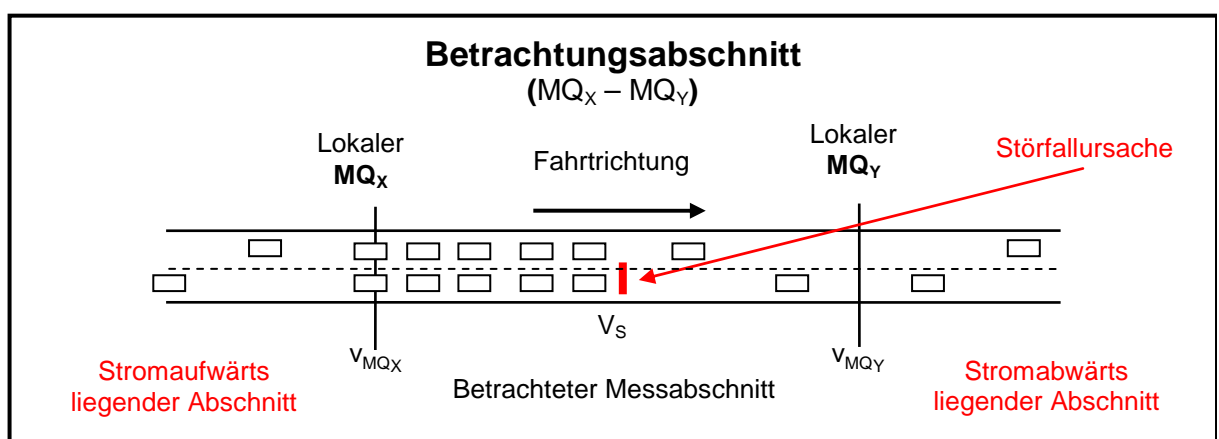


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung – Störfall entsteht im Betrachtungsabschnitt (Stau manifestiert sich am Eingangsquerschnitt)

Zu einer Überstauung des Ausgangsquerschnitts MQ_Y und damit zu einer Manifestierung der Stauung kommt es dann, wenn die Störfallursache ein bewegliches Hindernis ist, das nicht oder nur schwer überholt werden kann (vgl. Abbildung 4-3). Hinter dem beweglichen

Hindernis stauen sich die auflaufenden Fahrzeuge. Die so entstehende Stauung bewegt sich mit der Geschwindigkeit des beweglichen Hindernisses in Fahrtrichtung. Sobald das bewegliche Hindernis den Ausgangsquerschnitt MQ_Y erreicht hat, manifestiert sich die Stauung.

Dieses Stauphänomen zeigt sich im Betrachtungsabschnitt dadurch, dass zuerst die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit V_S einbricht. Mit einem zeitlichen Nachlauf bricht dann die lokal gemessene Geschwindigkeit v_{MQ_Y} am Ausgangsquerschnitt ein. Bis zu dem Augenblick, an dem die lokal gemessene Geschwindigkeit v_{MQ_Y} am Ausgangsquerschnitt einbricht, befindet sich die Störfallursache im Betrachtungs-, danach im stromabwärts liegenden Abschnitt.

Mögliche Störfallursachen im Betrachtungsabschnitt, die zu einer Überstauung des Ausgangsquerschnitts führen, sind beispielsweise langsam fahrende Schwertransporter oder Wanderbaustellen, die nicht oder nur schwer überholt werden können.

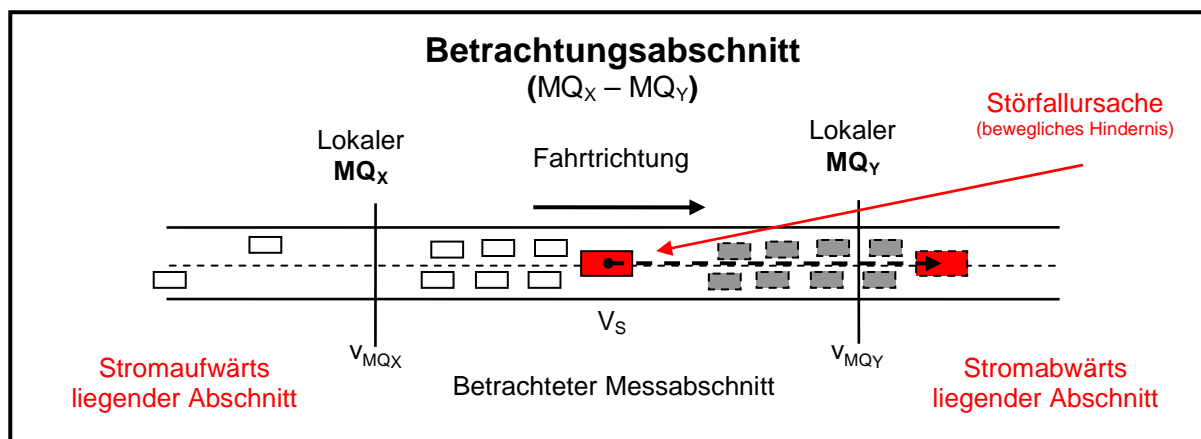


Abbildung 4-3: Schematische Darstellung – Störfall entsteht im Betrachtungsabschnitt (Stau manifestiert sich am Ausgangsquerschnitt)

Stau manifestiert sich weder am Ein- noch am Ausgangsquerschnitt

Kommt es aufgrund einer Störfallursache im Betrachtungsabschnitt zu einer Stauung im Betrachtungsabschnitt, die sich nicht signifikant ausbreitet und dennoch über einen längeren Zeitraum existent ist, so kann dies dazu führen, dass sich die Stauung weder am Ein- noch am Ausgangsquerschnitt manifestiert (Abbildung 4-4).

Dieses Stauphänomen, im Weiteren als Fließgleichgewicht bezeichnet, zeigt sich im Betrachtungsabschnitt dadurch, dass die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit V_S einbricht und die lokal gemessenen Geschwindigkeiten am Ein- und Ausgangsquerschnitt (v_{MQ_X} , v_{MQ_Y}) gleichzeitig unverändert hoch bleiben. Die Störfallursache befindet sich zu jedem Zeitpunkt im Betrachtungsabschnitt.

Mögliche Störfallursachen, die zu einem Fließgleichgewicht führen können, sind vielfältig. Generell kann jede Ursache ein solches Fließgleichgewicht hervorrufen, die zu einer temporären Verringerung der Kapazität (z.B. durch Wegfall eines Fahrstreifens) am Störfallquerschnitt führt. Entspricht der Zufluss dem Abfluss vom Störfallquerschnitt, stellt sich ein Fließgleichgewicht ein.

Mögliche Ursachen sind beispielsweise Unfälle, verloren gegangene Ladung sowie Arbeitsstellen.

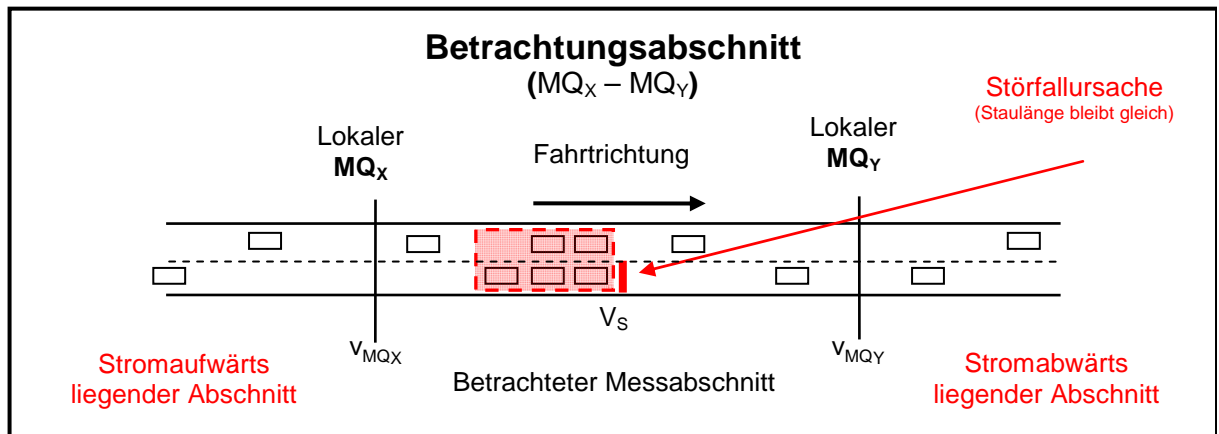


Abbildung 4-4: Schematische Darstellung – Störfall entsteht im Betrachtungsabschnitt (Stau manifestiert sich weder am Ein- noch am Ausgangsquerschnitt)

4.2.3 Störfall entsteht im stromaufwärts liegenden Abschnitt

Kommt es im stromaufwärts liegenden Abschnitt zu einer Stauung aufgrund einer beweglichen Störfallursache, so kann die bewegliche Störfallursache stromabwärts über den Eingangsquerschnitt in den Betrachtungsabschnitt hineinwandern.

Dieses ist genau dann der Fall, wenn die Störfallursache ein bewegliches Hindernis ist, das nicht oder nur schwer überholt werden kann (vgl. Abbildung 4-5) und hinter dem sich die auflaufenden Fahrzeuge stauen. Die so entstehende Stauung bewegt sich mit der Geschwindigkeit des beweglichen Hindernisses in Fahrtrichtung. Sobald das bewegliche Hindernis den Eingangsquerschnitt erreicht hat, manifestiert sich die Stauung. Dieses Stauphänomen zeigt sich im Betrachtungsabschnitt dadurch, dass zuerst die lokal gemessene Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt v_{MQx} einbricht. Mit einem zeitlichen Nachlauf bricht dann die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit V_s ein.

Bis zu dem Zeitpunkt, an dem sich die Stauung am Eingangsquerschnitt manifestiert, befindet sich die Störfallursache im stromaufwärts liegenden Abschnitt, danach im Betrachtungsabschnitt selbst.

Sobald das bewegliche Hindernis im Betrachtungsabschnitt angekommen ist, kann dieses Stauphänomen in das Stauphänomen „Störfall entsteht im Betrachtungsabschnitt - Stau manifestiert sich am Ein- bzw. Ausgangsquerschnitt“ (vgl. Kapitel 4.2.2) überführt werden.

Mögliche Störfallursachen im Betrachtungsabschnitt, die zu einer Überstauung des Eingangsquerschnitts führen, sind beispielsweise langsam fahrende Schwertransporter oder Wanderbaustellen, die nicht oder nur schwer überholt werden können.

Generell ist anzumerken, dass dieses Stauphänomen nur schwer von einem Störfall zu unterscheiden ist, der sich stromabwärts kurz hinter dem Eingangsquerschnitt im Betrachtungsabschnitt selbst ereignet hat. Auch bei einem solchen Störfall kann es dazu

kommen, dass die lokal gemessene Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt v_{MQ_X} vor der streckenbezogenen Reisegeschwindigkeit V_S einbricht.

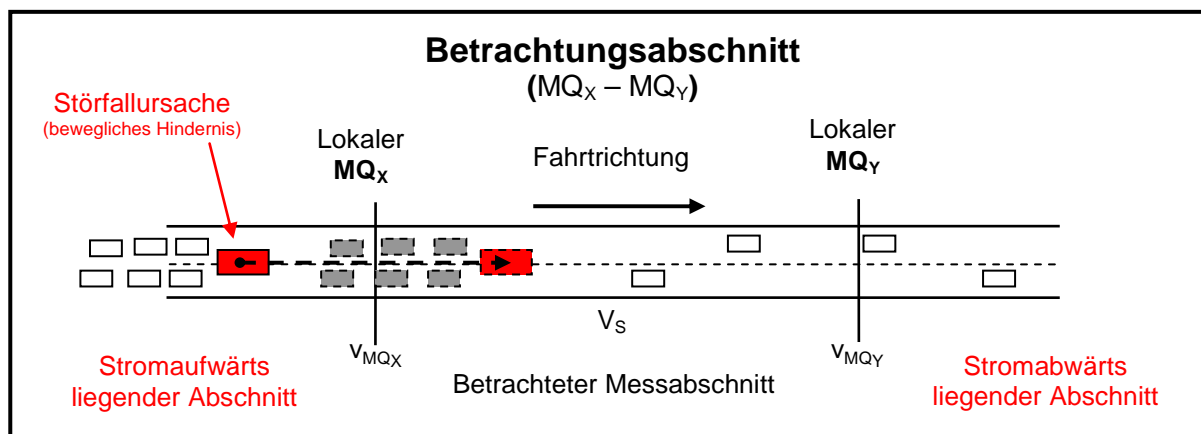


Abbildung 4-5: Schematische Darstellung – Störfallursache im stromaufwärts liegenden Abschnitt

4.3 Störfallanalyse auf Teilabschnittsebene

Ziel der Störfallanalyse auf Teilabschnittsebene ist es, den Verkehrszustand innerhalb des Betrachtungsabschnitts detailliert zu untersuchen. Dazu werden sowohl die aktuellen Lagen als auch die möglichen Bewegungsrichtungen des Stauanfangs und des Stauendes betrachtet.

Die Störfallanalyse auf Teilabschnittsebene ermöglicht eine räumlich detailliertere Auflösung des Verkehrszustandes innerhalb des Betrachtungsabschnitts, als dieses mit der Störfallanalyse auf Betrachtungsabschnittsebene möglich ist. Der Verkehrszustand des gesamten Betrachtungsabschnitts wird dabei weiter in die Verkehrszustände der einzelnen Teilabschnitte unterteilt, die nun die kleinste betrachtete Einheit bilden. Vereinfachend wird für diese Störfallanalyse angenommen, dass der Verkehrsfluss in den Teilabschnitten homogen und stationär ist und sich nur freie oder gestörte Verkehrszustände einstellen können.

Die Anzahl der möglichen Teilabschnitte, die sich im Betrachtungsabschnitt einstellen können, ist von der Lage sowie der Anzahl der Störfallursachen abhängig.

Eine Analyse der möglichen Lagen der ausschlaggebenden Störfallursachen (vgl. Kapitel 4.2) ergibt, dass sich diese im stromabwärts liegenden Abschnitt, im Betrachtungsabschnitt selbst sowie im stromaufwärts liegenden Abschnitt befinden können.

Bei den nachfolgenden weitergehenden Analysen wird jeweils nur eine ausschlaggebende Störfallursache untersucht. Es befinden sich somit höchstens ein Stauanfang und ein Stauende innerhalb des Betrachtungsabschnitts. Dies führt dazu, dass sich der Betrachtungsabschnitt aus maximal drei Teilabschnitten zusammensetzen kann. In Abhängigkeit von der Anzahl der potentiellen Teilabschnitte kann somit der Verkehrszustand innerhalb des Betrachtungsabschnitts vereinfacht anhand von 1-, 2- und 3-Bereichsmodellen untersucht werden.

4.3.1 Eingeschwungene Verkehrszustände und Übergangszustände

Sind über einen gewissen Zeitraum keine signifikanten Veränderungen der Lage des Stauanfangs oder des Stauendes innerhalb des Betrachtungsabschnitts zu beobachten, so werden diese Fälle im Weiteren als eingeschwungene Verkehrszustände bezeichnet.

Bei eingeschwungenen Verkehrszuständen verändert sich weder die Lage noch die Länge der Stauung, ein Fließgleichgewicht stellt sich ein. Bei einem Fließgleichgewicht entspricht die Anzahl der Fahrzeuge, die in den Betrachtungsabschnitt hineinfahren, der Anzahl der Fahrzeuge, die aus dem Betrachtungsabschnitt hinausfahren. Eingeschwungene Verkehrszustände sind als relativ stabil zu bewerten, da unter gleichbleibenden Randbedingungen keine Veränderung des Verkehrszustandes im Betrachtungsabschnitt zu erwarten ist.

Sind hingegen über einen gewissen Zeitraum signifikante Veränderungen der Lage des Stauanfangs und des Stauendes im Betrachtungsabschnitt zu beobachten, so werden diese Zustände im Folgenden als Übergangszustände bezeichnet. Bewegen sich der im Betrachtungsabschnitt liegende Stauanfang bzw. das Stauende, so herrscht kein Fließgleichgewicht für den Betrachtungsabschnitt. Die Anzahl der Fahrzeuge, die in den Betrachtungsabschnitt hineinfahren, entspricht nicht der Anzahl der abfließenden Fahrzeuge. Übergangszustände sind als instabil zu bewerten, da unter gleichbleibenden Randbedingungen Veränderungen des Verkehrszustandes im Betrachtungsabschnitt zu erwarten sind.

Bei einem Wechsel von einem eingeschwungenen Verkehrszustand in einen anderen stellt sich zwischenzeitlich immer ein Übergangszustand ein.

4.3.2 1-Bereichsmodell

Der Begriff „Bereichsmodell“ in Kombination mit einer Zahl (1-, 2-, 3- und n-) wird im Weiteren zur Unterscheidung verschiedener Störfallsituationen im Betrachtungsabschnitt eingesetzt. Dabei gibt die Zahl die Anzahl der Teilabschnitte an, aus denen sich der Betrachtungsabschnitt zusammensetzt.

Bei einem 1-Bereichsmodell herrscht im gesamten Betrachtungsabschnitt der gleiche Verkehrszustand. Es gibt keine Teilabschnitte. 1-Bereichsmodelle liegen dann vor, wenn entweder der gesamte Betrachtungsabschnitt überstaut ist oder aber wenn im gesamten Betrachtungsabschnitt freier Verkehrsfluss herrscht.

Die Fälle 0 und 4 in Abbildung 4-6 zeigen schematisch die möglichen eingeschwungenen Verkehrszustände in einem 1-Bereichsmodell. Weder der Stauanfang (rote durchgezogene Linie) noch das Stauende (rote gepunktete Linie) liegen bei einem 1-Bereichsmodell im Betrachtungsabschnitt selbst.

Wandert ein Stauanfang oder ein Stauende in den Betrachtungsabschnitt hinein, so bildet sich ein 2-Bereichsmodell. Die Fälle 0a und 0b sowie 4a und 4b in Abbildung 4-6 zeigen schematisch die mögliche Zusammensetzung der Übergangszustände.

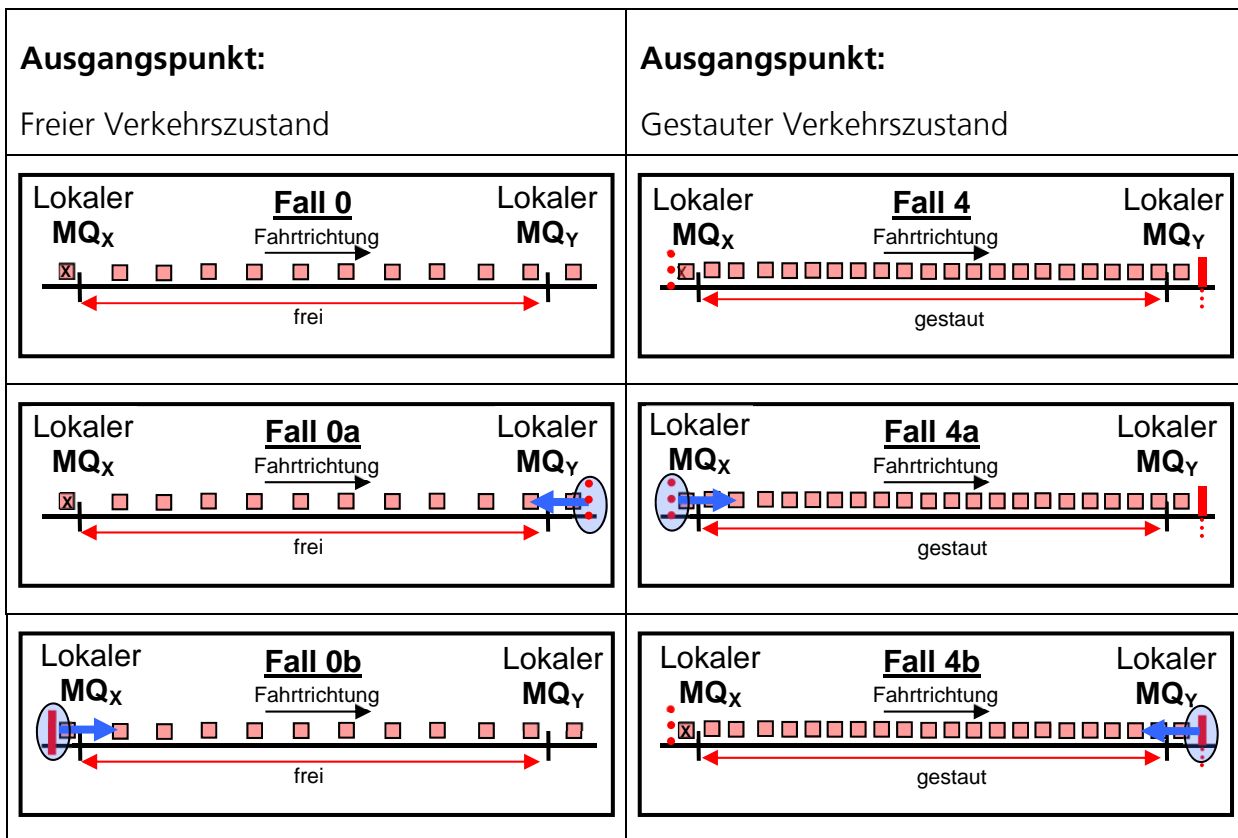


Abbildung 4-6: Schematische Darstellung des 1-Bereichsmodells

4.3.3 2-Bereichsmodell

Bei einem 2-Bereichsmodell besteht der Betrachtungsabschnitt aus zwei Teilabschnitten mit unterschiedlichen Verkehrszuständen (gestaut und frei). Ein 2-Bereichsmodell liegt dann vor, wenn entweder der Eingangsquerschnitt überstaut ist und am Ausgangsquerschnitt freier Verkehrsfluss herrscht oder im umgekehrten Zustand.

Die Fälle 1 und 2 in Abbildung 4-7 zeigen schematisch die möglichen eingeschwungenen Verkehrszustände in einem 2-Bereichsmodell.

Bei einem 2-Bereichsmodell liegt entweder das Stauende oder der Stauanfang im Betrachtungsabschnitt. Wandert der sich im Betrachtungsabschnitt befindende Stauanfang bzw. das Stauende aus dem Betrachtungsabschnitt hinaus, so bildet sich wieder ein 1-Bereichsmodell. Die Fälle 1b und 2a in Abbildung 4-7 zeigen schematisch die möglichen Übergangszustände in diesen Fällen.

Wandert ein sich nicht im Betrachtungsabschnitt befindender Stauanfang bzw. ein sich nicht befindendes Stauende zusätzlich in den Betrachtungsabschnitt hinein, so bildet sich ein 3-Bereichsmodell. Die Fälle 1a und 2b in Abbildung 4-7 zeigen schematisch die möglichen Übergangszustände in diesen Fällen.

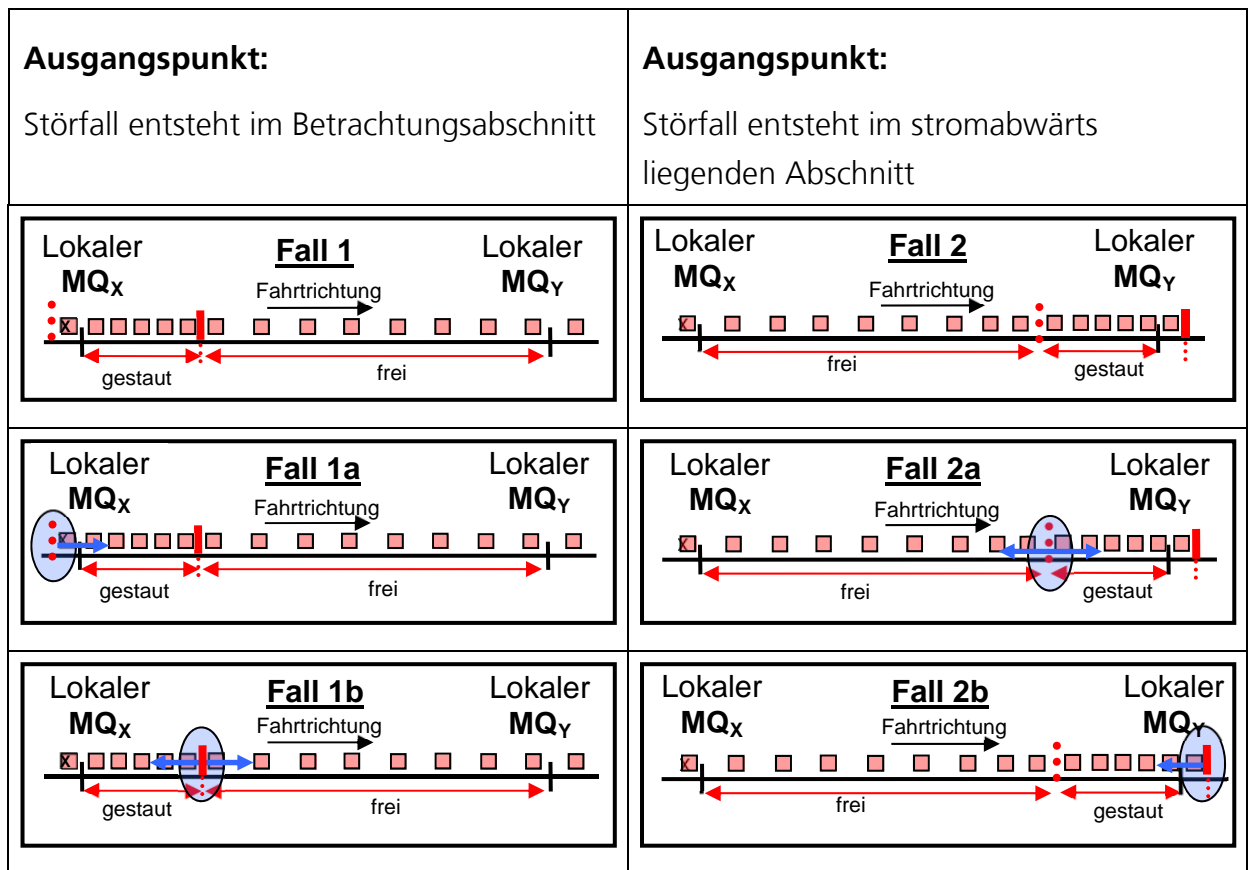


Abbildung 4-7: Schematische Darstellung des 2-Bereichsmodells

4.3.4 3-Bereichsmodell

Bei einem 3-Bereichsmodell setzt sich der Betrachtungsabschnitt aus drei Teilabschnitten zusammen. Unter den getroffenen Annahmen herrscht in zweien der drei Teilabschnitte ein freier, im dritten Teilabschnitt ein gestörter Verkehrszustand. Weder der Ein- noch der Ausgangsquerschnitt sind bei einem 3-Bereichsmodell überstaut. Sowohl der Stauanfang als auch das Stauende liegen im Betrachtungsabschnitt.

Der Fall 3 in Abbildung 4-8 zeigt schematisch die Zusammensetzung des möglichen eingeschwungenen Verkehrszustandes in einem 3-Bereichsmodell.

Wandert der Stauanfang oder das Stauende aus dem Betrachtungsabschnitt hinaus, so bildet sich ein 2-Bereichsmodell (vgl. Fall 1b bzw. Fall 2b in Abbildung 4-8). Die Fälle 3a und 3b in Abbildung 4-8 zeigen schematisch die möglichen Übergangszustände.

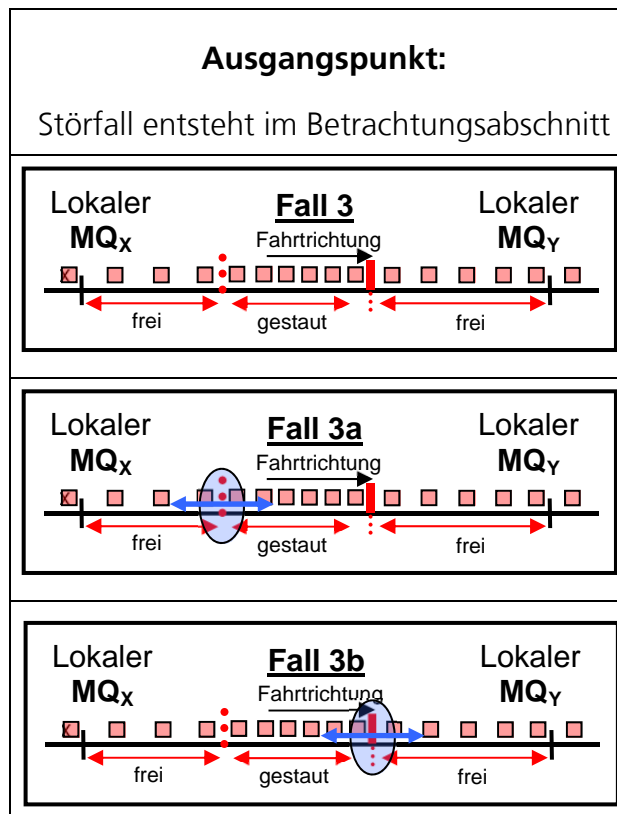


Abbildung 4-8: Schematische Darstellung des 3-Bereichsmodells

4.4 Zusammenfassung „Störfallanalyse“

Das vorangegangene Kapitel zeigt die Auswirkungen verschiedener Störfälle auf den Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt. Dazu werden die Störfallauswirkungen anhand der Lage der ausschlaggebenden Störfallursache sowie des weiteren Verlaufs der Störfallausbreitung analysiert. Die Analysen finden auf zwei unterschiedlichen Ebenen, der Betrachtungsabschnittsebene und der Teilabschnittsebene, statt.

Bei der übergeordneten Analyse auf Betrachtungsabschnittsebene bildet der Betrachtungsabschnitt selbst die kleinste Betrachtungseinheit. Das Ergebnis der Störfallanalyse auf Betrachtungsabschnittsebene gibt Auskunft über die Lage der für die Störung im Betrachtungsabschnitt ausschlaggebenden Störfallursache.

Ausschlaggebende Störfallursache	gemessene Geschwindigkeiten			Lage des Störfalls		
	(anfängliche Lage)	(lokal am MQ _x)	(streckenbezogen für den Betrachtungsabschnitt)	(lokal am MQ _y)	(Stauende)	(Stauanfang)
stromabwärts	frei	frei	frei	gestört	wandert gerade stromaufwärts in den Betrachtungsabschnitt hinein	stromabwärts außerhalb des Betrachtungsabschnitts
	frei	frei	gestört	gestört	im Betrachtungsabschnitt	stromabwärts außerhalb des Betrachtungsabschnitts
	gestört	gestört	gestört	gestört	stromaufwärts außerhalb des Betrachtungsabschnitts	stromabwärts außerhalb des Betrachtungsabschnitts
im Betrachtungsabschnitt	frei	gestört	frei	frei	im Betrachtungsabschnitt	im Betrachtungsabschnitt
	gestört	gestört	frei	frei	stromaufwärts außerhalb des Betrachtungsabschnitts	im Betrachtungsabschnitt
stromabwärts	gestört	frei	frei	frei	stromaufwärts außerhalb des Betrachtungsabschnitts	wandert gerade stromabwärts in den Betrachtungsabschnitt hinein

Abbildung 4-9: Lagebetrachtung der Störfälle (Betrachtungsabschnittsebene)

Als Indikator für einen gestörten Verkehrszustand im Betrachtungsabschnitt werden die lokal gemessenen Geschwindigkeiten am Ein- und Ausgangsquerschnitt (v_{MQ_x} , v_{MQ_y}) sowie die streckenbezogen gemessene Reisegeschwindigkeit V_s herangezogen, die für den Betrachtungsabschnitt aus der Datenbasis verfügbar sind. Aufgrund der gewählten Betrachtungseinheit bei der Störfallanalyse auf Betrachtungsabschnittsebene kann die Lage der Störfallursache dem stromabwärts liegenden Abschnitt, dem Betrachtungsabschnitt selbst oder dem stromaufwärts liegenden Abschnitt zugeordnet werden. Abbildung 4-9 fasst tabellarisch die Ergebnisse auf Betrachtungsabschnittsebene zusammen.

Bei der Störfallanalyse auf Teilabschnittsebene wird der Betrachtungsabschnitt weiter in Teilabschnitte unterteilt. Diese bilden hier die kleinste Betrachtungseinheit. Durch die Unterteilung kann eine räumlich detailliertere Auflösung des gestörten Verkehrszustandes im Betrachtungsabschnitt durchgeführt werden. In Abhängigkeit von der Lage der ausschlaggebenden Störfallursache sowie dem weiteren Verlauf der daraus resultierenden Stauung wird der Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt analysiert. Maßgebend für die weitere Betrachtung ist dabei die Lage des Stauanfanges sowie des Stauendes. Als Ergebnis der Störfallanalyse auf Teilabschnittsebene kann der Verkehrszustand im Betrachtungsabschnitt vereinfacht einem 1-, 2- oder 3-Bereichsmodell zugeordnet werden. Hierbei wird zwischen eingeschwungenen Verkehrszuständen und Übergangszuständen unterschieden. Abbildung 4-10 fasst tabellarisch die Ergebnisse der Analysen auf Teilabschnittsebene zusammen.

Fall		Lage des Störfalls (im Betrachtungsabschnitt)		Eingangs- querschnitt	Strecke (MQ _x -MQ _y)	Ausgangs- querschnitt	Anzahl der Teilabschnitte vorher		Einordnung
(vorher)	(nachher)	Stauende verschiebt sich	Stauanfang verschiebt sich	(lokaler MQ _x)	"/" = unterteilt den Betrachtungsabschnitt in Teilabschnitte	(lokaler MQ _y)	(vorher)	(nachher)	Übergangszustand (ÜZ) oder eingeschwungener Zustand (EZ)
0		-	-	frei	frei	frei	Nullfall		
	0	-	-	frei	frei	frei	1	1	EZ
	0a	ja	-	frei	frei / gestört	gestört	1	2	ÜZ
	0b	-	ja	gestört	gestört / frei	frei	1	2	ÜZ
1		-	-	gestört	gestört / frei	frei	Nullfall		
	1	-	-	gestört	gestört / frei	frei	2	2	EZ
	1a	ja	-	frei	frei / gestört / frei	frei	2	3	ÜZ
	1b	-	ja	frei	frei	frei	2	1	ÜZ
		-	ja	gestört	gestört	gestört	2	1	
2		-	-	frei	frei / gestört	gestört	Nullfall		
	2	-	-	frei	frei / gestört	gestört	2	2	EZ
	2a	ja	-	gestört	gestört	gestört	2	1	ÜZ
		ja	-	frei	frei	frei	2	1	
	2b	-	ja	frei	frei / gestört / frei	frei	2	3	ÜZ
3		-	-	frei	frei / gestört / frei	frei	Nullfall		
	3	-	-	frei	frei / gestört / frei	frei	3	3	EZ
	3a	ja	-	gestört	gestört / frei	frei	3	2	ÜZ
		ja	-	frei	frei	frei	3	1	
	3b	-	ja	frei	frei	frei	3	1	ÜZ
		-	ja	frei	frei / gestört	gestört	3	2	
4		-	-	gestört	gestört	gestört	Nullfall		
	4	-	-	gestört	gestört	gestört	1	1	EZ
	4a	ja	-	frei	frei / gestört	gestört	1	2	ÜZ
	4b	-	ja	gestört	gestört / frei	frei	1	2	ÜZ

Abbildung 4-10: Lagebetrachtung der Störfälle (Teilabschnittsebene)

Die in diesem Kapitel dargestellten Unterscheidungen möglicher Störfallsituationen fließen zum einen in die im weiteren Verlauf vorgestellten Prognoseverfahren ein. Zum anderen werden sie zur gezielten Auswahl von Störfallsituationen („ausgesuchte Störfallsituationen“) aus der Datenbasis zur Überprüfung der Verfahren herangezogen.

5 Ausgesuchte Störfallsituationen

Ziel: Im nachfolgenden Kapitel wird der Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt für ausgesuchte Störfallsituationen dargestellt und erläutert. Die ausgesuchten Störfallsituationen dienen als beispielhafte Verkehrsabläufe, mittels deren die im weiteren Verlauf der Arbeit vorgestellten neuartigen Verfahren zur Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose und zur Staulängenberechnung überprüft werden.

Grundlage für die Auswahl der Störfallsituationen sind sowohl die Störfallanalysen auf Betrachtungsabschnittebene als auch die umfangreiche (Mess-)Datenbasis. Der Störfallanalyse folgend sind die ausgesuchten Störfallsituationen ebenfalls den Klassen

- Störfall entsteht im stromabwärts liegenden Abschnitt
- Störfall entsteht im Betrachtungsabschnitt
- Störfall entsteht im stromaufwärts liegenden Abschnitt

zuzuordnen (vgl. Kapitel 4.2).

Für die Analyse des Verkehrsablaufs während der ausgesuchten Störfallsituationen stehen lokale und streckenbezogene Messwerte in der Datenbasis zur Verfügung (vgl. Kapitel 2.7). Zusätzlich werden die für den jeweiligen Betrachtungsabschnitt geltenden Randbedingungen (z.B. zulässige Höchstgeschwindigkeiten) herangezogen.

5.1 Vorgehensweise – Ausgesuchte Störfallsituationen

In den nachfolgenden Analysen sind die Verkehrsabläufe für die ausgesuchten Störfallsituationen dargestellt (vgl. Kapitel 4). Diese basieren auf Untersuchungen der umfangreichen Datenbasis.

Zur Beschreibung der Verkehrsabläufe werden hieraus für die jeweiligen Betrachtungsabschnitte lokale und streckenbezogene Mess- und Anzeigewerte herangezogen (vgl. Kapitel 2.7). Diese Werte sind zur besseren Übersicht sowie um ihren zeitlichen Verlauf während der Störfallsituation abbilden zu können, als Gangliniendiagramme dargestellt. Teilweise sind in den Gangliniendiagrammen verschiedenartige Informationen, z.B. Geschwindigkeiten und Verkehrsdichten, enthalten. Für die einzelnen Betrachtungsabschnitte sind jeweils ein Gangliniendiagramm mit Mess- sowie ein weiteres Diagramm mit Anzeigewerten dargestellt. Verfügt der Betrachtungsabschnitt zusätzlich über einen Hilfsquerschnitt, so werden dessen Messwerte in einem weiteren Diagramm abgebildet.

Die Diagramme der Messwerte zeigen die Ganglinienverläufe der gemessenen Reisegeschwindigkeit V_s (im Diagramm: „ V_s “ – pink) sowie der lokal gemessenen Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt v_{MQ_X} (im Diagramm: „ $v-MQ_X$ “ – gelb) und Ausgangsquerschnitt v_{MQ_Y} (im Diagramm: „ $v-MQ_Y$ “ – türkis). Zusätzlich enthalten die Diagramme die dazugehörige Verkehrsdichteganglinie K_s (im Diagramm: „ K_s “ – graugrün), die sich auf eine zweite Ordinatenachse (rechte Seite) bezieht.

Wird ein zweites Messwertdiagramm dargestellt, so enthält dieses die gleichen Ganglinienverläufe wie zuvor, jedoch mit dem Unterschied, dass anstelle der Ganglinie der lokalen Geschwindigkeiten am Eingangsquerschnitt die entsprechende Ganglinie für den Hilfsquerschnitt $v_{MQ_{XY}}$ dargestellt wird (im Diagramm: „v-MQ_XY“ – dunkelblau).

Bei den Messwerte-Diagrammen ist zu beachten, dass alle dargestellten streckenbezogenen Verkehrsgrößen („Reisegeschwindigkeit“ und „Verkehrsdichte“) immer auf den gesamten Betrachtungsabschnitt bezogen sind.

Gemessene streckenbezogene Verkehrswerte für einzelne Teilabschnitte, z.B. zwischen Hilfs- und Ausgangsquerschnitt, stehen nicht zur Verfügung.

Die Diagramme der Anzeigewerte enthalten die Ganglinienverläufe der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten am Ein- (gelb) und am Ausgangsquerschnitt (türkis). Falls vorhanden werden diese um den Ganglinienverlauf der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeit am Hilfsquerschnitt (dunkelblau) ergänzt. Bei der Darstellung der Ganglinie der geschalteten Höchstgeschwindigkeiten ist zu beachten, dass auch für die Zeitspannen, in denen keine zulässigen Höchstgeschwindigkeiten geschaltet sind, Werte dargestellt werden. Keine zulässigen Höchstgeschwindigkeiten sind sowohl im freien Verkehrszustand als auch im stark gestauten Verkehrszustand vorzufinden. Liegt im freien Verkehrszustand keine Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit vor, so wird in den Diagrammen der Wert 130 km/h eingesetzt, im gestauten Verkehrszustand der Wert 20 km/h. Die eingesetzten Schaltalgorithmen waren anlagenseitig vorgegeben und sind für die vorliegende Arbeit nicht von Bedeutung. Im Weiteren werden die Geschwindigkeitswerte 130 km/h und 20 km/h als Synonyme für nicht geschaltete Anzeigendarstellungen im freien bzw. im gestauten Verkehrszustand verwendet.

Anhand der Diagramme wird der Verkehrsablauf während der Störfallsituation im jeweiligen Betrachtungsabschnitt analysiert. In Kombination mit den dazugehörigen Anzeigewerten kann das herrschende Stauphänomen der jeweiligen Störfallart zugeordnet werden.

5.2 Ausgesuchte Störfälle – Störfall entsteht im stromabwärts liegenden Abschnitt

Liegt die ausschlaggebende Störfallursache im stromabwärts liegenden Abschnitt, so wächst der Störfall über den Ausgangsquerschnitt in den Betrachtungsabschnitt hinein. Es kommt zu einem Einbruch der lokalen Geschwindigkeiten am Ausgangsquerschnitt v_{MQ_Y} bei gleichzeitig unverändert hohen lokalen Geschwindigkeiten am Eingangsquerschnitt v_{MQ_X} (vgl. Kapitel 4.2.1). Mit zeitlichem Verzug sinkt ebenfalls die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit V_S , die streckenbezogene Verkehrsdichte K_S steigt an. Die weitere Entwicklung des Verkehrsablaufs hängt vom Verlauf der jeweiligen Störfälle ab.

Im Folgenden werden für drei Beispiele entsprechende Störfallverläufe vorgestellt. Das erste Beispiel 1.1 zeigt einen Störfall, bei dem sich eine Rückstauwelle bildet, die stromaufwärts in den Betrachtungsabschnitt hineinläuft und dort zum Stehen kommt. Im zweiten Beispiel 1.2 bildet sich ebenfalls eine Rückstauwelle, diese kommt jedoch nicht im Betrachtungsabschnitt

zum Stillstand, sondern durchläuft diesen in Gänze. Das dritte Beispiel 1.3 zeigt einen Störfall, bei dem im Betrachtungsabschnitt keine ausgeprägte Rückstauwelle zu beobachten ist. Die Stauung breitet sich kontinuierlich stromaufwärts aus. Es kommt kurzzeitig zu einer Störung des Verkehrsablaufs im gesamten Betrachtungsabschnitt.

5.2.1 Rückstauwelle kommt im Betrachtungsabschnitt zum Stillstand (Beispiel 1.1)

Im Beispiel 1.1 ist ein Stauphänomen zu beobachten, bei dem eine Stauwelle aus dem stromabwärts liegenden Abschnitt stromaufwärts in den Betrachtungsabschnitt hineinläuft und dort zum Stehen kommt. Im weiteren Verlauf bildet sich ein sich flächig ausbreitender Störfall, bei dem die Staulänge zunimmt.

Der Störfall ereignete sich um die Mittagszeit an einem Sonntag. Entsprechend ist der Anteil „Lkw-ähnlicher“ Fahrzeuge sehr gering.

Betrachtungszeitraum:	ca. 11:20 – 14:00 Uhr
Messtag:	25.02.2007 (Sonntag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-S13 bis MQ-S15
Fahrtrichtung:	Stuttgart
Abschnittslänge:	3,375 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	Hilfsquerschnitt mit Wechselverkehrszeichengeber, Betriebsabfahrt
Sonstige Besonderheiten:	Nässe
Freifahrtgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	125 / 120 km/h
Freifahrtgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen) bei „Nässe“:	100 km/h
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	2,9 %

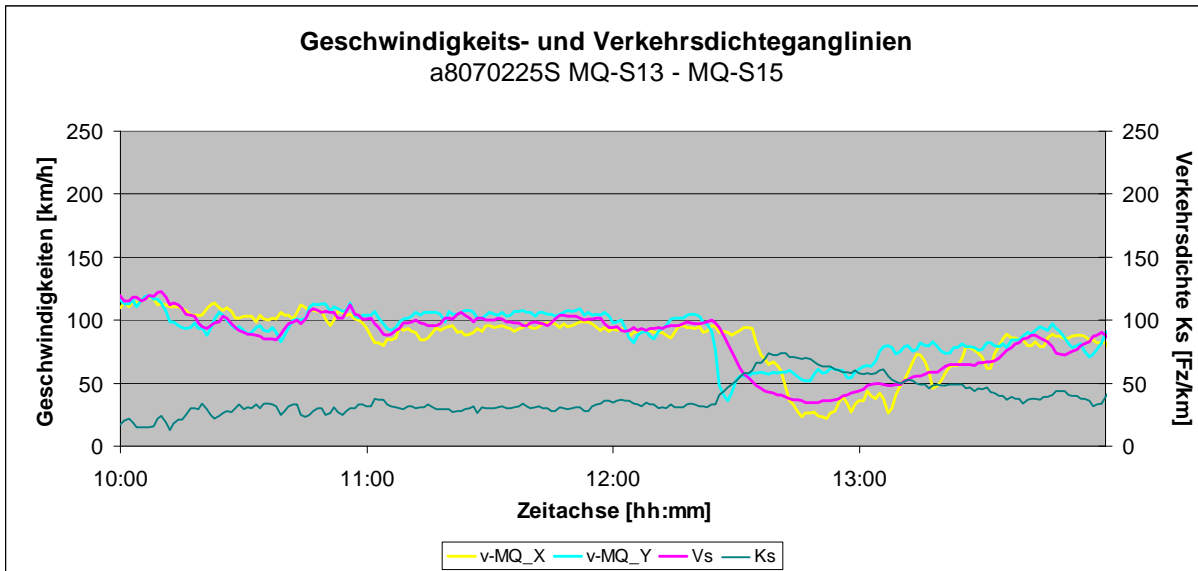


Abbildung 5-1: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 1.1

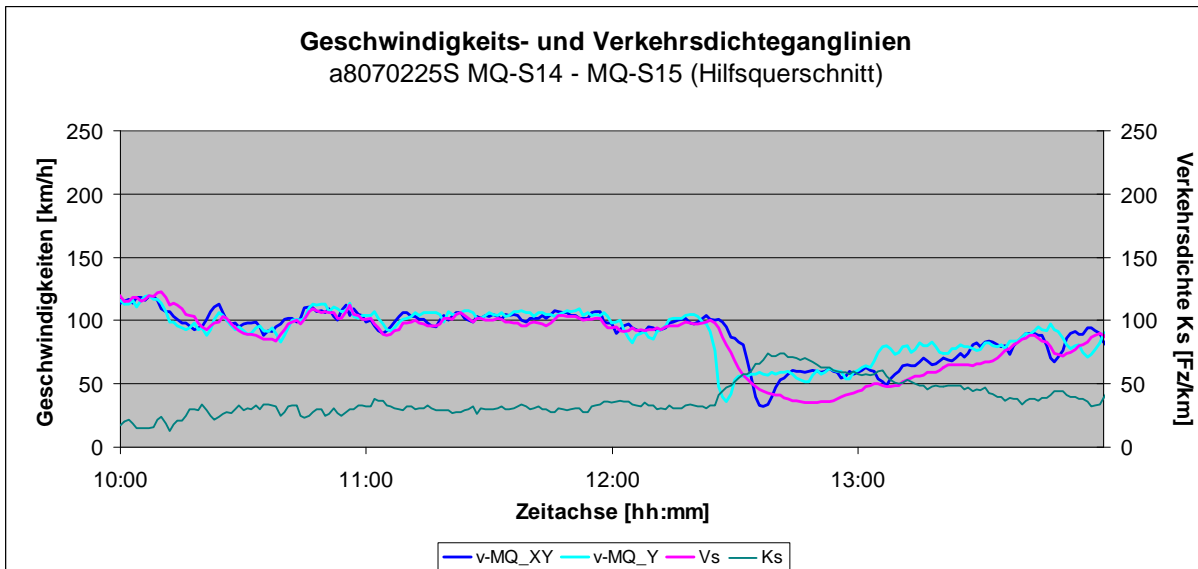


Abbildung 5-2: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 1.1

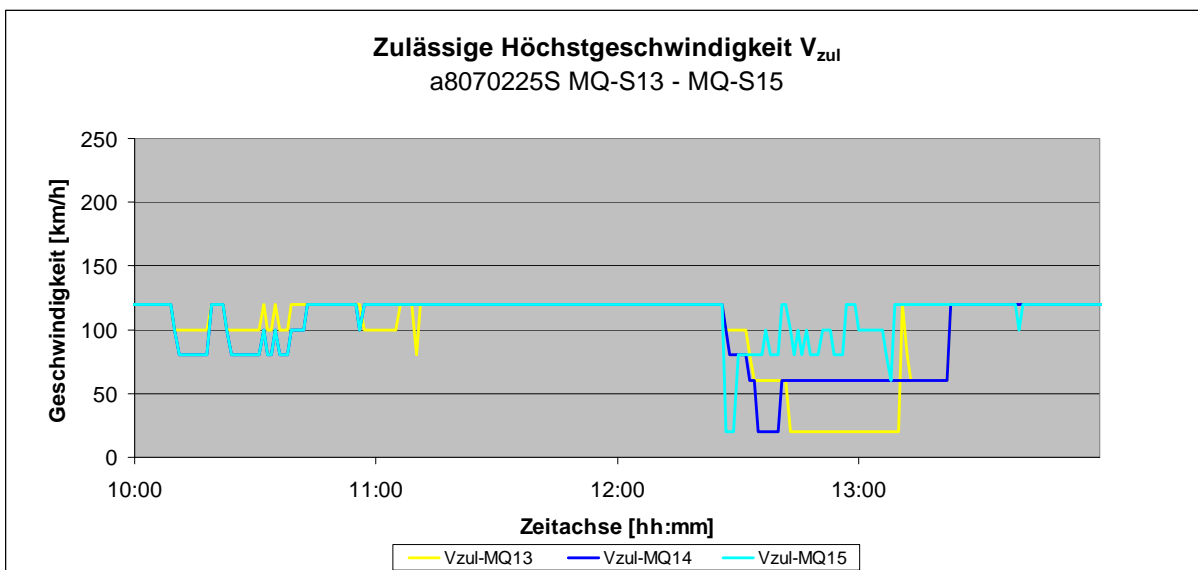


Abbildung 5-3: Ganglinien der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten – Beispiel 1.1

Gegen 12:20 Uhr wandert eine Stauwelle stromaufwärts über den Ausgangsquerschnitt in den Betrachtungsabschnitt hinein.

Ausgelöst wird die Stauwelle durch eine Störfallursache, die stromabwärts hinter dem Betrachtungsabschnitt liegt und bei der es zu keiner (längeren) Vollsperrung am Störfallquerschnitt kommt. Der ausschlaggebende Störfallquerschnitt kann, wenn auch teilweise nur eingeschränkt, während der betrachteten Störfallsituation passiert werden. Durch die Stauwelle bildet sich eine weitere Störfallsituation mit eigenem Störfallquerschnitt am Stauwellenanfang. Auch wenn der ausschlaggebende Störfallquerschnitt nach wie vor den Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt beeinflusst, ist dennoch die neue Störfallsituation (Stauwelle) maßgebend für den Verkehrsablauf.

Diese Stauwelle, die sich durch einen kurzzeitig starken Einbruch, gefolgt von einem schnellen Anstieg der lokalen Geschwindigkeiten zeigt, kommt aufgrund der herrschenden Verkehrssituation (Zufluss zum Störfall ist größer als der Abfluss) im Betrachtungsabschnitt zwischen Eingangs- und Hilfsquerschnitt zum Stehen (vgl. Geschwindigkeitsganglinien in Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2). Aus der anfänglichen Stauwelle entwickelt sich im weiteren Verlauf eine Störfallsituation, bei der das Stauende schneller stromaufwärts wandert als der Stauanfang. Die Staulänge nimmt zu. Auch die streckenbezogenen Messwerte weisen auf eine Zunahme der Staulänge hin. Die Verkehrsdichte KS nimmt auch nach dem vollständigen Eintritt der Stauwelle in den Betrachtungsabschnitt noch weiter zu. Ähnliches lässt die Reisegeschwindigkeit VS vermuten, die ungefähr zum Zeitpunkt der Überstauung des Eingangsquerschnitts am kleinsten ist.

Die Auswertung der Messwerte deutet darauf hin, dass eine zum Stehen gekommene Stauwelle die für den Betrachtungsabschnitt bestimmende Störfallursache darstellt.

Dass die Stauwelle zum Stillstand gekommen ist, zeigt sich daran, dass die Stauwelle an den lokalen Messwerten am Ausgangs- und Hilfsquerschnitt, nicht aber am Eingangsquerschnitt zu beobachten ist. Zwar kommt es während des Störfalls zu einer Überstauung des Eingangsquerschnitts, stauwellentypische Messwerte sind hier jedoch nicht mehr zu beobachten.

Bei der Auflösung des Stauphänomens wandert zuerst das Stauende über den Ausgangsquerschnitt in den Betrachtungsabschnitt hinein (Vermutung: Störfallquerschnitt ist wieder komplett geräumt). Die lokal gemessenen Geschwindigkeiten am Ausgangsquerschnitt steigen, gefolgt von der lokalen Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt und der streckenbezogenen Reisegeschwindigkeit.

Vor dem Störfall wird an allen drei Anzeigequerschnitten eine maximale Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h angezeigt. Während des Störfalls reduziert diese sich zuerst am Ausgangsquerschnitt bis auf „20 km/h“ (Stau), gefolgt vom Hilfs- und Eingangsquerschnitt. In annähernd umgekehrter Reihenfolge folgt die spätere Regulierung zurück auf das Anfangsniveau von 120 km/h (vgl. Abbildung 5-3).

Besonderheit:

Die geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten liegen kurz vor dem Störfall mit 120 km/h wesentlich höher als die gemessenen Geschwindigkeiten. Dieses kann auf die

Witterungsbedingungen (Nässe) zurückgeführt werden. Bei trockener Witterung (10:00 bis 10:15 Uhr) liegen die gemessenen Höchstgeschwindigkeiten zumeist etwas oberhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten, unabhängig von den geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten (vgl. Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4).

Ein Einfluss der geschalteten Höchstgeschwindigkeiten auf die tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten bei Nässe kann hier somit weitgehend ausgeschlossen werden.

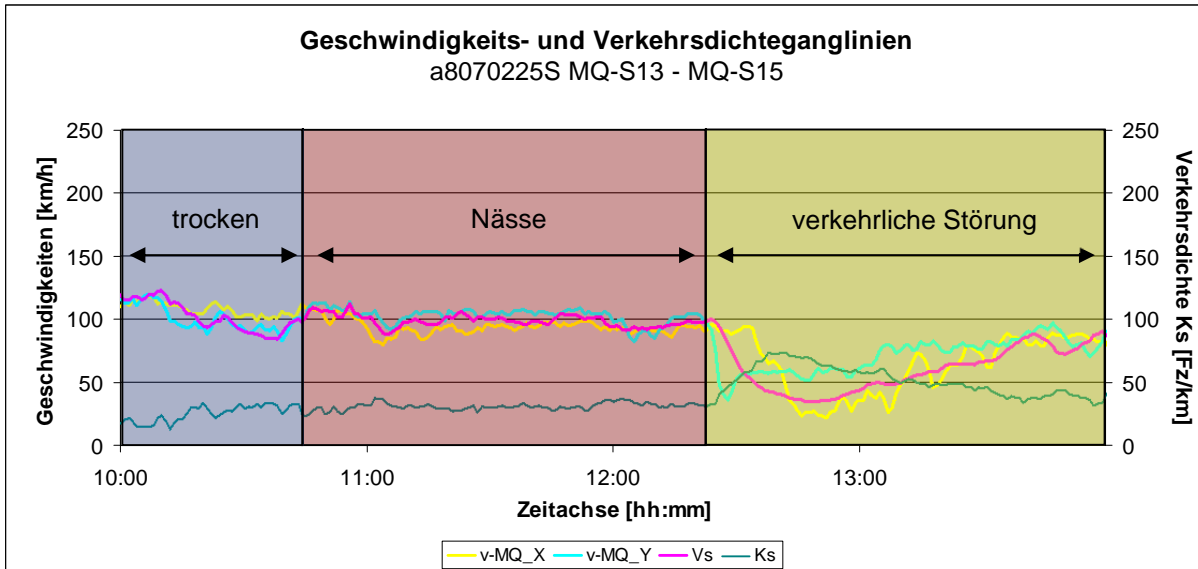


Abbildung 5-4: Darstellung der besonderen Witterungsverhältnisse – Beispiel 1.1

5.2.2 Rückstauwelle durchläuft den Betrachtungsabschnitt (Beispiel 1.2)

Bei dem im Folgenden beschriebenen Störfall ist ein Stauphänomen zu beobachten, bei dem eine Stauwelle aus dem stromabwärts liegenden Abschnitt stromaufwärts über den Ausgangsquerschnitt in den Betrachtungsabschnitt eintritt, den Betrachtungsabschnitt durchläuft und ihn über den Eingangsquerschnitt in den stromaufwärts liegenden Abschnitt wieder verlässt.

Der Störfall ereignete sich an einem Sonntag am frühen Abend. Aufgrund des Wochentages setzt sich das gemessene Fahrzeugkollektiv hauptsächlich aus Pkw zusammen.

Betrachtungszeitraum:	ca. 17:00 – 18:00 Uhr
Messtag:	30.07.2006 (Sonntag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-S15 bis MQ-S17
Fahrtrichtung:	Stuttgart
Abschnittslänge:	4,770 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	Hilfsquerschnitt mit Wechselverkehrs-

	zeichengeber, Parkplatz, Betriebsabfahrt
Sonstige Besonderheiten:	Nässe
Freifahrtgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	120 / 120 km/h
Freifahrtgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen) bei „Nässe“:	100 km/h
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	5,8 %

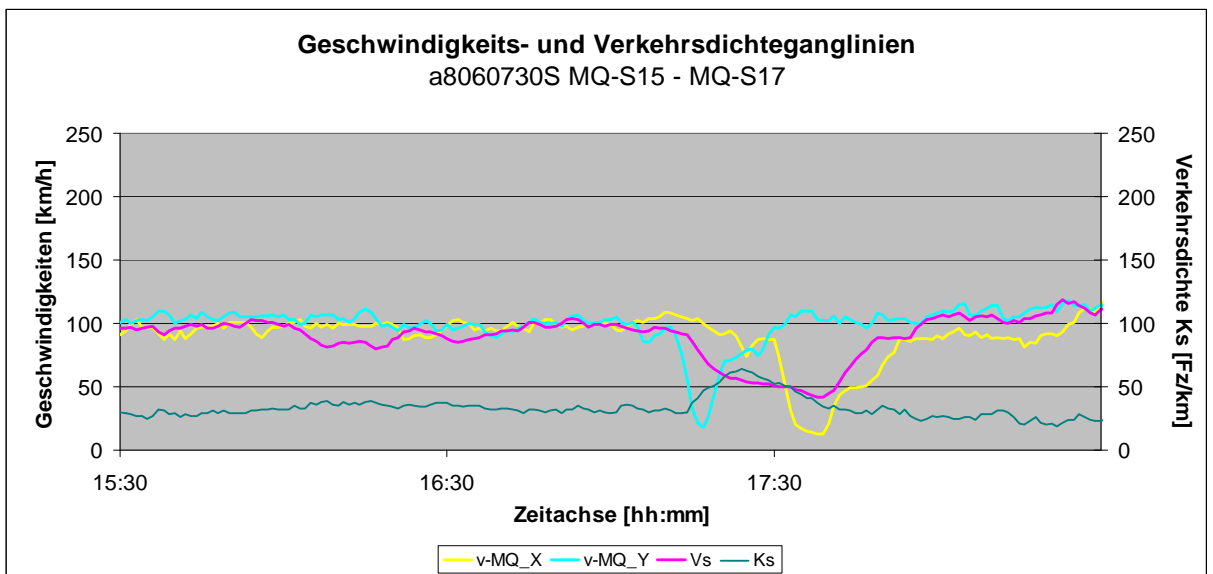


Abbildung 5-5: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 1.2

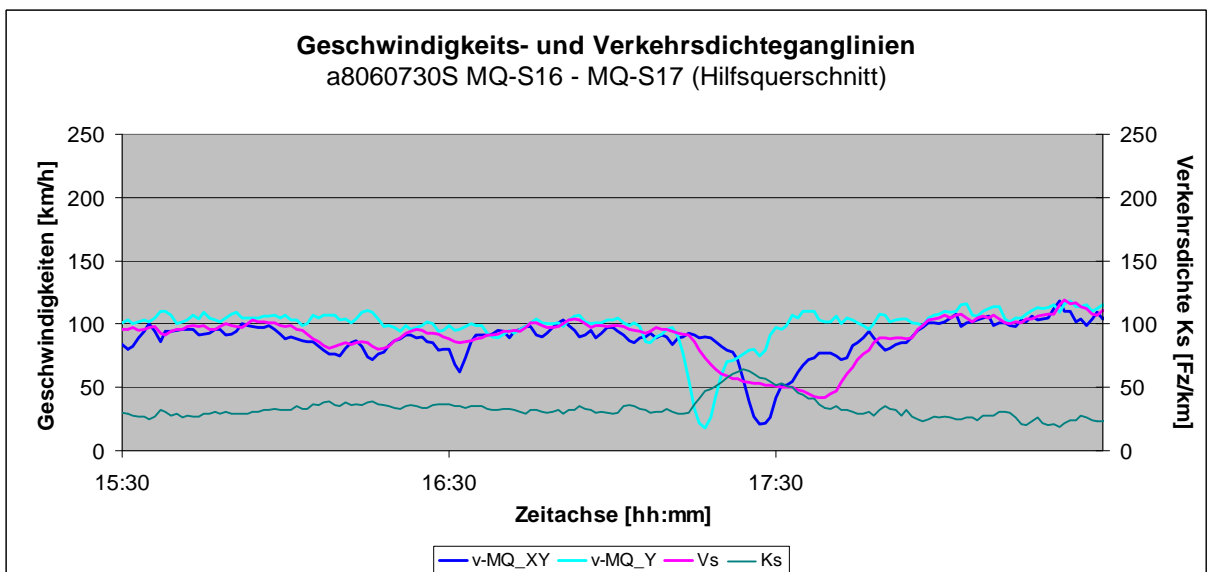


Abbildung 5-6: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 1.2

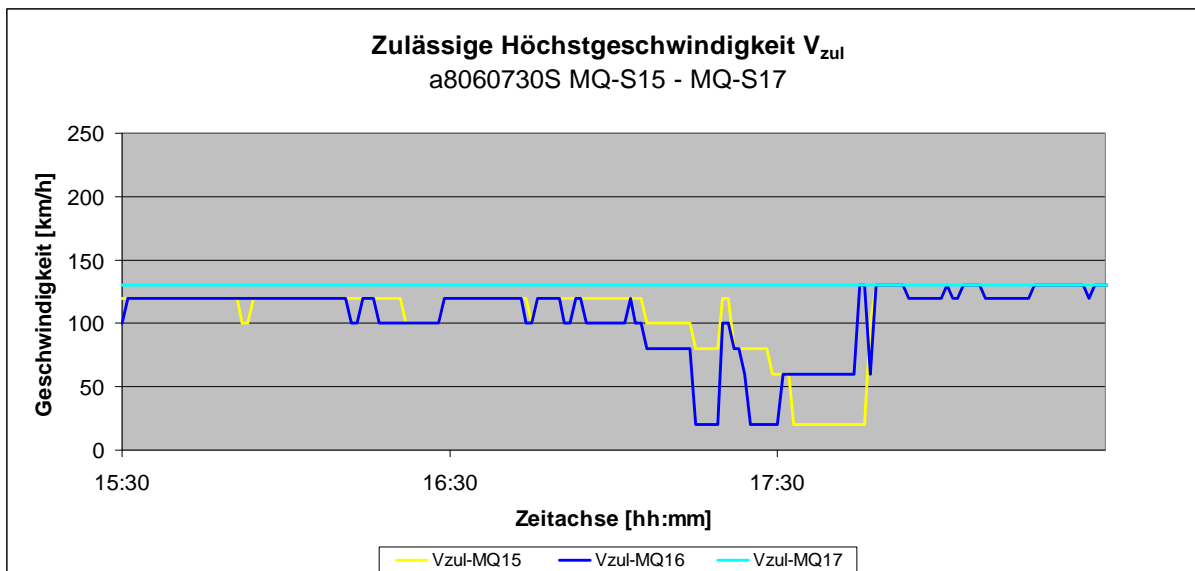


Abbildung 5-7: Ganglinien der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten – Beispiel 1.2

Gegen 17:00 Uhr wandert die Stauwelle stromaufwärts über den Ausgangsquerschnitt in den Betrachtungsquerschnitt hinein.

Ausgelöst wird die Stauwelle an einem Störfallquerschnitt, der stromabwärts hinter dem Betrachtungsabschnitt liegt. Außer durch die Stauwelle selbst beeinflusst der ausschlaggebende Störfallquerschnitt den Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt nicht. Es kommt zu keiner länger andauernden Störung des Verkehrsablaufs am Ausgangsquerschnitt.

Die eigentliche Stauwelle zeigt sich durch einen kurzfristig starken Einbruch, gefolgt von einem schnellen Anstieg der lokalen Geschwindigkeiten an den Messquerschnitten. Dieses Störfallmuster ist sowohl am Ausgangsquerschnitt als auch zeitlich später am Hilfs- und am Eingangsquerschnitt zu beobachten (vgl. Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6). Von Querschnitt zu Querschnitt ergeben sich dabei leichte Veränderungen der Störfallmuster, die auf eine Abnahme der Stauwellengeschwindigkeit bzw. eine Zunahme der Staulänge hindeuten. Die Länge der Zeiträume, an denen die Stauwelle an den einzelnen Messquerschnitten nachgewiesen werden kann, nimmt zu. Stauwellentypische Messwerte sind jedoch an allen drei Querschnitten zu erkennen, was darauf hindeutet, dass die Welle den Betrachtungsabschnitt vollständig durchläuft.

Das Stauphänomen einer durch den Betrachtungsabschnitt durchlaufenden Welle spiegelt sich auch in den streckenbezogenen Messwerten wider. Die Verkehrsdichte K_s steigt zu Beginn des Störfalls an, erreicht ein Maximum und fällt dann nahezu symmetrisch wieder ab. Die Reisegeschwindigkeit V_s sinkt zu Beginn des Störfalls bis zum vollständigen Eintreten der Stauwelle auf ein Minimum ab. Dieses Minimum wird annähernd bis zum Verlassen der Stauwelle beibehalten. Mit dem Verlassen der Stauwelle aus dem Betrachtungsabschnitt steigt auch die Reisegeschwindigkeit V_s wieder an.

Am Ausgangsquerschnitt wird weder vor, während noch nach dem Störfall eine Geschwindigkeitsbeschränkung geschaltet. Am Hilfs- und Eingangsquerschnitt wechseln die geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten zwischen 100 und 120 km/h (vgl.

Abbildung 5-7). Während des Störfalls werden zuerst am Hilfsquerschnitt, dann am Eingangsquerschnitt die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten bis auf „20 km/h“ (Stau) verringert. In annähernd umgekehrter Reihenfolge erfolgt die spätere Regulierung zurück auf 120 km/h bzw. auf „130 km/h“ (keine Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit).

Besonderheit:

Vor dem Störfall liegen die geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten an allen Querschnitten teilweise wesentlich höher als die gemessenen Geschwindigkeiten. Dieses kann auf die Witterungsbedingungen (Nässe) zurückgeführt werden. Bei trockener Witterung liegen erfahrungsgemäß die gemessenen Höchstgeschwindigkeiten zumeist etwas oberhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten, unabhängig von den geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten (vgl. Abbildung 5-7 und Abbildung 5-8).

Ein Einfluss der geschalteten Höchstgeschwindigkeiten auf die tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten bei Nässe kann hier somit weitgehend ausgeschlossen werden.

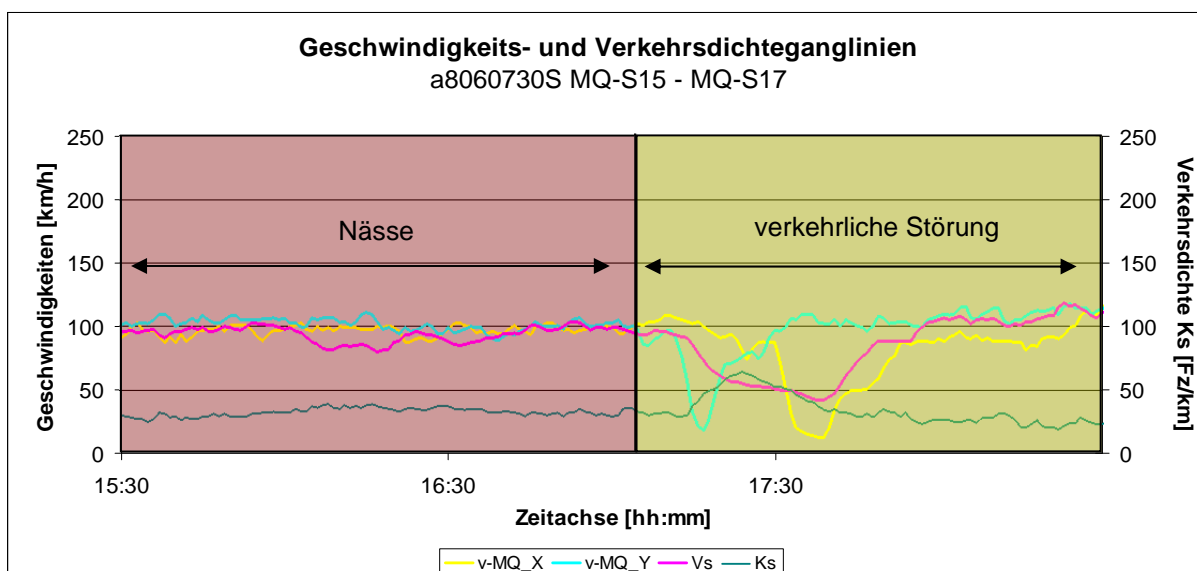


Abbildung 5-8: Darstellung der besonderen Witterungsverhältnisse – Beispiel 1.2

5.2.3 Störung des Verkehrsflusses im gesamten Betrachtungsabschnitt (Beispiel 1.3)

Im Beispiel 1.3 ist ein Stauphänomen zu beobachten, bei dem die Stauung stromaufwärts über den Ausgangsquerschnitt in den Betrachtungsabschnitt hineinwächst und sich kontinuierlich ausbreitet. Die Staulänge nimmt zu. Es kommt kurzzeitig zu einer Störung des Verkehrsflusses im gesamten Betrachtungsabschnitt.

Der Störfall ereignete sich an einem Samstag am frühen Nachmittag. Aufgrund des Wochentages setzt sich das Fahrzeugkollektiv hauptsächlich aus Pkw zusammen.

Betrachtungszeitraum:	ca. 14:15 – 15:15 Uhr
Messtag:	24.02.2007 (Samstag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-S8 bis MQ-S10

Fahrtrichtung:	Stuttgart
Abschnittslänge:	2,900 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	MQ-S8 ist eine Anschlussstelle sowie ein reiner Messquerschnitt, Hilfsquerschnitt MQ-S9 reiner Anzeigenquerschnitt
Sonstige Besonderheiten:	–
Freifahrtgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	125 km/h / frei
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	5,4 %

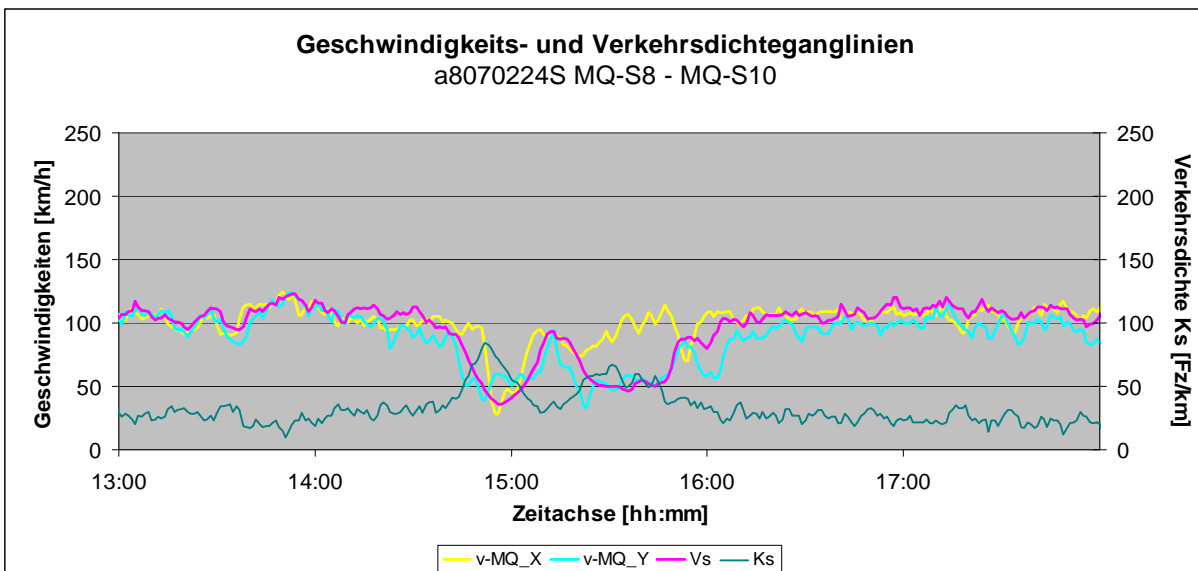


Abbildung 5-9: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 1.3

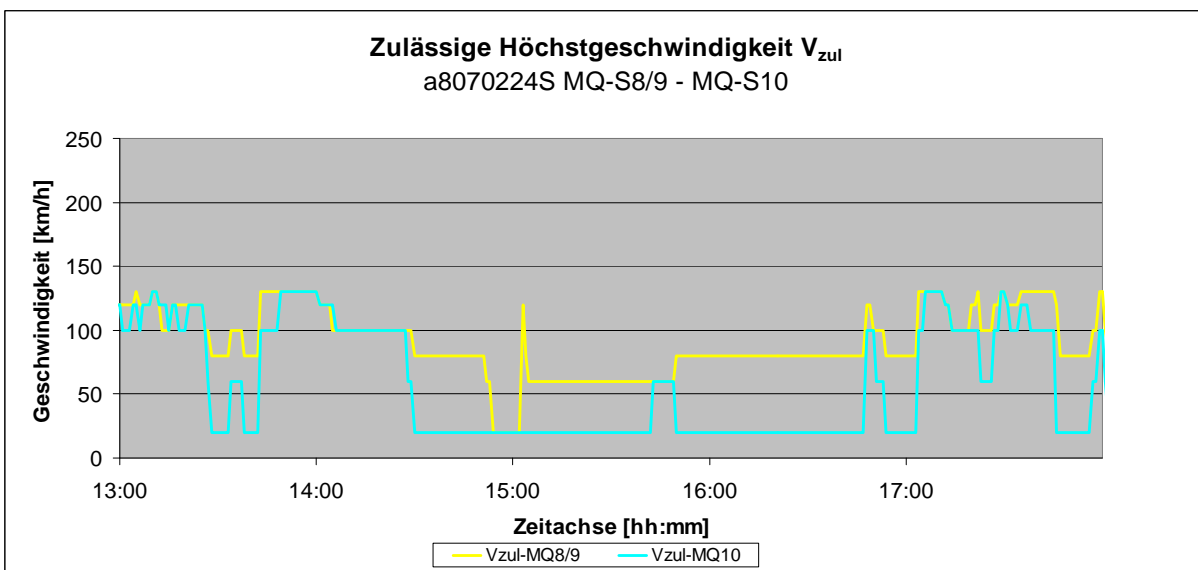


Abbildung 5-10: Ganglinien der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten – Beispiel 1.3

Gegen 14:15 Uhr wächst die Stauung in den Betrachtungsquerschnitt hinein. Ausgelöst wird der Störfall durch eine ausschlaggebende Störfallursache, die stromabwärts hinter dem Betrachtungsabschnitt liegt und den Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt während der gesamten Störfalldauer beeinträchtigt. Im weiteren Verlauf des Störfalls kommt es kurzzeitig zu einer Überstauung des gesamten Betrachtungsabschnitts. Zu diesem Zeitpunkt (ca. 14:55 Uhr) liegen die lokalen Geschwindigkeiten am Ein- und Ausgangsquerschnitt sowie die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit V_s annähernd zeitgleich auf ähnlich niedrigem Niveau. Zusätzlich nimmt die Verkehrsdichte K_s einen maximalen Wert an (vgl. Abbildung 5-9).

Bei der Auflösung wandert zuerst das Stauende über den Eingangsquerschnitt wieder in den Betrachtungsabschnitt hinein. Die lokalen Geschwindigkeiten am Eingangsquerschnitt v_{MQX} steigen, gefolgt von der streckenbezogenen Reisegeschwindigkeit V_s und den lokalen Geschwindigkeiten am Ausgangsquerschnitt v_{MQY} .

Sowohl am Ein- als auch am Ausgangsquerschnitt wird kurz vor dem Störfall keine zulässige Höchstgeschwindigkeit geschaltet („130 km/h“). Während des Störfalls sinken die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten zuerst am Aus-, dann am Eingangsquerschnitt auf „20 km/h“ (Stau) (vgl. Abbildung 5-10). Für den Ausgangsquerschnitt wird während und kurz nach dem Störfall weiterhin Stau angezeigt. Die geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten am Eingangsquerschnitt steigen zum Ende des Störfalls auf 120 km/h. Eine mögliche Ursache dafür, dass am Eingangsquerschnitt höhere zulässige Geschwindigkeiten als am Ausgangsquerschnitt geschaltet werden, ist, dass die geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten am Ausgangsquerschnitt maßgeblich vom Verkehrsfluss im stromabwärts liegenden Abschnitt bestimmt werden. Da sich direkt im Anschluss an den betrachteten Störfall ein neuer Störfall im Betrachtungsabschnitt bildet, der ebenfalls stromaufwärts in den Betrachtungsabschnitt hineinwandert, kann angenommen werden, dass dieser neue Störfall schon während des Betrachtungszeitraums im stromabwärts liegenden Abschnitt vorhanden ist und somit die geschalteten Geschwindigkeiten beeinflusst.

Eine Betrachtung des neuen Störfalls wird im Weiteren nicht durchgeführt.

5.3 Ausgesuchte Störfälle – Störfall entsteht im Betrachtungsabschnitt

Liegt die ausschlaggebende Störfallursache im Betrachtungsabschnitt selbst, so ergeben sich zwei Arten für eine resultierende Stauung. Der Störfall manifestiert sich am Ein- bzw. Ausgangsquerschnitt, d.h. die Stauung wächst in den stromauf- bzw. stromabwärts liegenden Abschnitt hinein, oder aber der Störfall verbleibt über die gesamte Störfalldauer im Betrachtungsabschnitt.

Bei letzterem Fall kann die Stauung mit lokalen Verkehrsgrößen am Ein- und Ausgangsquerschnitt nicht zuverlässig erkannt werden. Zuverlässige Indikatoren zur Erfassung eines solchen Störfalls sind die streckenbezogene Verkehrsdichte K_s sowie die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit V_s . Bricht die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit V_s bei gleichbleibend hohem Niveau der lokal gemessenen Geschwindigkeiten am Ein- bzw. Ausgangsquerschnitt ein, so befindet sich ein Störfall im Betrachtungsabschnitt. Steigt

zusätzlich die Verkehrsdichte K_s signifikant an, bildet sich am Störfallquerschnitt eine Stauung (vgl. Kapitel 4.2.2). Die weitere Entwicklung des Verkehrsablaufs hängt vom Verlauf des jeweiligen Störfalls ab.

Im Folgenden werden anhand von Beispielen drei Störfallverläufe vorgestellt, die auf eine Störfallursache im Betrachtungsabschnitt zurückzuführen sind. Das erste Beispiel 2.1 zeigt dabei einen Störfall, der sich weder am Ein- noch am Ausgangsquerschnitt manifestiert. Im zweiten Beispiel 2.2 manifestiert sich der Störfall am Eingangsquerschnitt, nachdem er zuvor schon über einen längeren Zeitraum im Betrachtungsabschnitt vorhanden war. Der Störfall im dritten Beispiel 2.3 manifestiert sich, im Gegensatz zum Beispiel 2.2, schon nach kurzer Zeit am Eingangsquerschnitt.

5.3.1 Störfall manifestiert sich weder am Ein- noch am Ausgangsquerschnitt (Beispiel 2.1)

Im Beispiel 2.1 ist ein Stauphänomen zu beobachten, bei dem ein Störfall im Betrachtungsabschnitt entsteht, der sich weder am Ein- noch am Ausgangsquerschnitt manifestiert. Der Störfall ereignete sich an einem Donnerstagmorgen. Entsprechend ist im Fahrzeugkollektiv ein großer Anteil „Lkw-ähnlicher“ Fahrzeuge enthalten.

Betrachtungszeitraum:	ca. 8:50 – 9:45 Uhr
Messtag:	27.07.2006 (Donnerstag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-S22 bis MQ-S24
Fahrtrichtung:	Stuttgart
Abschnittslänge:	3,250 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	Hilfsquerschnitt mit Wechselverkehrszeichengeber, Parkplatz, 2 Betriebsabfahrten
Sonstige Besonderheiten:	–
Freifahrtgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	125 km/h / frei
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	22,9 %

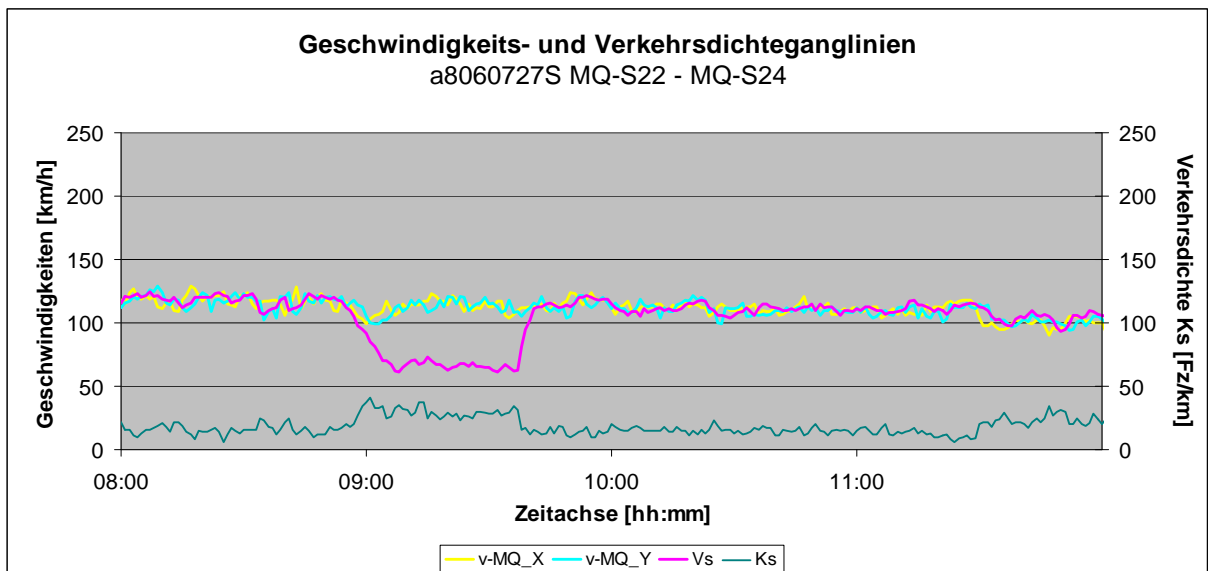


Abbildung 5-11: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 2.1

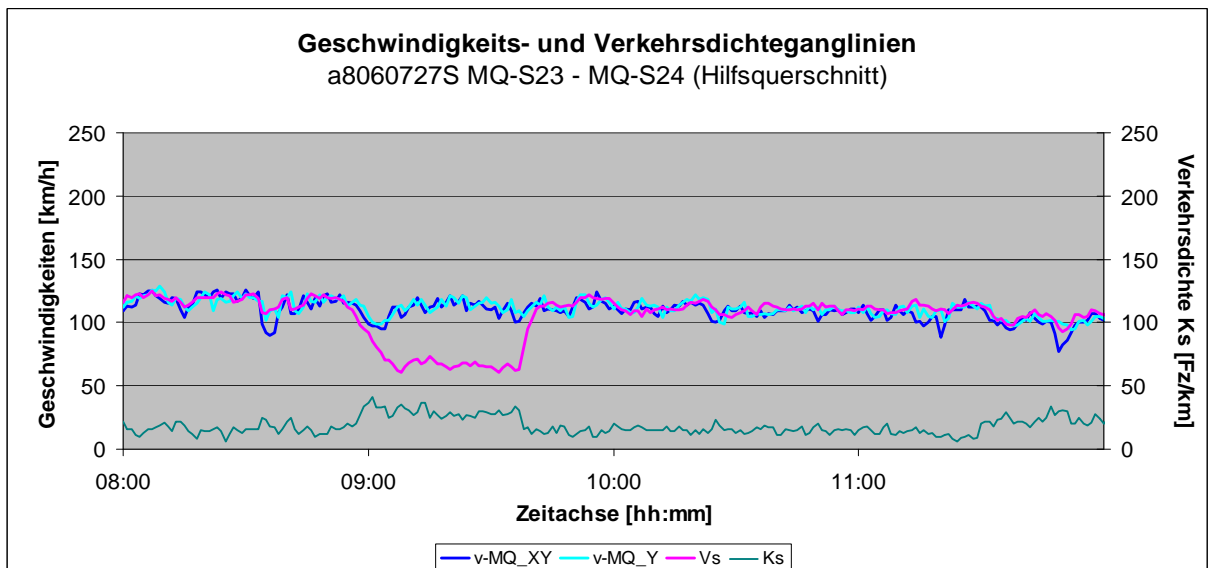


Abbildung 5-12: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 2.1

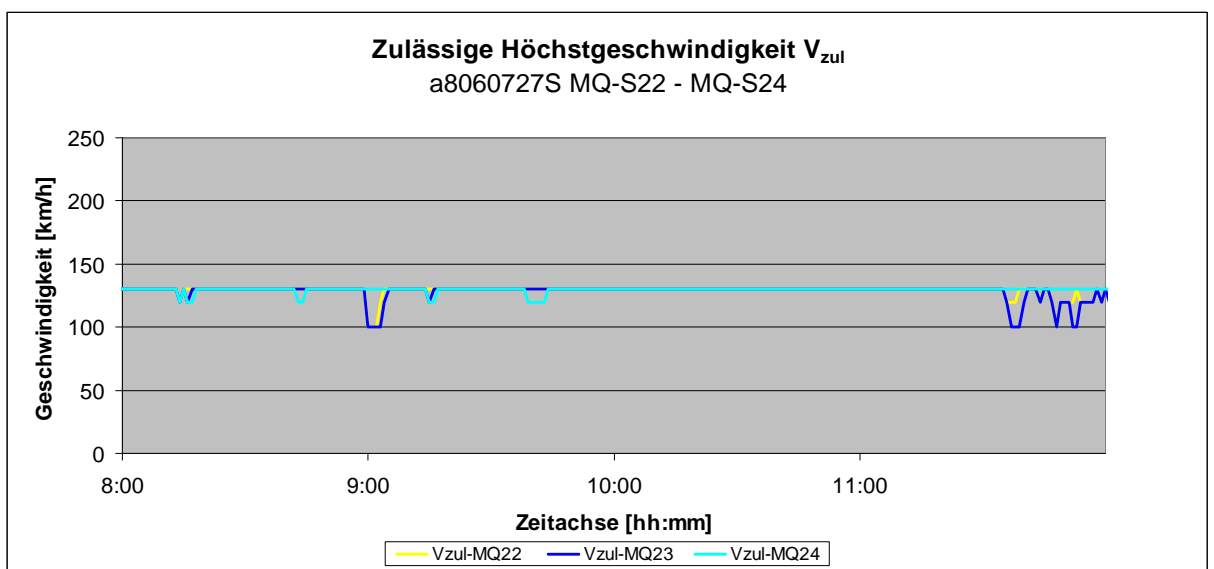


Abbildung 5-13: Ganglinien der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten – Beispiel 2.1

Gegen 8:50 Uhr bildet sich ein Störfall, der während der gesamten Störfalldauer ausschließlich im Betrachtungsabschnitt verbleibt. Es bildet sich ein Fließgleichgewicht, bei dem die Anzahl der dem Stau zufließenden Fahrzeuge weitgehend der Anzahl der aus dem Stau abfließenden Fahrzeuge entspricht. Ausgelöst wird der Störfall durch eine Störfallursache, die, genauso wie der Stauanfang und das Stauende, im Betrachtungsabschnitt selbst liegt. Es kommt zu keiner (längeren) Vollsperrung am Störfallquerschnitt. Der Störfallquerschnitt kann während der Störung, wenn auch teilweise eingeschränkt, passiert werden.

Die streckenbezogene Verkehrsdichte steigt sprunghaft zu Beginn des Störfalls an, verbleibt auf dem Niveau und sinkt zum Störfallende ähnlich schnell wieder ab. Die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit V_s bricht während des Störfalls stark ein. Die lokalen Geschwindigkeiten am Eingangs-, Hilfs- und Ausgangsquerschnitt verbleiben über die gesamte Störfalldauer auf einem annähernd unverändert hohen Niveau (vgl. Abbildung 5-11 und Abbildung 5-12). Nachdem die Störfallursache am Störfallquerschnitt behoben ist, löst sich die Stauung im Betrachtungsabschnitt zügig wieder auf.

Sowohl am Ein-, Hilfs- als auch am Ausgangsquerschnitt sind während des gesamten Betrachtungszeitraums zulässige Höchstgeschwindigkeiten von 120 km/h bzw. „130 km/h“ geschaltet. Lediglich zu Beginn des Störfalls werden am Eingangs- und Hilfsquerschnitt kurzzeitig die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten auf 100 km/h reduziert (vgl. Abbildung 5-13).

5.3.2 Störfall manifestiert sich nach längerer Zeit am Eingangsquerschnitt (Beispiel 2.2)

Bei dem im Folgenden beschriebenen Beispiel ist ein Stauphänomen zu beobachten, bei dem sich der Störfall am Eingangsquerschnitt manifestiert, nachdem er zuvor schon über einen längeren Zeitraum im Betrachtungsabschnitt vorhanden ist.

Der Störfall ereignete sich an einem Donnerstagmorgen. Entsprechend ist im Fahrzeugkollektiv ein großer Anteil „Lkw-ähnlicher“ Fahrzeuge enthalten.

Betrachtungszeitraum:	8:40 – 12:20 Uhr
Messtag:	27.07.2006 (Donnerstag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-S15 bis MQ-S17
Fahrtrichtung:	Stuttgart
Abschnittslänge:	4,770 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	Hilfsquerschnitt mit Wechselverkehrszeichengeber (nach 2,1 km), Parkplatz, Betriebsabfahrt

Sonstige Besonderheiten:	Baustelle
Freifahrgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	125 km/h / frei
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	22,4 %

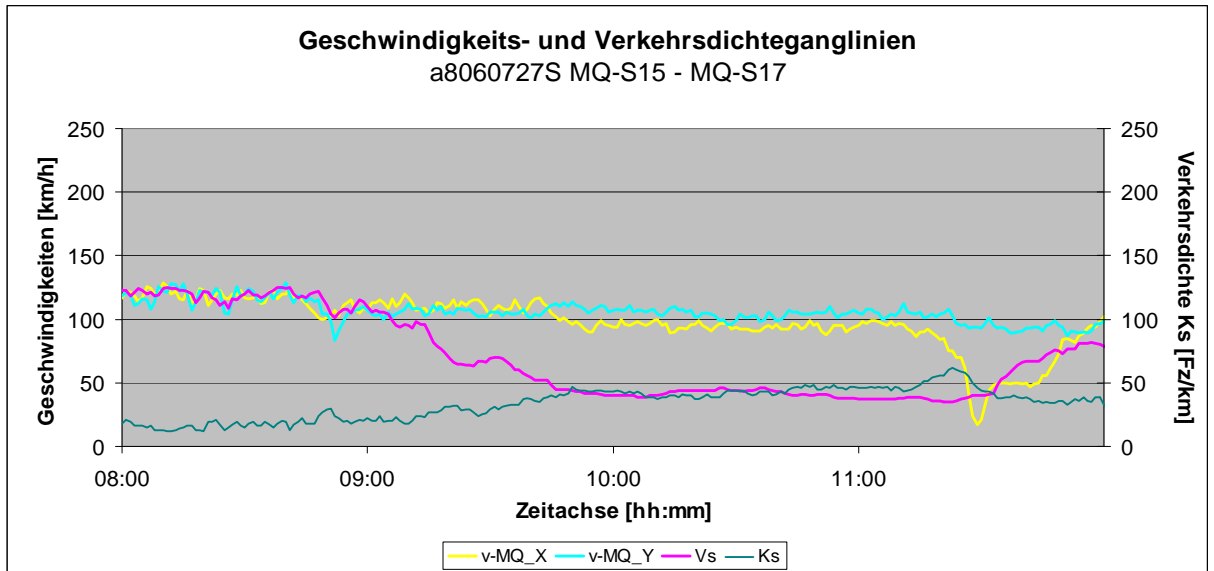


Abbildung 5-14: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichtegänglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 2.2

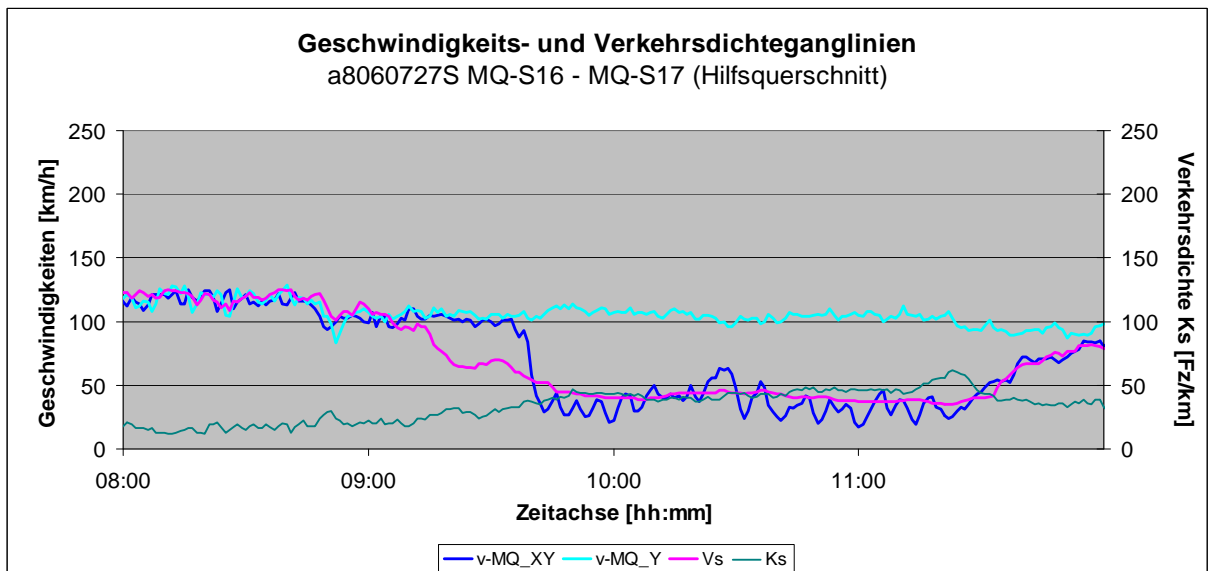


Abbildung 5-15: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichtegänglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 2.2

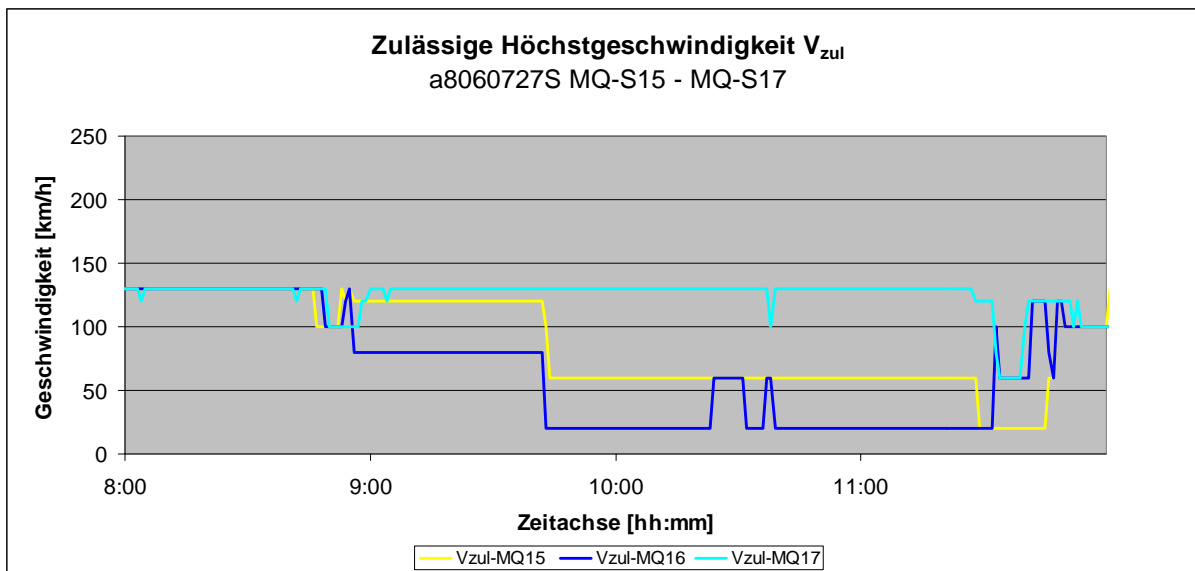


Abbildung 5-16: Ganglinien der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten – Beispiel 2.2

Gegen 8:40 Uhr beginnt die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit langsam zu sinken, während die lokalen Geschwindigkeiten am Ein- und Ausgangsquerschnitt weitgehend unauffällig bleiben (vgl. Abbildung 5-14). Nach einem längeren Zeitraum bricht die lokale Geschwindigkeit am Hilfsquerschnitt ein. Kurz nach dem Einbruch der lokalen Geschwindigkeit stellt sich ein Fließgleichgewicht ein, bei dem die Anzahl der dem Stau zufließenden Fahrzeuge annähernd mit der Anzahl der aus dem Stau abfließenden Fahrzeuge übereinstimmt (vgl. Abbildung 5-15). Die Verkehrsdichte K_S bleibt weitgehend konstant. Während des Fließgleichgewichts manifestiert sich der Störfall nicht. Gegen Ende des Störfalls löst sich das Fließgleichgewicht auf. Die Stauung breitet sich stromaufwärts über den Betrachtungsabschnitt hinaus aus und manifestiert sich dann am Eingangsquerschnitt.

Während des gesamten Störfalls kommt es zu keiner (längeren) Vollsperrung am Störfallquerschnitt. Der Störfallquerschnitt kann, wenn auch teilweise beeinträchtigt, passiert werden.

Die streckenbezogene Verkehrsdichte steigt zu Beginn des Störfalls langsam auf ein höheres Niveau an. Dieses Niveau wird beibehalten und erst gegen Ende des Störfalls verlassen. Es bildet sich ein kleiner Peak in der Verkehrsdichteganglinie. Nach dem kurzzeitigen Ausschlag sinkt die Verkehrsdichte K_S ähnlich langsam, wie sie zuvor zu Störfallbeginn gestiegen ist. Der Störfall löst sich auf.

Während der Störfall sich auflöst, wandert das Stauende wieder stromabwärts über den Eingangsquerschnitt in den Betrachtungsquerschnitt zurück.

Der Stauanfang verbleibt während des gesamten Störfalls im Betrachtungsabschnitt. Die lokalen Geschwindigkeiten am Ausgangsquerschnitt sind über die Störfalldauer weitgehend unauffällig.

Vor dem Störfall gibt es im gesamten Betrachtungsabschnitt keine Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten („130 km/h“). Zu Beginn des Störfalls wird kurzzeitig an allen drei Querschnitten eine Beschränkung auf 100 km/h geschaltet, die aber im weiteren

Verlauf wieder aufgehoben wird. Danach folgt zuerst eine Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit am Hilfs-, dann am Eingangsquerschnitt auf 60 km/h bzw. auf „20 km/h“ (Stau), die erst wieder nach Auflösung des Störfalls aufgehoben wird. Am Ausgangsquerschnitt liegen die geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten während des gesamten Störfalls bei 100 km/h bzw. darüber. Eine Ausnahme bildet hier nur eine kurze Zeitspanne zum Ende des Störfalls, während der 60 km/h geschaltet ist (vgl. Abbildung 5-16).

5.3.3 Störfall manifestiert sich nach kurzer Zeit am Eingangsquerschnitt (Beispiel 2.3)

Im Folgenden ist ein Stauphänomen zu beobachten, bei dem der Störfall im Betrachtungsabschnitt entsteht und sich schon nach kurzer Zeit am Eingangsquerschnitt manifestiert.

Der Störfall ereignete sich an einem Samstagmorgen. Entsprechend ist der Anteil „Lkw-ähnlicher“ Fahrzeuge recht gering.

Betrachtungszeitraum:	9:10 – 10:10 Uhr
Messtag:	13.01.2007 (Samstag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-M14 bis MQ-M16
Fahrtrichtung:	München
Abschnittslänge:	3,725 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	Hilfsquerschnitt mit Wechselverkehrszeichengeber
Sonstige Besonderheiten:	–
Freifahrtgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	teilweise über 130 km/h / frei
Freifahrtgeschwindigkeit nach dem Störfall (gemessen/zulässig):	zeitweise 100 / schwankend 100 km/h bis frei
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	6,1 %

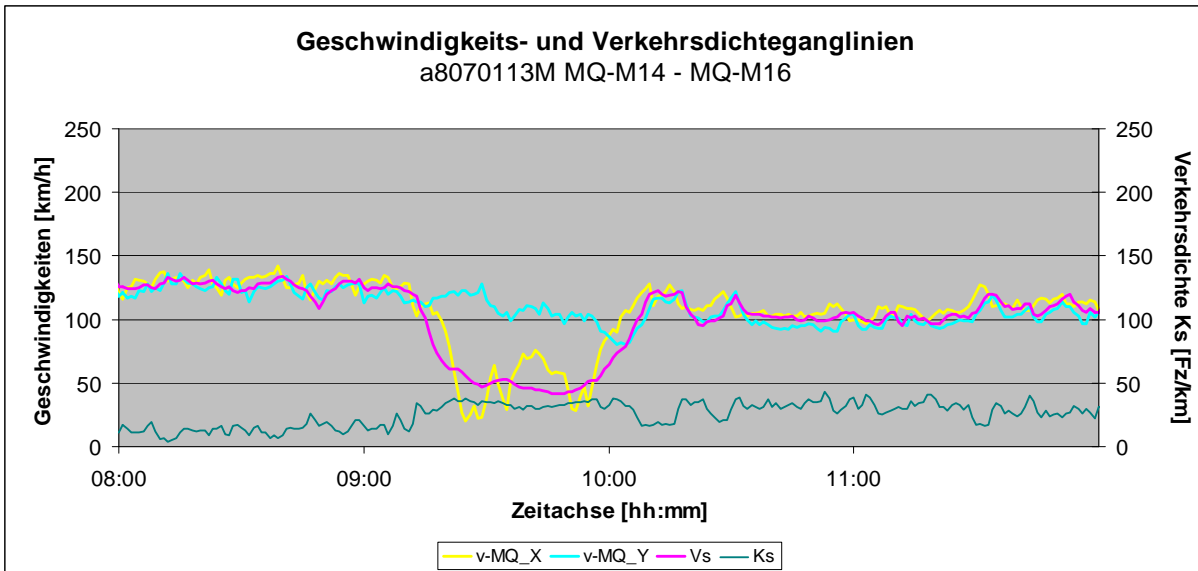


Abbildung 5-17: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 2.3

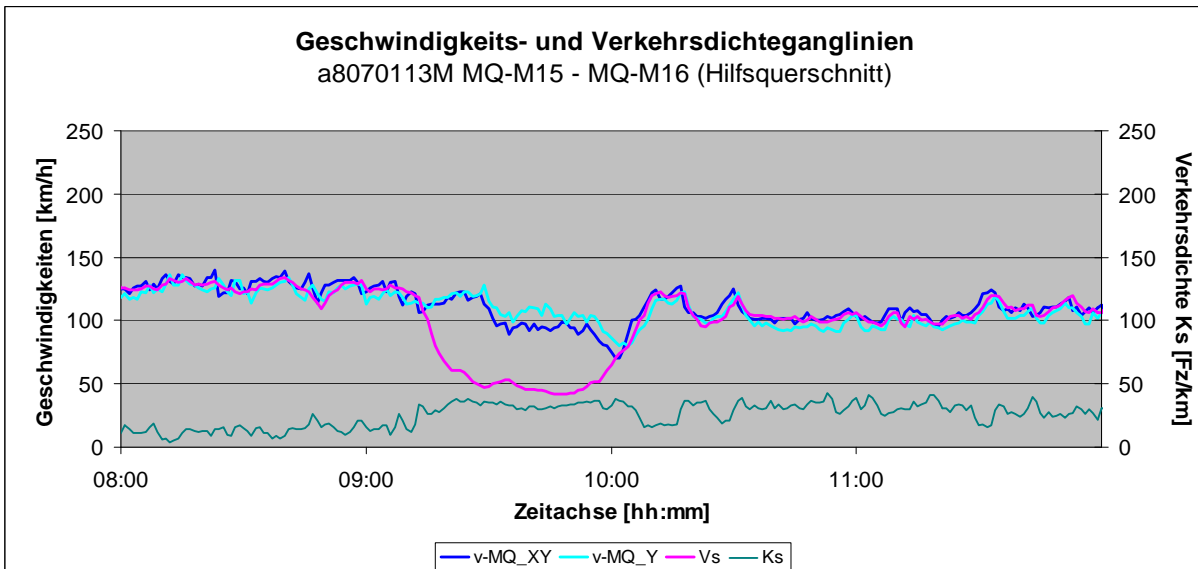


Abbildung 5-18: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 2.3

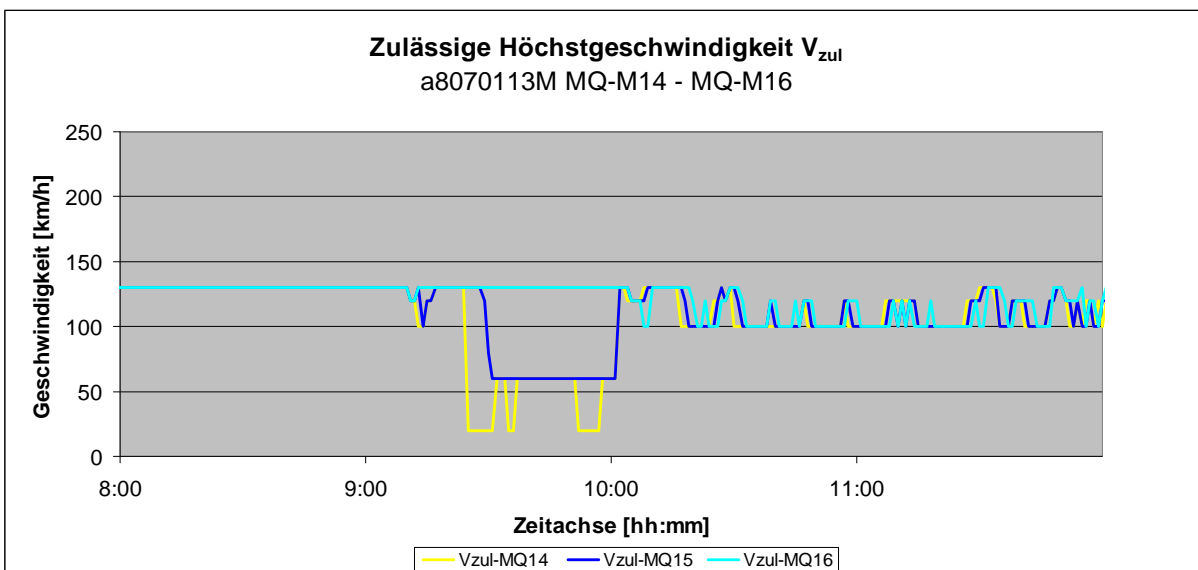


Abbildung 5-19: Ganglinien der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten – Beispiel 2.3

Gegen 9:10 Uhr sinkt die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit, während die lokalen Geschwindigkeiten am Ein- und Ausgangsquerschnitt zunächst weitgehend unauffällig bleiben. Kurz darauf bricht zusätzlich die lokale Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt ein, die Geschwindigkeiten am Hilfs- und Ausgangsquerschnitt verbleiben auf hohem Niveau (vgl. Abbildung 5-17 und Abbildung 5-18). Das Stauende wandert stromaufwärts aus dem Betrachtungsabschnitt hinaus, der Störfall manifestiert sich am Eingangsquerschnitt. Ausgelöst wird der Störfall durch eine Störfallursache, die im Betrachtungsabschnitt selbst liegt. Es kommt zu keiner (längeren) Vollsperrung am Störfallquerschnitt. Dieser kann, wenn auch teilweise eingeschränkt, während der betrachteten Störfallsituation weiterhin passiert werden.

Die streckenbezogene Verkehrsdichte K_s steigt zu Beginn des Störfalls schwankend auf ein höheres Niveau an. Dieses Niveau wird bis zum Ende des Störfalls gehalten und dann sprunghaft wieder verlassen.

Während der Auflösung des Störfalls wandert das Stauende stromabwärts über den Eingangsquerschnitt zurück in den Betrachtungsabschnitt hinein. Der Stauanfang verbleibt über die gesamte Störfalldauer im Betrachtungsabschnitt.

Zu Beginn des Störfalls wird kurzzeitig an allen drei Querschnitten eine Beschränkung auf 100 km/h geschaltet, die aber im weiteren Verlauf wieder aufgehoben wird („130 km/h“). Während des Störfalls wird zuerst am Eingangs-, gefolgt vom Hilfsquerschnitt die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf „20 km/h“ (Stau) bzw. 60 km/h reduziert. Nach Auflösung des Störfalls werden alle Geschwindigkeitsbeschränkungen wieder aufgehoben („130 km/h“). Am Ausgangsquerschnitt liegt während des gesamten Störfalls keine Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit vor (vgl. Abbildung 5-19).

5.4 Ausgesuchte Störfälle – Störfallursache wandert stromabwärts in den Betrachtungsabschnitt

Wandert die ausschlaggebende Störfallursache stromabwärts in den Betrachtungsabschnitt hinein, so kommt es zuerst zu einem Einbruch der lokalen Geschwindigkeiten am Eingangsquerschnitt. Die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit V_s sowie die lokale Geschwindigkeit am Ausgangsquerschnitt v_{MQY} bleiben zunächst unauffällig (vgl. Kapitel 4.2.3). Mit zeitlichem Verzug sinkt ebenfalls die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit V_s , die streckenbezogene Verkehrsdichte K_s steigt an.

Sobald die Störfallursache stromabwärts in den Betrachtungsabschnitt gewandert ist entspricht der weitere Verlauf dem Verlauf eines Störfalls, dessen Ursache im Betrachtungsabschnitt selbst liegt und der sich am Eingangsquerschnitt manifestiert hat.

Aufgrund des sehr ähnlichen Störfallverlaufs ist es schwierig, zwischen einem Störfall zu unterscheiden, der stromabwärts in den Betrachtungsabschnitt hineingewandert ist, und einem Störfall, der sich im Betrachtungsabschnitt in unmittelbarer Nähe zum Eingangsquerschnitt gebildet hat.

Beispiel 3.1 zeigt einen Störfallverlauf, bei dem zuerst die lokale Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt v_{MQX} und später die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit V_s einbricht.

5.4.1 Störfallursache wandert stromabwärts in den Betrachtungsabschnitt (Beispiel 3.1)

Im Beispiel 3.1 ist ein Stauphänomen zu beobachten, bei dem zuerst die lokale Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt v_{MQX} und zeitlich später die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit V_s einbricht. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Messwerte und Analysen wird davon ausgegangen, dass die ausschlaggebende Störfallursache stromabwärts in den Betrachtungsabschnitt hineingewandert ist.

Der Störfall ereignete sich an einem Freitagnachmittag. Aufgrund des Wochentags ist ein größerer Anteil „Lkw-ähnlicher“ Fahrzeuge im Fahrzeugkollektiv vorhanden.

Betrachtungszeitraum:	14:10 – 16:10 Uhr
Messtag:	23.02.2007 (Freitag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-S17 bis MQ-S18
Fahrtrichtung:	Stuttgart
Abschnittslänge:	2,330 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	–
Sonstige Besonderheiten:	–
Freifahrgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	teilweise unter 100 / 100 km/h
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	10,1 %

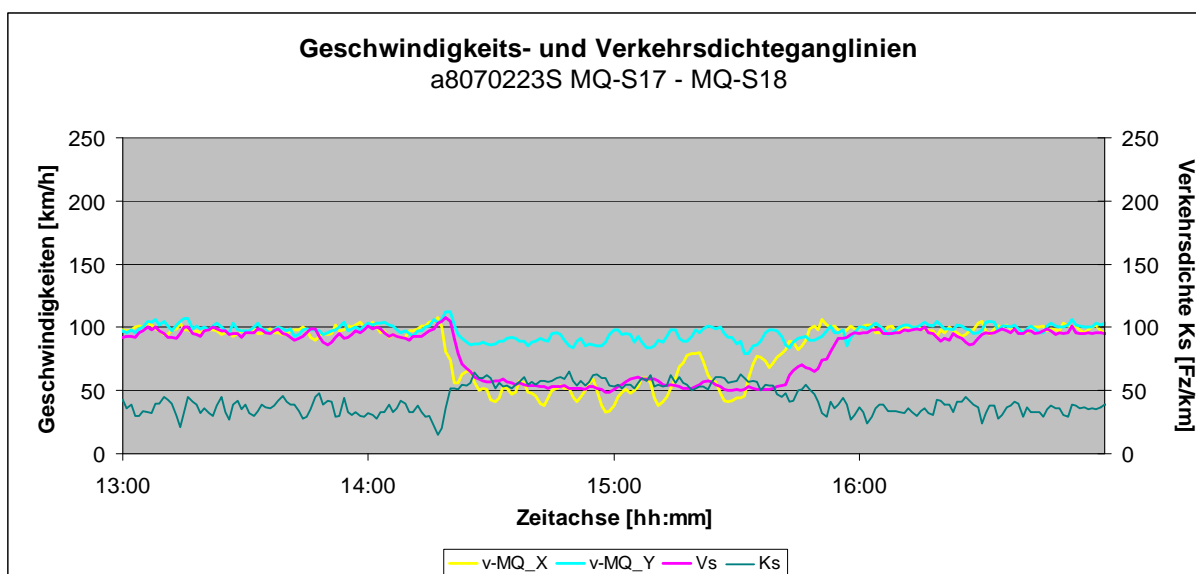


Abbildung 5-20: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 3.1

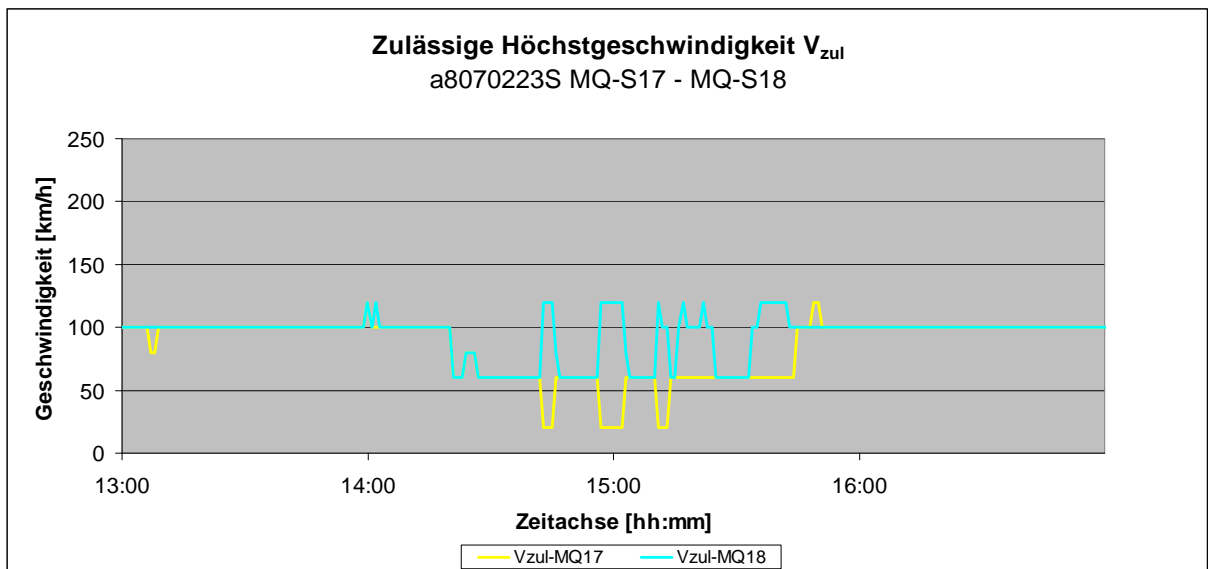


Abbildung 5-21: Ganglinien der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten – Beispiel 3.1

Gegen 14:10 Uhr bricht die lokale Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt v_{MQX} ein, wodurch sich eine Stauung manifestiert. Mit zeitlichem Versatz bricht ebenfalls die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit V_S ein (vgl. Abbildung 5-20). Ausgelöst wird der Störfall vermutlich von einem langsam durch den Betrachtungsabschnitt fahrenden Fahrzeug, das nur schwer überholt werden kann. Das Fahrzeug bleibt im weiteren Verlauf des Störfalls im Betrachtungsabschnitt stehen, bzw. es bildet sich eine neue Störfallursache, die den Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt bestimmt. Der neue maßgebende Störfallquerschnitt kann, wenn auch teilweise nur eingeschränkt, während des Störfalls passiert werden.

Die streckenbezogene Verkehrsdichte K_S fällt zu Beginn des Störfalls kurzzeitig und steigt dann sprunghaft auf ein höheres Niveau an. Dieses Niveau wird bis zum Ende des Störfalls gehalten und dann langsam sinkend wieder verlassen. Gleichzeitig ist zu Beginn des Störfalls ein kurzzeitiger Anstieg der lokalen Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt v_{MQX} zu beobachten, der sich (zeitlich) später ebenfalls bei der streckenbezogenen Reisegeschwindigkeit V_S und der lokalen Geschwindigkeit am Ausgangsquerschnitt v_{MQY} zeigt. Die Verläufe der Verkehrsdichteganglinie sowie der Geschwindigkeitsganglinien deuten wie bereits erwähnt auf ein Fahrzeug hin, das langsam (langsamer als die Fahrzeuge zuvor) in den Betrachtungsabschnitt hineinfährt und nicht ohne Weiteres überholt werden kann. Hinter diesem kommt es zu einer Stauung von Fahrzeugen, die sich mit derselben langsamen Geschwindigkeit fortbewegen (sprunghafter Anstieg der Verkehrsdichte). Diejenigen Fahrzeuge, die das langsam fahrende Fahrzeug überholt haben, befinden sich dann in einem relativ freien Verkehrszustand (Verkehrsdichte K_S ist gering; kurzzeitiger Anstieg der Geschwindigkeiten).

Eine Überstauung des gesamten Betrachtungsabschnitts findet nicht statt. Die lokalen Geschwindigkeiten am Ein- und Ausgangsquerschnitt (v_{MQX} , v_{MQY}) sowie die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit V_S liegen während des Störfalls zu keinem Zeitpunkt auf gleichem bzw. ähnlichem Niveau.

Bei der Auflösung des Störfalls wandert zuerst das Stauende über den Eingangsquerschnitt in den Betrachtungsabschnitt. Die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit V_S steigt mit zeitlichem Verzug. Während dieses Zeitraums befindet sich der Störfall vermutlich noch im Betrachtungsabschnitt.

Die lokale Geschwindigkeit am Ausgangsquerschnitt v_{MQY} sinkt zu Beginn des Störfalls leicht ab, verbleibt dann im weiteren Verlauf bis zum Störfallende jedoch weitgehend auf diesem Niveau.

Vor dem Störfall werden am Ein- und Ausgangsquerschnitt zulässige Höchstgeschwindigkeiten von 100 km/h geschaltet, mit einer kurzzeitigen Ausnahme von 120 km/h kurz vor dem Störfall. Während des Störfalls reduzieren sich die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten am Eingangsquerschnitt auf 60 km/h bzw. „20 km/h“ (Stau). Die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten am Ausgangsquerschnitt liegen stark schwankend zwischen 60 km/h und 120 km/h (vgl. Abbildung 5-21).

5.5 Zusammenfassung „Ausgesuchte Störfallsituationen“

In diesem Kapitel werden gezielt ausgesuchte Verkehrsabläufe vorgestellt, die im weiteren Verlauf der Arbeit zur Überprüfung der entwickelten Prognoseverfahren eingesetzt werden. Diese decken weitgehend die in Kapitel 4 dargestellten Störfallsituationen ab.

6 Charakteristische Zeitlücke t_{ch}

Ziel: Aufbauend auf den in Kapitel 4 durchgeführten Analysen möglicher Störfallsituationen, soll im Folgenden ein Indikator, die charakteristische Zeitlücke t_{ch} , zur Beschreibung der damit verbundenen herrschenden Verkehrsabläufe im Betrachtungsabschnitt eingeführt werden.

Die charakteristische Zeitlücke t_{ch} ist von zentraler Bedeutung für die in den weiteren Kapiteln vorgestellten Verfahren zur Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose sowie zur Stau-längenberechnung.

6.1 Ausgangslage

Die der Störfallanalyse in Kapitel 4 zugrunde liegenden Vereinfachungen betrachten als kleinste Einheiten den Betrachtungsabschnitt selbst bzw. die sich bildenden Teilabschnitte.

Eine modellhafte Betrachtung des Verkehrszustandes über einen Streckenabschnitt stellt im Allgemeinen eine Mittelung dar und impliziert, dass der Verkehr im Streckenabschnitt als zeitlich stationär und homogen angesehen werden kann. In Abhängigkeit vom Verkehrszustand und dem zugrunde gelegten Mittelungsintervall entspricht diese Modellannahme mehr oder weniger der Realität.

Bei vorhandenen Freiheitsgraden, z.B. im teilgebundenen Verkehrszustand, und bei kurzen Mittelungsintervallen, z.B. Minutenwerten, kann die gemittelte Verkehrsstärke innerhalb eines gleichbleibenden Verkehrszustandes stark schwanken (vgl. [Ker00]). Eine Abnahme der Schwankungen bei der Verkehrsstärke kann durch eine Verlängerung des Mittelungsintervalls oder aber durch eine Abnahme der Freiheitsgrade aufgrund von veränderten verkehrlichen Randbedingungen hervorgerufen werden. Veränderte verkehrliche Randbedingungen sind insbesondere während eines Störfalls zu beobachten.

Im Folgenden wird die Verkehrsstärke im Falle eines Störfalls für die sich bildenden möglichen Teilabschnitte innerhalb des Betrachtungsabschnitts untersucht.

6.2 Herleitung der charakteristischen Zeitlücke t_{ch}

Bildet sich aufgrund eines Störfalls eine Stauung im Betrachtungsabschnitt, so verändern sich die verkehrlichen Randbedingungen. Je nach Lage der Störfallursache und der Störfallausbreitung kann bei der Betrachtung einer Störfallursache der Betrachtungsabschnitt in bis zu drei unterschiedliche Teilabschnitte unterteilt werden (vgl. Kapitel 4 sowie Abbildung 6-1). Die sich bildenden Teilabschnitte können vereinfacht als Teilabschnitt mit freiem Verkehrszustand stromabwärts vor dem Störfall (Teilabschnitt 1), als Teilabschnitt mit gestautem Verkehrszustand (Teilabschnitt 2) und als Teilabschnitt mit freiem Verkehrszustand stromabwärts nach dem Störfall (Teilabschnitt 3) betrachtet werden. Von den veränderten verkehrlichen Randbedingungen aufgrund des Störfalls sind jedoch nur der Teilabschnitt 2 sowie der Teilabschnitt 3 betroffen. Der Teilabschnitt 1 wird von dem Störfall nicht beeinflusst.

Im Weiteren wird die Betrachtung der Verkehrsstärke für das 3-Bereichsmodell durchgeführt, da dieses alle drei möglichen Teilabschnitte beinhaltet. Die Ergebnisse der Untersuchung lassen sich auf die entsprechenden Teilabschnitte der 1- und 2-Bereichsmodelle übertragen.

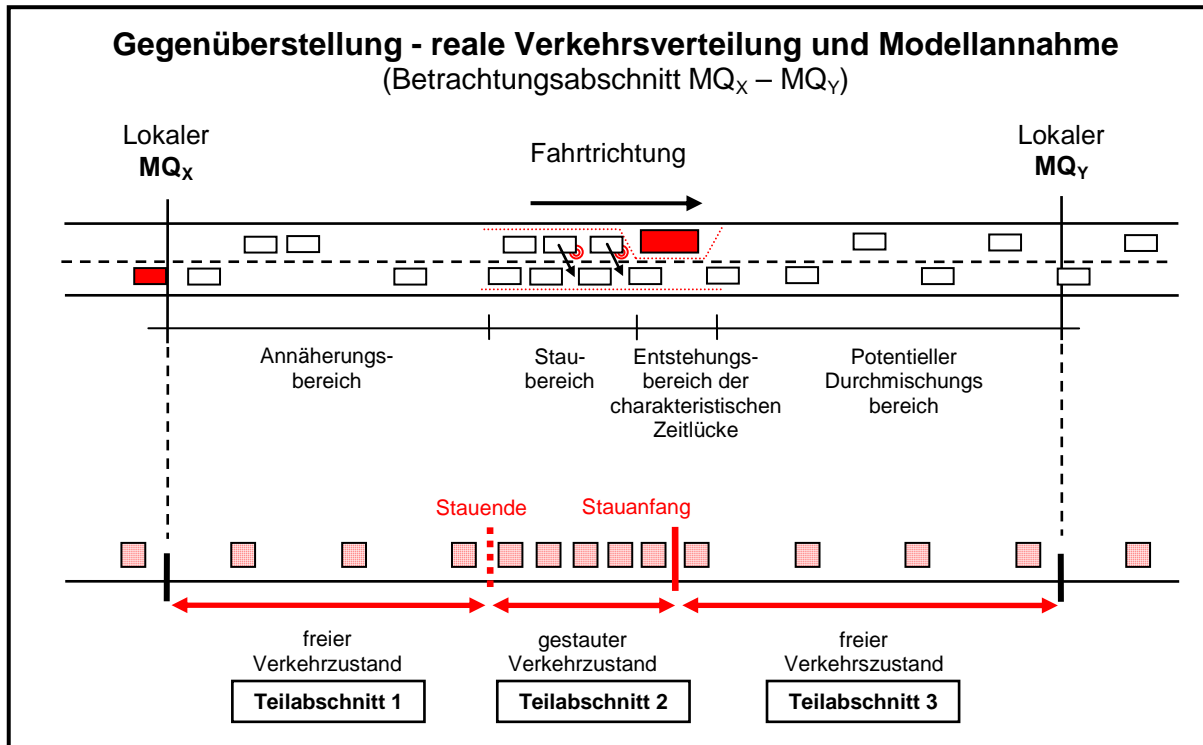


Abbildung 6-1 stellt beispielhaft für den Betrachtungsabschnitt eine mögliche Fahrzeugverteilung dem 3-Bereichsmodell gegenüber. Aufgrund eines Störfalls kommt es zu einer Veränderung der verkehrlichen Randbedingungen (hier: Wegfall eines Fahrstreifens). Die ursprüngliche Kapazität des Autobahnquerschnitts, die außerhalb des Störfalls für den gesamten Betrachtungsabschnitt bauartbedingt gleich ist, verringert sich am Störfallquerschnitt.

Übersteigt die aktuelle dem Störfallquerschnitt zufließende Verkehrsstärke die verringerte Kapazität am Störfallquerschnitt, so kommt es zu einer Rückstauung. Innerhalb des gestauten Bereichs, des Teilabschnitts 2, ist die Anzahl der Freiheitsgrade minimal. Weg- und Zeitlücken, die die Fahrzeuge bei der Durchfahrt durch den Teilabschnitt 1 zueinander haben, sind nicht mehr vorhanden.

Im Falle einer Stauung bestimmt die verringerte Kapazität am Störfallquerschnitt nicht nur den Verkehrsablauf im gestauten Teilabschnitt 2, sondern ebenfalls den Verkehrsablauf im freien Teilabschnitt 3. Während der Störfalldauer entspricht die maximale Verkehrsstärke im Teilabschnitt 3 der verringerten Kapazität am Störfallquerschnitt. Aufgrund der Stauung, die in Analogie als ein gefüllter Trichterbereich angesehen werden kann (vgl. Abbildung 6-4), ist im Teilabschnitt 3 die maximale Verkehrsstärke annähernd gleich der mittleren Verkehrsstärke und kann als sehr konstant angenommen werden.

Kurz hinter dem Störfallquerschnitt, im Teilabschnitt 3, steht die ursprüngliche Kapazität des Autobahnquerschnitts wieder zur Verfügung (hier: beide Fahrstreifen sind befahrbar). Diese ist größer als die verringerte Kapazität am Störfallquerschnitt. Da Letztere jedoch die maximale Verkehrsstärke im Teilabschnitt 3 bestimmt, kann hier ein freier Verkehrszustand vorausgesetzt werden. Somit bestimmt die verringerte Kapazität am Störfallquerschnitt sowohl die Verkehrsstärke im Teilabschnitt 2 als auch die Verkehrsstärke im Teilabschnitt 3.

Über den Kehrwert der Verkehrsstärke berechnet sich die mittlere Bruttozeitlücke zwischen den Fahrzeugen (vgl. Formel 6.1). Für den Betrachtungsabschnitt bedeutet dies, dass am Störfallquerschnitt aufgrund der sprunghaften Kapazitätsverringering und der sich bildenden Rückstauung eine neue und sehr konstante Verkehrsstärke entsteht, über die eine ebenfalls neue und sehr konstante Bruttozeitlücke t_{brutto} berechnet werden kann. Diese wird während eines Störfalls im Weiteren als charakteristische Zeitlücke t_{ch} bezeichnet (vgl. Formel 6.1). Repräsentativ für den gesamten Betrachtungsabschnitt ist die charakteristische Zeitlücke t_{ch} genau dann, wenn sie am Ausgangsquerschnitt erhoben werden kann.

Gleichförmiger Verkehrsablauf in den einzelnen Teilabschnitten vorausgesetzt, stellt sich die charakteristische Zeitlücke t_{ch} nicht nur am Störfallquerschnitt selbst, sondern ebenfalls in den Teilabschnitten 2 und 3 ein. Liegt ein Messquerschnitt innerhalb eines dieser zwei Teilabschnitte, so kann die charakteristische Zeitlücke t_{ch} dort mittels lokaler Messtechnik (hier: Induktionsschleife zur Messung der Verkehrsstärke) ermittelt werden.

$$t_{\text{ch}} = t_{\text{brutto}, MQ_{Y|\text{gestört}}} \quad (6.1)$$

$$t_{\text{brutto}} = \frac{1}{q} \quad (6.2)$$

mit:

t_{ch}	=	charakteristische Zeitlücke
$t_{\text{brutto}, MQ_{Y \text{gestört}}}$	=	Bruttozeitlücke am Ausgangsquerschnitt bei gestörtem Verkehrszustand im Betrachtungsabschnitt
q	=	Verkehrsstärke

6.3 Überprüfung der charakteristischen Zeitlücke

Liegen der Störfallquerschnitt und der Ausgangsquerschnitt nicht direkt übereinander, so ist die Messbarkeit der charakteristischen Zeitlücke t_{ch} am Ausgangsquerschnitt abhängig von der Gleichförmigkeit des Verkehrsflusses zwischen den beiden Querschnitten. Generell gilt, dass die Wahrscheinlichkeit eines gleichförmigen Verkehrsflusses mit zunehmender Distanz zwischen Störfall- und Ausgangsquerschnitt abnimmt. Nachfolgend erfolgt eine Abschätzung

des benötigten Mittelungsintervalls zur Gewinnung einer stabilen charakteristischen Zeitlücke t_{ch} sowie deren Überprüfung am praktischen Beispiel.

Theoretische Abschätzung:

Im Weiteren werden eine Betrachtungsabschnittslänge von 4 km, ein Aggregationsintervall von einer Minute für die gemessenen lokalen und streckenbezogenen Verkehrsdaten sowie eine mittlere Geschwindigkeit von 120 km/h im freien Verkehrszustand angenommen. Dies entspricht weitgehend den realen Randbedingungen der verwendeten Datenbasis.

Unter Berücksichtigung dieser angenommenen Werte beträgt die Distanz zwischen einer Störfallursache, die innerhalb des Betrachtungsabschnitts liegt, und dem Ausgangsquerschnitt null bis vier Kilometer. Diese Distanz entspricht ebenfalls der Länge des Durchmischungsbereichs, in dem ein freier Verkehrszustand herrscht. Die zur Durchfahrt benötigte Reisezeit beträgt somit zwischen 0 und 2 Minuten. Innerhalb dieser Zeitspanne können sich die Bruttozeitlücken zwischen den Fahrzeugen verändern, was direkten Einfluss auf die charakteristische Zeitlücke t_{ch} hat.

Für eine Abschätzung wird vereinfachend angenommen, dass sich die Störfallursache in der Mitte des Betrachtungsabschnitts befindet. Somit ergibt sich eine mittlere Reisezeit von 1 Minute.

Bei einer Mittelung über 1 Minute, wie sie bereits durch das Aggregationsintervall in der Datenbasis vorliegt, ist damit eine Stabilität der mittleren Bruttozeitlücke und somit der charakteristischen Zeitlücke t_{ch} zu erwarten. Dieses zeigt sich auch so in der Praxis.

Überprüfung am praktischen Beispiel:

Abbildung 6-2 zeigt Ganglinienverläufe der über 1 Minute aggregierten Verkehrsstärke und lokalen Geschwindigkeiten für den Betrachtungsabschnitt MQ-M14 bis MQ-M16 am 28.04.2010. Der gewählte Betrachtungsabschnitt hat eine Gesamtlänge von 3,725 km und wird durch einen Hilfsquerschnitt MQ-M15 in zwei Abschnitte von 1,875 km und 1,850 km Länge unterteilt. Zu beobachten ist, dass die lokal gemessene Geschwindigkeit am Hilfsquerschnitt v_{MQ-M15} gegen 7:15 Uhr für ca. eine Stunde einbricht. Die lokal gemessene Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt v_{MQ-M14} bricht wenig später gegen 7:30 Uhr ebenfalls für ca. eine Stunde ein, während sich die lokal gemessene Geschwindigkeit am Ausgangsquerschnitt v_{MQ-M16} weitgehend unauffällig verhält. Es stellt sich eine Überstauung des Eingangsquerschnitts ein. Eine Analyse der Geschwindigkeitsganglinien lässt darauf schließen, dass der Störfall in der Nähe des Messquerschnitts MQ-M15 im ersten Abschnitt zwischen MQ-M14 und MQ-M15 liegt. Grund für die Annahme ist, dass die lokale Geschwindigkeit am Hilfs- bzw. Stützquerschnitt v_{MQ-M15} zwar zeitlich vor der lokalen Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt v_{MQ-M14} einbricht, der Einbruch aber nicht so stark ist wie am Eingangsquerschnitt. Würde der Störfallquerschnitt im zweiten Abschnitt zwischen MQ-M15 und MQ-M16 liegen, so wäre bei einer Überstauung des Eingangsquerschnitts der gesamte erste Abschnitt überstaut. Dies hätte zur Folge, dass die lokalen Geschwindigkeiten am Stütz- und am Eingangsquerschnitt auf gleichem Niveau liegen müssten, was sie nicht tun.

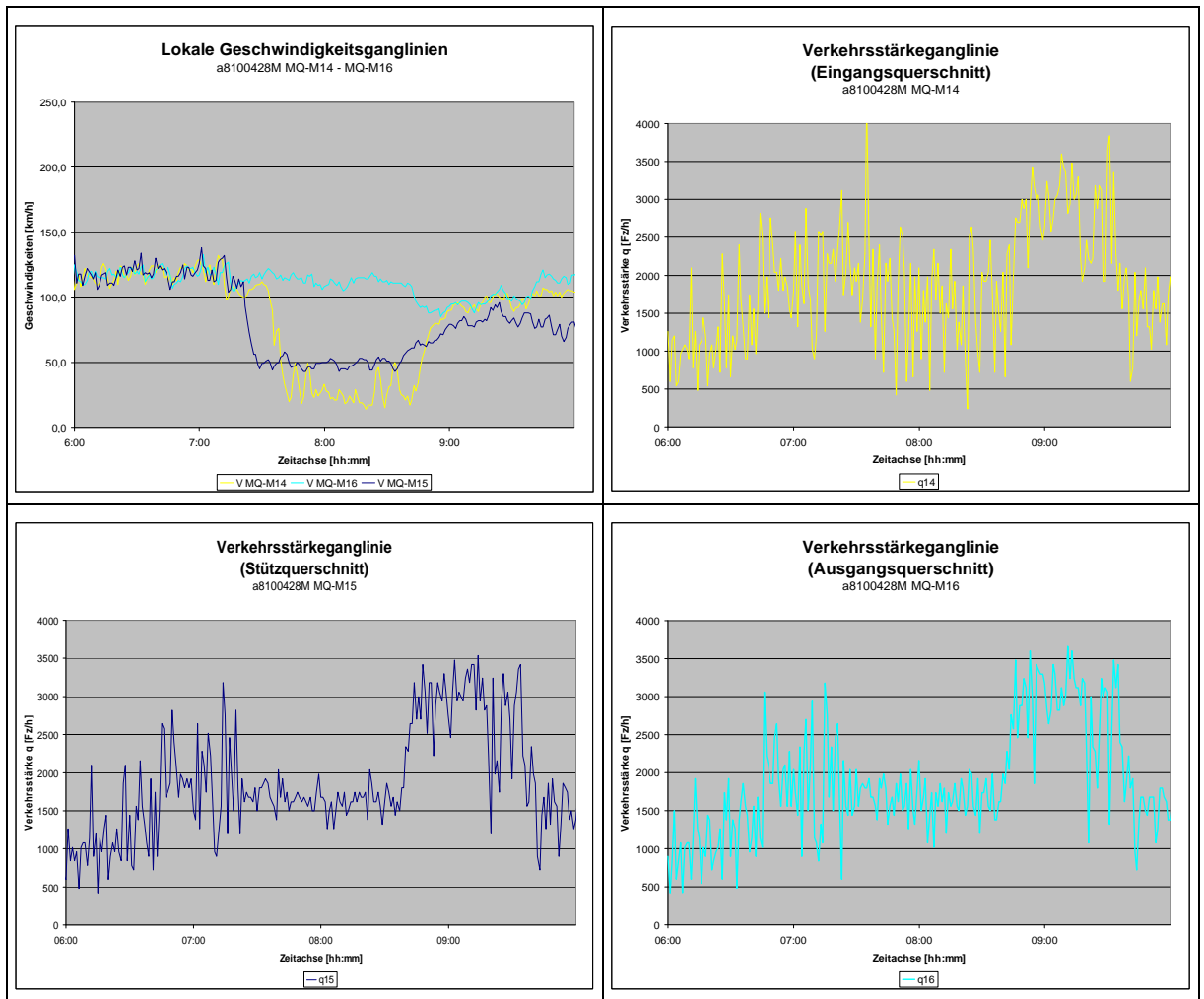


Abbildung 6-2: Verkehrsstärkeganglinien in Abhängigkeit von der räumlichen Lage der Störfallursache

Für den Zeitraum des Störfalls können sowohl am Stützquerschnitt MQ-M15 als auch am Ausgangsquerschnitt MQ-M16 Verkehrsstärkeganglinien beobachtet werden, die sich durch geringe Amplituden und ein gleichbleibendes Verkehrsstärkeniveau auszeichnen. Beide Ganglinien verhalten sich ähnlich. Die Amplituden am Ausgangsquerschnitt MQ-M16 sind nur geringfügig größer als die Amplituden am Hilfsquerschnitt MQ-M15 (vgl. Abbildung 6-2).

Ursache für die Homogenisierung der Verkehrsstärkeganglinie am Stütz- und am Ausgangsquerschnitt ist der Störfall im Betrachtungsabschnitt. Die Verkehrsstärke wird bestimmt durch die verringerte Kapazität am Störfallquerschnitt. Aufgrund der verringerten Kapazität entsteht ein Rückstau. Alle in den Betrachtungsabschnitt einfahrenden Fahrzeuge laufen auf die Stauung auf, wodurch bestehende Schwankungen in der Verkehrsstärke ausgeglichen werden. Am Störfallquerschnitt bekommt der Verkehrsfluss eine neue, sehr konstante Verkehrsstärke zugeordnet. Als Kehrwert der Verkehrsstärke stellt sich die charakteristische Zeitlücke t_{ch} ein.

Bei der Betrachtung des Verkehrsflusses für den Bereich stromabwärts nach dem Störfallquerschnitt (Teilabschnitt 3) ist zu beobachten, dass der Verkehrsfluss für mindestens ca. 2 km als weitgehend gleichförmig zu bezeichnen ist. Die charakteristische Zeitlücke t_{ch} kann auch entsprechend noch in einer Distanz von ca. zwei Kilometern nachgewiesen werden.

Darüber hinaus können an dem gewählten Beispiel auch noch qualitative Unterschiede zwischen einer im Durchmischungsbereich (Teilabschnitt 3) und einer im Rückstaubereich (Teilabschnitt 2) gewonnenen charakteristischen Zeitlücke t_{ch} dargestellt werden. Die im Rückstaubereich gewonnene charakteristische Zeitlücke t_{ch} hat eine höhere Schwankungsbreite. Die geringe Schwankungsbreite wird hier auf die Trichterwirkung im Störfallquerschnitt zurückgeführt (vgl. Abbildung 6-4).

Die Verkehrsstärkeganglinie am Eingangsquerschnitt MQ-M14 lässt einen ähnlichen Verlauf wie die Ganglinien am Hilfs- und Ausgangsquerschnitt erahnen (vgl. Abbildung 6-2). Dieser ist jedoch aufgrund der wesentlich größeren Amplituden nicht mit Bestimmtheit ableitbar. Werden die über eine Minute aggregierten Verkehrsstärken jedoch zusätzlich über ein 5- bzw. 10-Minutenintervall gemittelt, so gleichen sich die Verläufe an. Dies gilt besonders für den Zeitraum zwischen der Überstauung des Eingangsquerschnitts (ca. 7:30 Uhr) und dem Auflösen des Staus zum Zeitpunkt des Anstiegs der Verkehrsstärke am Hilfsquerschnitt MQ-M15 (ca. 8:30 Uhr) (vgl. Abbildung 6-3).

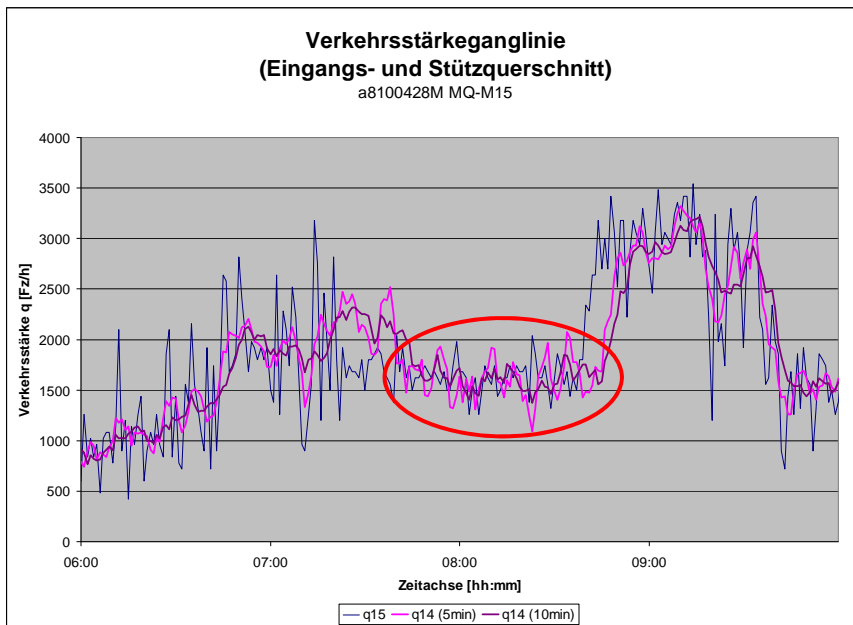


Abbildung 6-3: Vergleich der Verkehrsstärkeganglinien (gemittelt und ungemittelt) am Eingangs- und am Stützquerschnitt

Für den gestauten Bereich stromabwärts vor dem Störfallquerschnitt (Teilabschnitt 2) ist zu beobachten, dass bei einer Distanz von weit weniger als zwei Kilometern die Gleichförmigkeit des Verkehrsflusses nicht mehr gegeben ist. Die charakteristische Zeitlücke t_{ch} kann hier nicht mehr mit einem Aggregationsintervall von einer Minute gemessen werden. Es kommt zu verstärkten Schwankungen der Verkehrsstärke.

Aus dem Vergleich der Verkehrsflussbeobachtungen für den gestauten Teilabschnitt 2 und den freien Teilabschnitt 3 lässt sich ableiten, dass die Mittelung der Verkehrsstärke am Störfallquerschnitt (Trichterwirkung) in etwa einer arithmetischen Mittelung mit einem Mittelungsintervall von mindestens 5 bis 10 Minuten entspricht.

Mit zunehmendem Mittelungsintervall werden arithmetische Mittlungen träge. Positive und negative Ausschläge werden stärker nivelliert. Die Mittelungsergebnisse spiegeln bei stark schwankenden Ausgangswerten in einem solchen Fall nicht mehr die aktuelle Dynamik des Verkehrsflusses wider.

Daraus lässt sich folgern, dass die charakteristische Zeitlücke t_{ch} mit Vorteil stromabwärts hinter dem Störfall gemessen werden sollte. In der vorliegenden Arbeit wird aus diesem Grunde derjenige Messquerschnitt gewählt, der innerhalb des Betrachtungsabschnitts mit größter Wahrscheinlichkeit hinter dem Störfallquerschnitt liegt.

6.4 Veranschaulichungsbeispiel Trichter

In Abbildung 6-4 wird in einer schematischen Darstellung der Straßenverkehrsbereich dem Veranschaulichungsbeispiel eines Trichters gegenübergestellt.

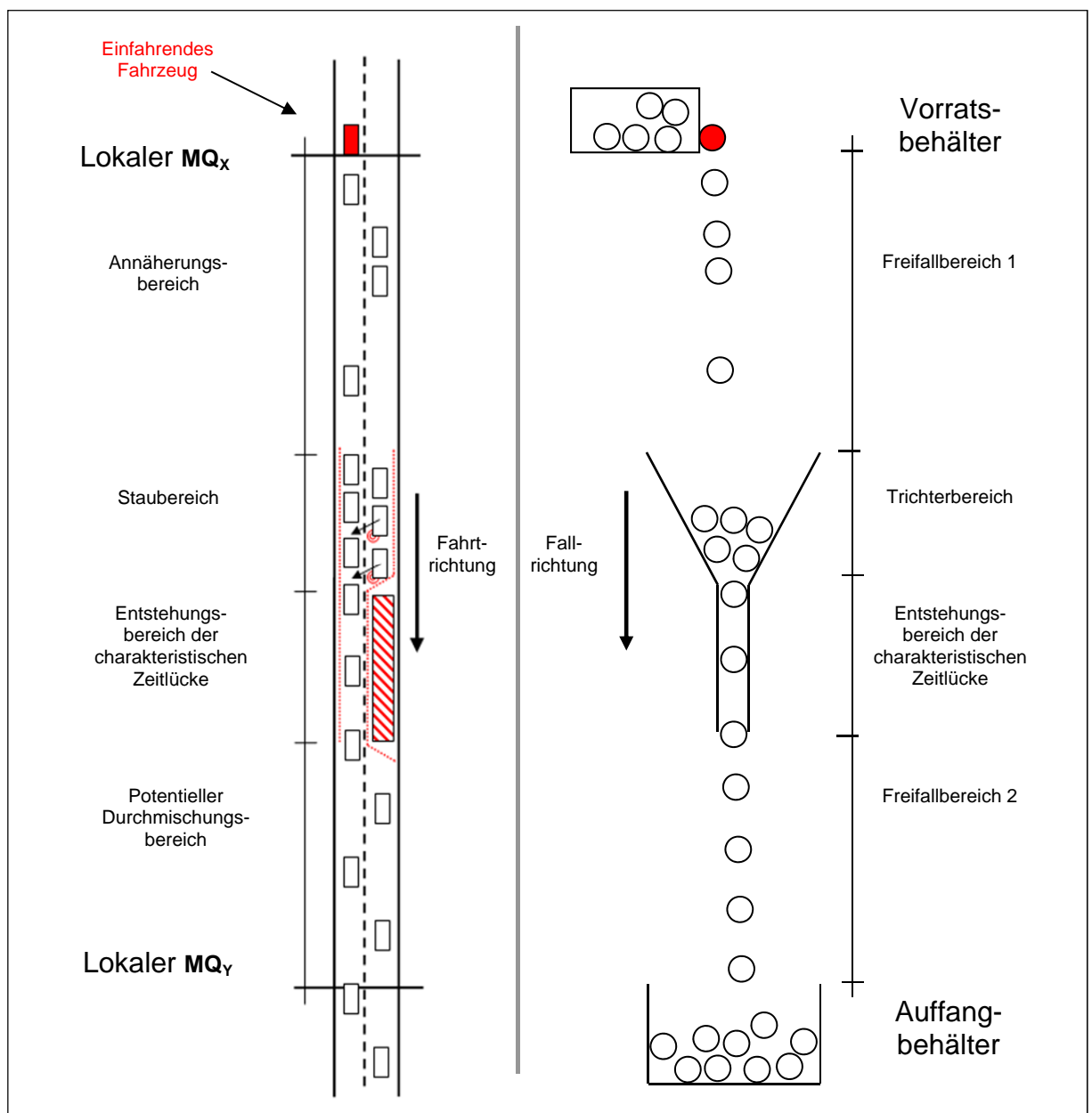


Abbildung 6-4: Veranschaulichungsbeispiel Trichter

Vereinfacht kann die charakteristische Zeitlücke t_{ch} und ihre Entstehung anhand eines Trichtermodells dargestellt werden. Im gewählten Veranschaulichungsbeispiel entspricht der stromaufwärts liegende Abschnitt einem Vorratsbehälter. Aus dem Vorratsbehälter werden in unregelmäßigen Zeitintervallen Kugeln in einen Trichter geschüttet. Der Freifallbereich 1 entspricht im Straßenverkehr dem Annäherungsbereich an den Störfallquerschnitt. Die Zeitlücken aufeinanderfolgender Fahrzeuge können hier stark schwanken. Die in den Trichter hineinfliegende Kugelmenge übersteigt die aus dem Trichter hinausfließende Menge. Es kommt zu einem Rückstau im Trichter. Dieser entspricht im Straßenverkehr dem Rückstau aufgrund eines die aktuelle Kapazität übersteigenden Verkehrsflusses. Durch den Rückstau im Trichter werden alle Zeitlücken zwischen den in den Trichter hineinfliegenden Kugeln „zerstört“. Die Zeitlücke zwischen den abfließenden Kugeln wird durch die Größe des Trichterrohres bestimmt. In der Analogie entspricht das Trichterrohr der verringerten Kapazität im Straßenverkehr (z.B. aufgrund eines Fahrstreifenwegfalls). Der Trichter bewirkt, dass die Schwankungen der Zeitlücken zwischen abfließenden Kugeln wesentlich geringer sind. Bei einer Aggregation dieser Zeitlücken im Freifallbereich 2 über eine Minute ergibt sich daraus eine recht stabile mittlere Zeitlücke. Diese entspricht im Straßenverkehr der charakteristischen Zeitlücke t_{ch} . Die Kugeln fallen schließlich in einen Auffangbehälter. Der Auffangbehälter entspricht im Straßenverkehr dem stromabwärts liegenden Abschnitt.

Generell können die Zeitlücken aufeinanderfolgender Kugeln im Freifallbereich als chaotisch betrachtet werden. Robert Shaw hat diese Abläufe anhand eines Tropfenmodells funktional beschrieben [Sha84]. Da in der vorliegenden Arbeit eine umfangreiche (Verkehrs-)Datenbasis zur Verfügung steht, basieren die vorstehenden Ausführungen bezüglich der Zeitlücken im Straßenverkehr auf dieser.

6.5 Zusammenfassung „Charakteristische Zeitlücke t_{ch} “

Im vorangegangenen Kapitel wird der Einfluss einer Störfallursache mit Stauung auf den Verkehrsablauf in den einzelnen Teilabschnitten des Betrachtungsabschnitts untersucht. Dabei kann der Indikator „charakteristische Zeitlücke t_{ch} “ hergeleitet werden, der sich bei einer störfallbedingten Kapazitätsüberschreitung am Störfallquerschnitt einstellt.

Bildet sich ein Rückstau stromabwärts vor dem Störfallquerschnitt, stellt sich sowohl im Rückstaubereich selbst als auch in dem Bereich mit freiem Verkehrszustand stromabwärts hinter dem Störfallquerschnitt ein gleichförmiger (homogener und stationärer) Verkehrsfluss ein. Dieser gleichförmige Verkehrsfluss kann für die der eingesetzten Datenbasis zugrunde liegenden Randbedingungen theoretisch und praktisch dargestellt werden.

Es stellt sich heraus, dass zur Gewinnung der charakteristischen Zeitlücke t_{ch} stromabwärts hinter dem Störfallquerschnitt (Teilabschnitt 3) ein Aggregationsintervall von einer Minute ausreicht, um diese auch nach ca. 2 km noch nachweisen zu können. Im Gegensatz dazu kann die charakteristische Zeitlücke im Rückstaubereich (Teilabschnitt 2) stromabwärts vor dem Störfallquerschnitt nach weniger als 2 km nicht mehr über ein Aggregationsintervall von einer Minute nachgewiesen werden. Hier bedarf es dazu einer zusätzlichen Mittelung über 5 bis 10 Minuten.

Aus dem Vergleich der Verkehrsflussbeobachtungen für den Teilabschnitt 2 und 3 kann abgeleitet werden, dass die verkehrlich bedingte Mittelung der Zeitlücken am Störfallquerschnitt in etwa einer arithmetischen Mittelung über ein 5- bis 10- Minutenintervall entspricht.

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass die charakteristische Zeitlücke t_{ch} möglichst stromabwärts hinter dem Störfallquerschnitt erhoben werden sollte. Für die vorliegende Arbeit bedeutet dieses, dass die charakteristische Zeitlücke t_{ch} am Ausgangsquerschnitt ermittelt wird.

Generell ist festzustellen, dass die charakteristische Zeitlücke t_{ch} sehr stabil ist, solange die Annahme, dass der aktuelle Verkehrsfluss die verringerte Kapazität am Störfallquerschnitt übersteigt, erfüllt ist (Stauung im Betrachtungsabschnitt). Eine sich hier verändernde Kapazität führt zu einer sich ändernden charakteristischen Zeitlücke t_{ch} .

7 Reisezeit- bzw.

Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren – Theorie

Ziel: Nachfolgend soll ein neuartiges dynamisches Verfahren zur Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose entwickelt werden. Das Verfahren soll auf der charakteristischen Zeitlücke t_{ch} basieren und speziell für den Einsatz im „gestörten Verkehrsablauf mit Stauung“ auf Autobahnen ausgelegt sein. Darüber hinaus soll das Verfahren erweiterbar sein für den allgemeinen Einsatz bei beliebigen Verkehrsabläufen.

7.1 Vorgehensweise und Aufbau

Anhand des Flussdiagramms in Abbildung 7-1 wird im Weiteren kurz die generelle Vorgehensweise sowie der Aufbau des optimierten Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahrens dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen im Diagramm aufgeführten Stationen findet in den sich anschließenden Unterkapiteln statt.

Ausgehend von den (verfügbaren) lokalen und streckenbezogenen Messwerten, wird mit Hilfe von definierten Indikatoren und Schwellwerten eine Fallunterscheidung bezüglich des im Betrachtungsabschnitt vorherrschenden Verkehrsablaufs vorgenommen. Dabei wird zwischen einem „gestörten Verkehrsablauf mit Stauung“ und „sonstigen Verkehrsabläufen“ unterschieden.

Im Falle eines „gestörten Verkehrsablaufs mit Stauung“ kann der reale Verkehrsablauf vereinfachend über das definierte Verkehrsmodell A abgebildet werden. Als Ergebnis stellt sich ein modellierter Verkehr A ein, dessen gestörter Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt zur Entstehung einer charakteristischen Zeitlücke t_{ch} führt (vgl. Kapitel 6). Die sich einstellende charakteristische Zeitlücke t_{ch} bildet die Grundlage für das Basisverfahren, welches als Ergebnis eine Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose für den „gestörten Verkehrsablauf mit Stauung“ hat.

Im Fall der „sonstigen Verkehrsabläufe“ wird der reale Verkehrsablauf vereinfachend über das definierte Verkehrsmodell B beschrieben. Als Ergebnis stellt sich ein modellierter Verkehr B ein. Über das definierte Extrapolationsverfahren kann für den modellierten Verkehr B ebenfalls eine Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose für die „sonstigen Verkehrsabläufe“ berechnet werden.

Beide Verfahren, das Basisverfahren für den „gestörten Verkehrsablauf mit Stauung“ sowie das Extrapolationsverfahren für die „sonstigen Verkehrsabläufe“, werden dann zu einem optimierten Verfahren gekoppelt. Das Ergebnis des optimierten Verfahrens ist eine zuverlässige Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose für die in den Betrachtungsabschnitt einfahrenden Fahrzeuge (Fahrzeugkollektiv), unabhängig von den vorherrschenden aktuellen Verkehrsabläufen.

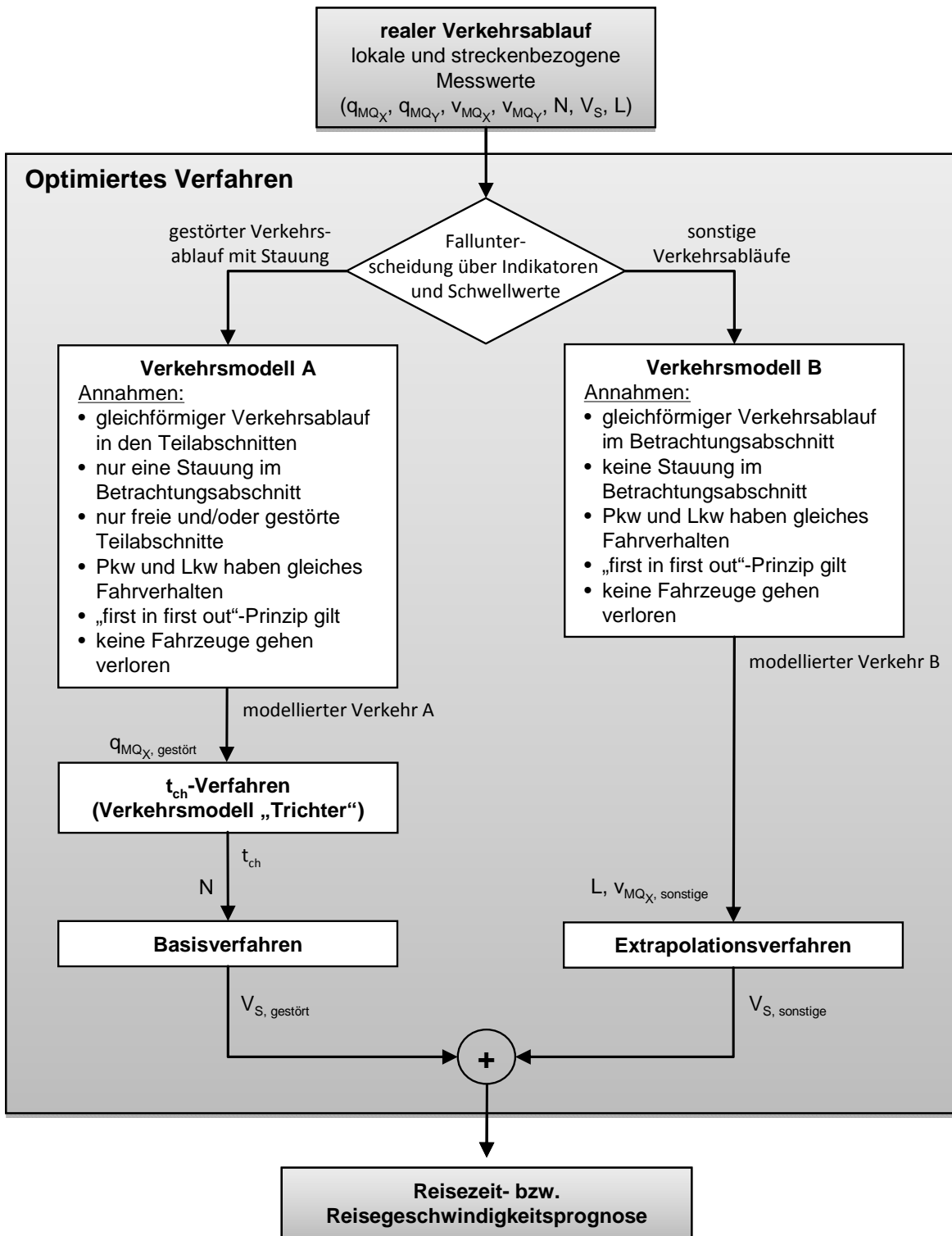


Abbildung 7-1: Flussdiagramm Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren

7.2 Fallunterscheidung über Indikatoren und Schwellwerte

Für das optimierte Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren ist eine Fallunterscheidung des im Betrachtungsabschnitt vorherrschenden Verkehrsablaufs notwendig. Dabei wird, wie zuvor erwähnt, zwischen einem „gestörten Verkehrsablauf mit Stauung“ und den „sonstigen Verkehrsabläufen“ unterschieden.

Bei der Abgrenzung kommen Indikatoren mit entsprechenden Schwellwerten zum Einsatz, die es erlauben, den aktuellen Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt hinreichend genau zu beurteilen. Die Auswahl geeigneter Indikatoren und Schwellwerte basiert dabei sowohl auf empirischen Untersuchungen als auch auf den in Kapitel 4 und Kapitel 5 durchgeführten Störfallanalysen sowie den Darstellungen und Erläuterungen für ausgesuchte Störfallsituationen.

Die folgenden Indikatoren und Schwellwerte werden für die weiteren Abgrenzungen eingesetzt (vgl. Abbildung 7-2):

Nr.	Indikator	Schwellwert	Formel
1	lokale Eingangsgeschwindigkeit v_{MQX}	80 [km/h]	$v_{MQX} < 80$ [km/h]
2	lokale Ausgangsgeschwindigkeit v_{MQY}	80 [km/h]	$v_{MQY} < 80$ [km/h]
3	streckenbezogene Reisegeschwindigkeit V_S	92 [km/h]	$V_S < 92$ [km/h]
4	streckenbezogene Verkehrsdichte K_S	40 [Kfz/km]	$K_S > 40$ [Kfz/km]
5	Kombination aus lokalen und streckenbezogenen Geschwindigkeiten (v_{MQX} , v_{MQY} , V_S)	13 [km/h]	$\frac{(v_{MQX} + v_{MQY})}{2} - V_S > 13$ [km/h]

Abbildung 7-2: Indikatoren und Schwellwerte zur Abgrenzung der Verkehrszustände

Ist mindestens eine der fünf in der Spalte „Formel“ aufgeführten Ungleichungen erfüllt, so herrscht im Betrachtungsabschnitt ein „gestörter Verkehrsablauf mit Stauung“. Ist dies nicht der Fall, so kann der Verkehrsablauf den „sonstigen Verkehrsabläufen“ zugeordnet werden.

Zur besseren Einordnung der gewählten Indikatoren und Schwellwerte werden diese mit aus der Fachliteratur bekannten Indikatoren und Schwellwerten abgeglichen. Aufgrund der Tatsache, dass die gewählten Indikatoren zumeist auf eigenen empirischen Untersuchungen und verkehrlichen Betrachtungen beruhen, ist es nicht immer möglich, den gewählten Indikatoren einen entsprechenden Indikator aus der Fachliteratur gegenüberzustellen. Bei der nachfolgenden Betrachtung der gewählten Indikatoren und Schwellwerte wird ebenfalls kurz auf den jeweiligen Einsatzzweck sowie den konkreten Nutzen im Hinblick auf die in dieser Arbeit durchgeführten Einordnungen eingegangen.

Indikatoren 1 und 2

Den für die Indikatoren 1 und 2, die lokalen Ein- und Ausgangsgeschwindigkeiten, gewählten Schwellwerten (80 km/h) konnte aus der Literatur direkt kein Wert gegenübergestellt werden. Eine Geschwindigkeit von 80 km/h wird jedoch in Form einer Reisegeschwindigkeit als

Schwellwert zwischen Kolonnen- und gestautem Verkehrsfluss auf Autobahnen verwendet [Bri01 / For01].

Einsatzzweck der Indikatoren 1 und 2 ist beispielsweise das frühzeitige Erkennen von Störfallursachen in der Nähe des Ein- oder Ausgangsquerschnitts, bevor die Reisegeschwindigkeit einbricht (vgl. Kapitel 3).

Indikatoren 3 und 4

Der für den Indikator 3, die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit, gewählte Schwellwert (92 km/h) deckt sich weitgehend mit den Werten aus der Literatur. Für zweistreifige Richtungsfahrbahnen auf Autobahnen entspricht er sowohl nach Brilon [Bri01], als auch nach HBS [For01] der Qualitätsstufe E. Die Qualitätsstufe E ist dem gebundenen Verkehr zuzuordnen [For05].

Der für den Indikator 4, die streckenbezogene Verkehrsdichte, gewählte Schwellwert (40 Kfz/km) wird ebenfalls nach Brilon [Bri01] und dem HBS [For01] der Qualitätsstufe E und somit dem gestörten Verkehr zugeordnet.

Einsatzzweck der Indikatoren 3 und 4 ist beispielsweise das frühzeitige Erkennen von Störfallursachen im Betrachtungsabschnitt, ohne dass sich der Störfall am Ein- oder Ausgangsquerschnitt manifestiert. Darüber hinaus erlaubt der Indikator 4 Aussagen darüber, ob der Verkehrsfluss sich in der Nähe der Auslastungsgrenze (Kolonnenverkehr) befindet (vgl. Kapitel 3).

Indikator 5

Dem für den Indikator 5, eine Kombination aus streckenbezogenen und lokalen Geschwindigkeiten, gewählten Schwellwert (13 km/h) konnte in der Literatur kein Wert gegenübergestellt werden. Der Indikator 5 beruht somit ausschließlich auf empirischen Untersuchungen.

Einsatzzweck des Indikators 5 ist beispielsweise das frühzeitige Erkennen von Störfällen im Betrachtungsabschnitt, ohne dass sich der Störfall am Ein- oder Ausgangsquerschnitt manifestiert. Im Gegensatz zu den Indikatoren 3 und 4 deckt der Indikator 5 diejenigen Störfälle ab, die sich beispielsweise bei einer niedrigen Verkehrsdichte und hohen lokalen Geschwindigkeiten am Ein- und Ausgangsquerschnitt ergeben. Dabei kann es vorkommen, dass es einen signifikanten Einbruch der Reisegeschwindigkeit gibt, der Schwellwert (92 km/h) des Indikators 3 dennoch nicht unterschritten wird. Mithilfe des Indikators 5 können diese Störfälle erkannt werden.

Diese Art von Störfällen, bei denen eine niedrige Verkehrsdichte und hohe lokale Geschwindigkeiten am Ein- und Ausgangsquerschnitt zu beobachten sind, entwickelt sich zumeist direkt aus einem freien Verkehrszustand. Eine sukzessive Steigerung der Verkehrsstärke ist nicht zu beobachten. Ursache ist ein plötzlich auftretender Störfall, dessen Störfallquerschnitt nicht in unmittelbarer Nähe zum Ein- bzw. Ausgangsquerschnitt liegt und der weiterhin passiert werden kann. Im Indikator 5 wird dies über die Differenz zwischen einer aus lokalen Geschwindigkeiten extrapolierten Reisegeschwindigkeit und der gemessenen Reisegeschwindigkeit untersucht. Dabei wird vorausgesetzt, dass im freien Verkehrszustand ein gleichförmiger Verkehrsablauf herrscht, bei dem an jeder Stelle des

Betrachtungsabschnitts die gleiche lokale Geschwindigkeit gilt. Da dieses in der Realität nicht immer der Fall ist, wird als maßgebende lokale Geschwindigkeit der Mittelwert der lokalen Geschwindigkeiten am Ein- und Ausgangsquerschnitt angesetzt. Die berechnete Reisegeschwindigkeit entspricht somit der so gemittelten lokalen Geschwindigkeit, die für den gesamten Betrachtungsabschnitt angenommen wird. Diese kann mit der streckenbezogen gemessenen Reisegeschwindigkeit verglichen werden.

Generell ist anzumerken, dass veränderte Randbedingungen (z.B. andere Betrachtungsabschnittslänge, andere Straßenquerschnitte) Anpassungen der Schwellwerte erforderlich machen können. Weitergehende Untersuchungen hinsichtlich einer Optimierung der Schwellwerte werden nicht durchgeführt.

7.3 Verkehrsmodell A und B

Ziel von Modellen ist es, die abzubildende Wirklichkeit so vereinfacht wie möglich, jedoch so komplex wie nötig abzubilden. Die Komplexität der Modelle ist dabei direkt von der jeweiligen Abbildungsaufgabe abhängig [Hel97]. Vereinfachungen bei der Modellerstellung führen zu Einschränkungen der Allgemeingültigkeit des Modells. Angaben über den Gültigkeitsbereichs des Modells geben die zugrunde gelegten Modellannahmen.

Die folgenden Modellannahmen werden für die Verkehrsmodelle A und B vorausgesetzt:

Annahmen für das Verkehrsmodell A:

1. Der Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt ist gestört. Es befindet sich nur eine Stauung im Betrachtungsabschnitt.
2. Der Verkehrsablauf, der sich in den einzelnen Teilabschnitten des Betrachtungsabschnitts einstellt, ist gleichförmig. Es gibt jedoch Teilabschnitte mit unterschiedlichen Verkehrsabläufen.
3. Innerhalb des Betrachtungsabschnitts bilden sich nur Teilabschnitte mit freiem und/oder gestörtem Verkehrszustand
4. Das Fahrverhalten der einzelnen Fahrzeugklassen (Lkw und Pkw) wird vereinfachend als gleich angesetzt.
5. Die im Betrachtungsabschnitt stattfindenden Überholvorgänge werden vernachlässigt. Es gilt das Prinzip „first in first out“.
6. Im Betrachtungsabschnitt gehen keine Fahrzeuge verloren.

Annahmen für das Verkehrsmodell B:

1. Der Verkehrsablauf, der sich im Betrachtungsabschnitt einstellt, ist gleichförmig.
2. Es liegt keine Stauung im Betrachtungsabschnitt vor.
3. Das Fahrverhalten der einzelnen Fahrzeugklassen (Lkw und Pkw) wird vereinfachend als gleich angesetzt.
4. Die im Betrachtungsabschnitt stattfindenden Überholvorgänge werden vernachlässigt. Es gilt das Prinzip „first in first out“.
5. Im Betrachtungsabschnitt gehen keine Fahrzeuge verloren.

7.4 Das Basisverfahren (Prognose I)

Aufbauend auf der charakteristischen Zeitlücke t_{ch} , wird im Folgenden das neu entwickelte Basisverfahren zur Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose vorgestellt. Der Anwendungsbereich für das Verfahren liegt im „gestörten Verkehrsablauf mit Stauung“. Bezug nehmend auf den in Kapitel 3 dargestellten Überblick über den Stand der Technik, ist das Basisverfahren der Gruppe der kurzfristigen Prognose zuzuordnen. Der Prognosehorizont entspricht der prognostizierten Reisezeit für das gerade in den Betrachtungsabschnitt einfallende Fahrzeug (Fahrzeugkollektiv). Das Verfahren beruht auf einer Zeitreihenanalyse mit aktueller Rückkopplung, ohne historische Ganglinien mit einzubeziehen.

Wie in Kapitel 6 dargelegt, stellt sich bei einer störfallbedingten Kapazitätsüberschreitung eine charakteristische Zeitlücke t_{ch} ein. Wird der Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt aufgrund eines Störfalles beeinträchtigt, so kann die charakteristische Zeitlücke t_{ch} , unabhängig von der Lage des Störfallquerschnitts, am Ausgangsquerschnitt MQ_Y ermittelt werden.

Je nach Lage des Störfallquerschnittes (MQ_Y liegt im Rückstaubereich bzw. MQ_Y liegt stromabwärts hinter dem Störfallquerschnitt) wird eine Anpassung des Mittelungsintervalls vorgenommen (vgl. Kapitel 6). Liegt ein gestörter Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt vor, so bestimmt die charakteristische Zeitlücke t_{ch} den Verkehrsfluss im gesamten Betrachtungsabschnitt. Wird die charakteristische Zeitlücke t_{ch} nun mit dem „first in first out-Prinzip“ kombiniert, so ermöglicht dieses eine Reisezeitprognose für das gerade in den Betrachtungsabschnitt einfallende Fahrzeug (Fahrzeugkollektiv). Das „first in first out-Prinzip“ besagt, dass keine Überholvorgänge stattfinden. Die Reihenfolge der Fahrzeuge beim Ein- und Ausfahren bleibt gleich. Für das gerade einfallende Fahrzeug (Fahrzeugkollektiv) bedeutet dies, dass es den Betrachtungsabschnitt erst wieder verlassen kann, nachdem alle zuvor im Betrachtungsabschnitt befindlichen Fahrzeuge diesen verlassen haben.

Ist der Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt gestört, so verlassen alle Fahrzeuge den Betrachtungsabschnitt mit einem zeitlichen Abstand (Bruttozeitlücke), der im Mittel der charakteristischen Zeitlücke t_{ch} entspricht (vgl. Abbildung 7-3).

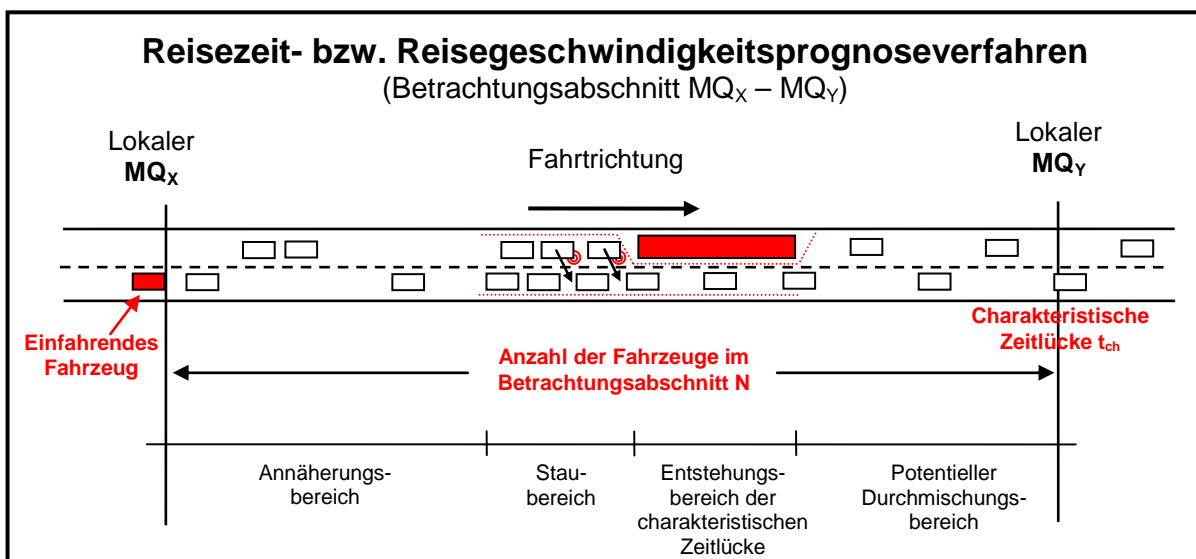


Abbildung 7-3: Schematische Darstellung – Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren

Vereinfachend findet keine Unterscheidung zwischen den verschiedenen Lagen der Störfallursache statt. Das Basisverfahren arbeitet deshalb mit einer charakteristischen Zeitlücke $t_{ch,m}$, die über m Aggregationsintervalle aus den Bruttozeitlücken t_{brutto} gewonnen wird.

Unter der Annahme einer für die gesamte Reisezeit T_S konstant bleibenden charakteristischen Zeitlücke t_{ch} berechnet sich dann die prognostizierte Reisezeit $T_{S,pr}$ als Produkt aus der über m Aggregationsintervalle gemittelten Bruttozeitlücke t_{brutto} und der aktuellen Anzahl der Fahrzeuge N im Betrachtungsabschnitt.

$$T_{S,pr} = N \cdot t_{ch,m} \quad (7.1)$$

$$t_{ch,m} = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m t_{brutto, MQ_{Y|gestört}} \quad (7.2)$$

$$N = L_{X-Y} \cdot K_{X-Y} \quad (7.3)$$

mit:

$T_{S,pr}$	=	Prognostizierte mittlere Reisezeit
L_{X-Y}	=	Länge des Betrachtungsabschnitts
N	=	Anzahl der Fahrzeuge im Betrachtungsabschnitt
K_{X-Y}	=	Mittlere Fahrzeugdichte im Betrachtungsabschnitt
$t_{ch,m}$	=	Charakteristische Zeitlücke über m Intervalle erhoben
$t_{brutto, MQ_{Y gestört}}$	=	Bruttozeitlücke am Ausgangsquerschnitt bei gestörtem Verkehrszustand im Betrachtungsabschnitt
m	=	Anzahl der Aggregationsintervalle, über die gemittelt wird

Durch den Einsatz von $t_{ch,m}$ wird erreicht, dass das Verfahren unabhängig von der tatsächlichen Lage des Störfallquerschnitts gute Ergebnisse liefert (vgl. Formel 7.1).

Liegt die Störfallursache stromaufwärts vor dem Ausgangsquerschnitt, so ist die charakteristische Zeitlücke t_{ch} an diesem bereits durch den Störfallquerschnitt hinreichend stationär. Eine zusätzliche Mittelung ist hier nicht notwendig. Die über m Aggregationsintervalle erhobene charakteristische Zeitlücke $t_{ch,m}$ unterscheidet sich für diesen Fall nur geringfügig von der nur über ein Aggregationsintervall erhobenen charakteristischen Zeitlücke t_{ch} . Liegt die Störfallursache stromabwärts hinter dem Ausgangsquerschnitt und

kommt es aufgrund des Störfalls zu einer Überstauung desselben, so können die Bruttozeitlücken t_{brutto} größeren Schwankungen unterliegen. Deshalb ist hier eine zusätzliche Mittelung notwendig. Es ergibt sich so auch hier eine stabile charakteristische Zeitlücke t_{ch} bei einer Mittelung über m Aggregationsintervalle (vgl. Kapitel 6.3).

Im Sinne eines von der Lage der Störfallursache unabhängigen Verfahrens wird im weiteren Verlauf stets mit $t_{\text{ch},m}$ gearbeitet. Das zur Mittelung eingesetzte Verfahren basiert dabei auf der Methode des einseitig gleitenden Mittelwerts. Dazu werden die Bruttozeitlücken t_{brutto} der letzten m Aggregationsintervalle arithmetisch gemittelt (vgl. Formel 7.2).

Die hieraus resultierende charakteristische Zeitlücke $t_{\text{ch},m}$ wird dann als mittlere Abflusszeitlücke für die sich aktuell im Betrachtungsabschnitt befindenden Fahrzeuge angesetzt. Deren Anzahl N wird kontinuierlich gemessen und kann direkt der eingesetzten Datenbasis entnommen werden (vgl. Kapitel 2.7).

Aufbauend auf der Reisezeitprognose, berechnet sich die prognostizierte Reisegeschwindigkeit $V_{S,\text{pr}|\text{gestört}}$ für das gerade in den Betrachtungsabschnitt einfahrende Fahrzeug (Fahrzeugkollektiv) über den Quotienten aus der Länge des Betrachtungsabschnitts und der prognostizierten Reisezeit (vgl. Formel 7.4).

$$V_{S,\text{pr}|\text{gestört}} = \frac{L_{X-Y}}{T_{S,\text{pr}}} \quad (7.4)$$

mit:

$V_{S,\text{pr} \text{gestört}}$	=	Prognostizierte Reisegeschwindigkeit im „gestörten Verkehrsablauf mit Stauung“
L_{X-Y}	=	Länge des Betrachtungsabschnitts
$T_{S,\text{pr}}$	=	Prognostizierte mittlere Reisezeit

Die Reisezeit- und die Reisegeschwindigkeitsprognose sind direkt über die Betrachtungsabschnittslänge L_{X-Y} (vgl. Formel 7.4) ineinander überführbar. Je nach Zweck bietet sich der Einsatz der einen oder der anderen Prognose an. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit kommt die Reisegeschwindigkeitsprognose zum Einsatz.

7.5 Das Extrapolationsverfahren

Das im weiteren Verlauf vorgestellte Extrapolationsverfahren zur Reisegeschwindigkeitsprognose stellt ein sehr einfaches Prognoseverfahren dar und kann beliebig durch komplexere Ansätze ersetzt werden. In der vorliegenden Arbeit dient es lediglich dazu, die prinzipielle Erweiterbarkeit des Basisverfahrens auf beliebige Verkehrsabläufe aufzuzeigen.

Der Anwendungsbereich für das Extrapolationsverfahren liegt im Bereich der „sonstigen Verkehrsabläufe“ (vgl. Abbildung 7-1). Das Prognoseverfahren beruht auf einer Extrapolation der lokalen Geschwindigkeiten am Eingangsquerschnitt v_{MQx} . Vereinfachend wird dabei angenommen, dass sich die Fahrzeuge im „sonstigen Verkehrsablauf“ weitgehend mit einer konstanten Geschwindigkeit fortbewegen.

Damit entspricht die prognostizierte Reisegeschwindigkeit $V_{s,pr}$ zahlenmäßig der lokalen Geschwindigkeit v_{MQx} am Eingangsquerschnitt (vgl. Formel 7.5)

$$V_{s,pr|sonstige} \hat{=} v_{MQx} \quad (7.5)$$

mit:

$$\begin{aligned} V_{s,pr|sonstige} &= \text{Prognostizierte Reisegeschwindigkeit in} \\ &\quad \text{den „sonstigen Verkehrsabläufen“} \\ v_{MQx} &= \text{Lokale Geschwindigkeit am} \\ &\quad \text{Eingangsquerschnitt } MQ_x \end{aligned}$$

7.6 Optimiertes Verfahren zur Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose (Prognose II)

Aufbauend auf dem in Kapitel 7.4 vorgestellten neu entwickelten Basisverfahren für den „gestörten Verkehrsablauf mit Stauung“, dem in Kapitel 7.5 erläuterten Extrapolationsverfahren für die „sonstigen Verkehrsabläufe“ sowie der in Kapitel 7.2 vorgenommenen Fallunterscheidung für die unterschiedlichen Verkehrsabläufe im Betrachtungsabschnitt, setzt sich das optimierte Verfahren zur Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose zusammen.

Primäres Ziel bei der Entwicklung des optimierten Verfahrens ist es aufzuzeigen, dass das neu entwickelte Basisverfahren prinzipiell mit anderen Prognoseverfahren koppelbar ist, welche gute Ergebnisse außerhalb des „gestörten Verkehrsablaufs mit Stauung“ liefern.

Kernpunkt einer erfolgreichen Kopplung ist eine möglichst präzise Abgrenzung der jeweiligen Einsatzgebiete der verschiedenen Verfahren. Im optimierten Verfahren werden dazu die in Abbildung 7-2 (vgl. Kapitel 7.2) definierten Indikatoren und Schwellwerte herangezogen. Zusätzlich wird eine Maximalgrenze für die prognostizierte Reisegeschwindigkeit $V_{s,pr}$ festgelegt. Übersteigt die prognostizierte Reisegeschwindigkeit $V_{s,pr}$ diese Maximalgrenze, so wird anstelle des prognostizierten Wertes der Grenzwert eingesetzt. Als Grenzwert dient im optimierten Verfahren die Richtgeschwindigkeit (130 km/h) auf deutschen Bundesautobahnen. Die Einführung eines Grenzwerts ist hilfreich, da die gewählten Modellannahmen nicht alle Fälle des realen Verkehrsablaufs abbilden können.

7.7 Zusammenfassung „Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren – Theorie“

Im vorangegangenen Kapitel wird ein neuartiges dynamisches Verfahren zur Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose, das sogenannte Basisverfahren, vorgestellt. Das Einsatzgebiet dieses Prognoseverfahrens ist speziell der „gestörte Verkehrsablauf mit Stauung“ auf Autobahnen. Die Prognose der Reisezeit geschieht hierbei durch die Verknüpfung der charakteristischen Zeitlücke t_{ch} mit der Anzahl der Fahrzeuge im Betrachtungsabschnitt.

In einem weiteren Schritt wird aufgezeigt, wie das Basisverfahren prinzipiell mit anderen Prognoseverfahren koppelbar ist. Dazu wird das Basisverfahren mit einem Extrapolationsverfahren zu einem optimierten Verfahren weiterentwickelt.

Grundlage für die erfolgreiche Kopplung beider Verfahren ist eine präzise Abgrenzung der jeweiligen Einsatzgebiete. Zur Abgrenzung werden Indikatoren mit dazugehörigen Schwellwerten definiert. Diese basieren auf empirischen Untersuchungen und verkehrlichen Betrachtungen und werden, soweit möglich, den aus der Fachliteratur bekannten Indikatoren und Schwellwerten gegenübergestellt.

8 Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren – Überprüfung

Ziel: Im Folgenden sollen die in Kapitel 7 vorgestellten theoretischen Überlegungen des Basisverfahrens sowie des optimierten Verfahrens zur Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose anhand von empirischen Erhebungen überprüft werden. Dazu werden die in Kapitel 5 angeführten Beispiele für ausgesuchte Störfallsituationen herangezogen.

Mit diesen sollen Einzelanalysen für die ausgesuchten Störfallsituationen durchgeführt werden. Ziel ist es, die generelle Einsatzfähigkeit der Prognoseverfahren sowie den verkehrlichen Nutzen für die Verkehrssicherheit, die Verkehrsqualität und die Energieeffizienz aufzuzeigen.

8.1 Vorgehensweise – Überprüfung der Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren

Grundlage für die im Weiteren durchgeführte Überprüfung der Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren sind die durchgeführten Analysen des tatsächlichen Verkehrsablaufs für die ausgesuchten Störfallsituationen (vgl. Kapitel 5).

Für die betrachteten Zeiträume der jeweiligen Störfallsituationen werden anhand der entwickelten Verfahren Reisegeschwindigkeitganglinien prognostiziert, die mit den im zeitlichen Nachlauf tatsächlich gemessenen Geschwindigkeitganglinien (streckenbezogene Reisegeschwindigkeit und lokale Geschwindigkeiten am Ein- und Ausgangsquerschnitt) verglichen werden. Durch die Analyse möglicher Differenzen und Unterschiede zwischen den Verläufen der gemessenen und prognostizierten Ganglinien können so Aussagen über die Einsatzfähigkeit, den Nutzen und die Qualität der entwickelten Prognoseverfahren getroffen werden.

Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Ganglinienverläufe der prognostizierten Reisegeschwindigkeiten direkt in die Diagramme der gemessenen Verkehrsgrößen aus Kapitel 5 eingefügt.

Die dargestellten Diagramme enthalten zusätzlich zu den bekannten Ganglinienverläufen der gemessenen streckenbezogenen Reisegeschwindigkeit V_s (im Diagramm: „ V_s “ – pink), der lokal gemessenen Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt v_{MQX} (im Diagramm: „ $v-MQ_X$ “ – gelb) und Ausgangsquerschnitt v_{MQY} (im Diagramm: „ $v-MQ_Y$ “ – türkis) und der dazugehörigen Verkehrsdichteganglinie K_s (im Diagramm: „ K_s “ – graugrün) ebenfalls die Ganglinienverläufe des Basisprognoseverfahrens (im Diagramm: „ V_s-PI “ – orange) sowie des optimierten Prognoseverfahrens (im Diagramm: „ V_s-PII “ – rot).

Eine zusätzliche Betrachtung der teilweise vorhandenen lokalen Messwerte am Hilfsquerschnitt findet nicht statt, da sowohl die gemessenen als auch die prognostizierten Reisegeschwindigkeiten als streckenbezogene Werte immer auf den gesamten Betrachtungsabschnitt bezogen sind.

8.2 Störfallursache im stromabwärts liegenden Abschnitt

Nachfolgend werden die beiden Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren für Störfälle untersucht, bei denen die ausschlaggebende Störfallursache im stromabwärts liegenden Abschnitt liegt. Als Beispiele werden dazu die bereits in Kapitel 5 vorgestellten Stauphänomene einer Rückstauwelle, die im Betrachtungsabschnitt zum Stillstand kommt (Beispiel 1.1), einer Rückstauwelle, die den gesamten Betrachtungsabschnitt durchläuft (Beispiel 1.2), und einer Störung des Verkehrsflusses im gesamten Betrachtungsabschnitt (Beispiel 1.3) herangezogen.

Beispiel 1.1:

Rückstauwelle kommt im Betrachtungsabschnitt zum Stillstand

Betrachtungszeitraum:	ca. 11:20 – 14:00 Uhr
Messtag:	25.02.2007 (Sonntag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-S13 bis MQ-S15
Fahrtrichtung:	Stuttgart
Abschnittslänge:	3,375 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	Hilfsquerschnitt mit Wechselverkehrszeichengeber, Betriebsabfahrt
Sonstige Besonderheiten:	Nässe
Freifahrgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	125 / 120 km/h
Freifahrgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen) bei „Nässe“:	100 km/h
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	2,9 %

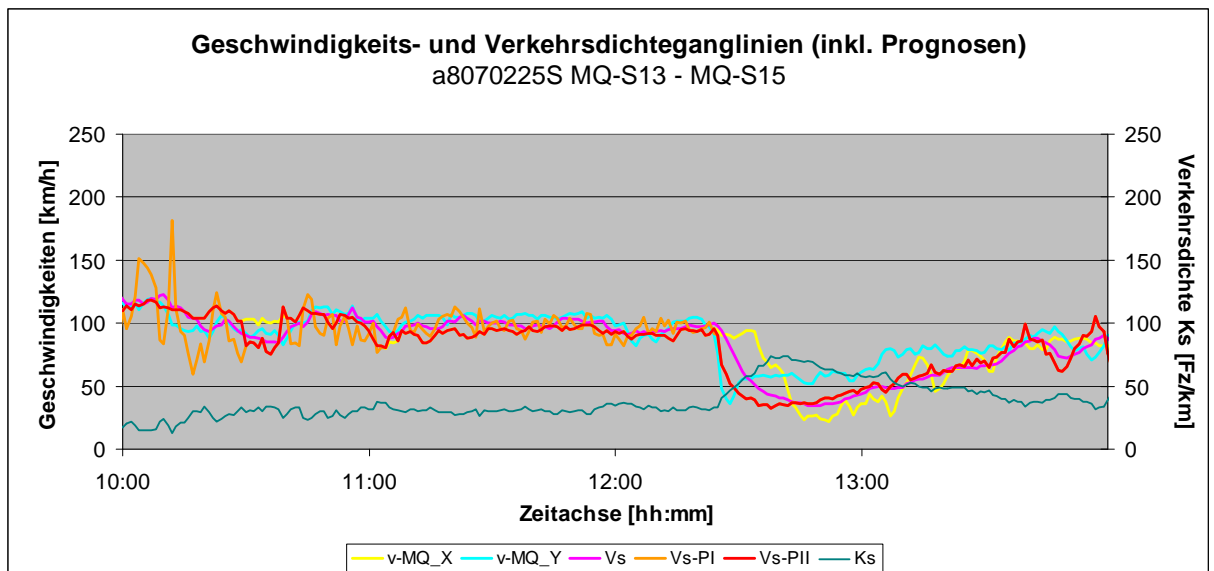


Abbildung 8-1: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (inkl. Prognose) – Beispiel 1.1

Prognose:

Während des Störfalls zwischen 12:20 Uhr und 13:45 Uhr entspricht der Verlauf der Basisprognoseganglinie weitgehend dem Verlauf der gemessenen Reisegeschwindigkeit. Die Schwankungen der Basisprognoseganglinie sind gering. Vor dem Störfall, zwischen 10:00 Uhr und 10:45 Uhr, sind große Schwankungen bei der Basisprognoseganglinie zu erkennen. Die Abweichungen der Prognoseergebnisse zu den mit zeitlichem Verzug gemessenen Reisegeschwindigkeiten betragen teilweise über 50 km/h. Im Zeitraum zwischen 10:45 Uhr und 12:20 Uhr sind deutlich geringere Schwankungen der Prognoseganglinie zu beobachten. In diesem Zeitraum betragen die Abweichungen zu den gemessenen Reisegeschwindigkeiten maximal 15 km/h (vgl. Abbildung 8-1).

Die großen Abweichungen zwischen Basisprognose- und Messwerten im Zeitraum zwischen 10:00 Uhr und 10:45 Uhr sind darauf zurückzuführen, dass die zugrunde gelegten Modellannahmen nicht genau genug mit der Realität übereinstimmen. Anhand der schwankend zunehmenden Verkehrsdichte K_S sowie den ebenfalls schwankenden lokal gemessenen Geschwindigkeiten am Ausgangsquerschnitt ist zu erkennen, dass kein gleichförmiger Verkehrsfluss im Betrachtungsabschnitt herrscht. Die Freiheitsgrade hinsichtlich der Wahl der Weg- und Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen sind eingeschränkt. Dieses lässt auf einen teilgebundenen Verkehr schließen. Aufgrund von ungünstigen Konstellationen zwischen der lokalen Verkehrsstärke und der lokalen Geschwindigkeit am Ausgangsquerschnitt entstehen die Ausschläge in der Basisprognose.

Zwischen 10:45 Uhr und 12:20 Uhr nimmt die Anzahl der Freiheitsgrade weiter ab. Die Ganglinie der Verkehrsdichte K_S bleibt auf einem ähnlichen Niveau. Aufgrund der geringeren Freiheitsgrade nehmen die Schwankungen der Basisprognoseganglinie stark ab. Bei der Reisegeschwindigkeit sind nur noch Abweichungen von bis zu 10 km/h zwischen den Prognose- und den Messwerten zu beobachten. Der Einfluss der Witterungsbedingungen („Nässe“) verstärkt im teilgebundenen Verkehr die Abnahme der Freiheitsgrade. Wie anhand eines Vergleichs zwischen den Ganglinien der gemessenen Geschwindigkeit und der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeit zu erkennen ist (vgl. Kapitel 5.2.1), scheint

aufgrund von „Nässe“ das Fahrverhalten den Witterungsverhältnissen angepasst zu werden. Es findet eine Homogenisierung aufgrund der Witterungsverhältnisse statt, bei der die Fahrzeugführer „freiwillig“ auf das „Ausnutzen“ von Freiheitsgraden verzichten (z.B. niedrigere Geschwindigkeiten, größere Sicherheitsabstände, weniger Überholvorgänge).

Während des Störfalls, im Zeitraum zwischen 12:20 Uhr und 13:45 Uhr, kommt es zu einer erneuten Reduzierung der Freiheitsgrade. Die Freiheitsgrade sind nun verkehrsbedingt so weit reduziert, dass die Witterungsverhältnisse keinen großen zusätzlichen Einfluss (z.B. die freiwillige Reduzierung von Freiheitsgraden) mehr verursachen können.

Anhand der Ganglinienverläufe der Prognosen und gemessenen Verkehrsgrößen ist deutlich zu erkennen, dass sich während des Störfalls eine charakteristische Zeitlücke t_{ch} am Ausgangsquerschnitt eingestellt hat. Die charakteristische Zeitlücke t_{ch} bestimmt den Verkehrsfluss im gesamten Betrachtungsabschnitt. Während des Störfalls entspricht die Basisprognose (V_s -PI) der optimierten Prognose (V_s -PII). Es sind nur geringe Schwankungen bei der Prognoseganglinie zu beobachten. Der Verlauf der Prognoseganglinie verhält sich annähernd analog zu der Ganglinie der gemessenen Reisegeschwindigkeit, ist jedoch zeitlich verschoben. Der zeitliche Unterschied beträgt bis zu 6 Minuten früher, dies entspricht dem Prognosegewinn. Weiterhin ist zu beobachten, dass auch bei der Auflösung des Störfalls (nach Beseitigung der Störfallursache) die Prognoseganglinie zeitlich vor den gemessenen Reisezeiten liegt. Ursache dafür ist, dass sich der Stau vom Stauanfang aus auflöst. Während der Auflösung existiert kein ortsfester Stauanfang mehr, der Stau „bröckelt“. Dadurch verschiebt sich der Stauanfang stromaufwärts in den Betrachtungsabschnitt hinein (v_{MQY} steigt an, v_{MQX} sinkt bzw. bleibt klein). Stromabwärts hinter dem jeweils aktuellen Stauanfang stellt sich eine neue charakteristische Zeitlücke ein. Die jeweils aktuelle charakteristische Zeitlücke t_{ch} kann dann am Ausgangsquerschnitt gemessen werden. Diese charakteristische „Auflösungszeitlücke“ ist abhängig von der Kapazität am jeweiligen maßgeblichen Störfallquerschnitt sowie von der Zusammensetzung des Fahrzeugkollektivs (wird hier weitgehend vernachlässigt) und unterliegt somit physikalischen Randbedingungen. Auch wenn die charakteristische Auflösungszeitlücke aufgrund des stromaufwärts wandernden Stauanfangs (Stau löst sich von vorne – dem Stauanfang – auf) nicht so stabil und konstant ist wie die charakteristische Zeitlücke bei einem ortsfesten Stauanfang, so ist sie doch hinreichend genau für das Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren.

Zur Verbesserung der Prognoseergebnisse im freien und teilgebundenen Verkehrszustand steht das optimierte Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren (im Diagramm V_s -PII) zur Verfügung. Zu beobachten ist, dass die Abweichungen zwischen den prognostizierten und den im zeitlichen Nachlauf gemessenen Werten in diesen Verkehrszuständen wesentlich kleiner sind als beim Basisprognoseverfahren. Dennoch ist der vorliegende Fall aufgrund seiner Besonderheiten für das optimierte Verfahren nicht hinreichend repräsentativ. Aufgrund der schlechten Witterungsverhältnisse („Nässe“) kommt es über einen längeren Zeitraum zu einem veränderten Fahrverhalten, das sich speziell im freien und teilgebundenen Verkehr bemerkbar macht. Die gemessenen Reisegeschwindigkeiten liegen zwischen 11:15 Uhr und 12:20 Uhr mit ca. 100 km/h wesentlich unter den zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 120 km/h.

Der Einfluss des Wetters auf die charakteristische Zeitlücke während des Störfalls und damit auf das Basisprognoseverfahren ist hingegen gering. Aufgrund des Störfalls und seiner verkehrlichen Auswirkungen existieren dann sowieso nur noch reduzierte Freiheitsgrade im Betrachtungsabschnitt. Zusätzliche Beeinträchtigungen aufgrund von äußeren Randbedingungen, z.B. aufgrund des Wetters, sind in der sich einstellenden charakteristischen Zeitlücke schon enthalten und fließen somit in die Prognose mit ein.

Beispiel 1.2:

Stauwelle durchläuft den Betrachtungsabschnitt

Betrachtungszeitraum:	ca. 17:00 – 18:00 Uhr
Messtag:	30.07.2006 (Sonntag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-S15 bis MQ-S17
Fahrtrichtung:	Stuttgart
Abschnittslänge:	4,770 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	Hilfsquerschnitt mit Wechselverkehrszeichengeber, Parkplatz, Betriebsabfahrt
Sonstige Besonderheiten:	Nässe
Freifahrtgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	120 / 120 km/h
Freifahrtgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen) bei „Nässe“:	100 km/h
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	5,8 %

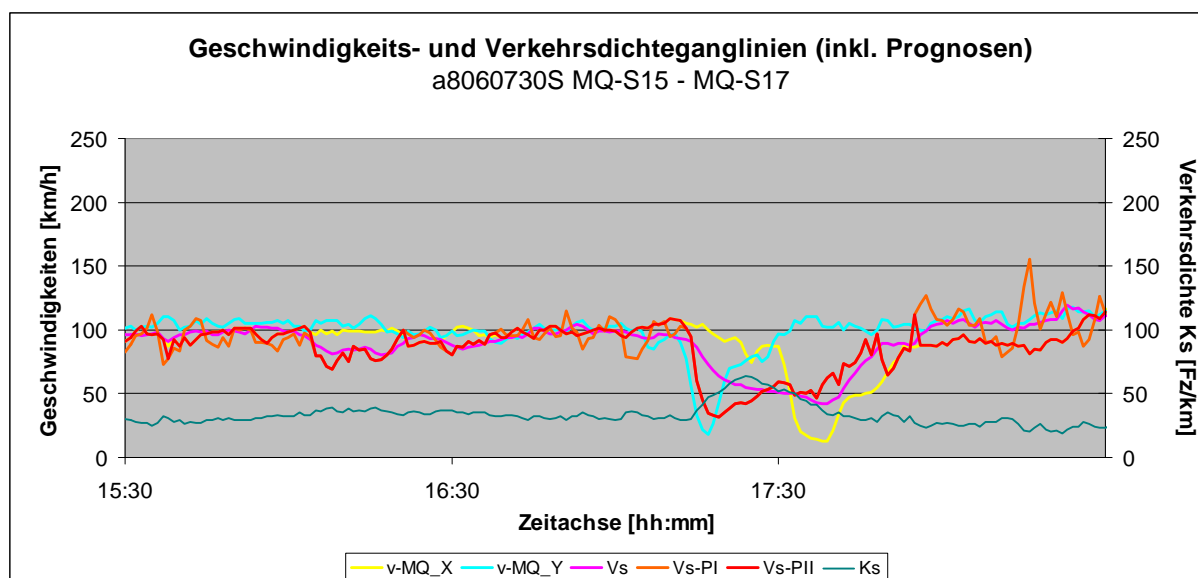


Abbildung 8-2: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (inkl. Prognose) – Beispiel 1.2

Prognose:

Die Ganglinie der Basisprognose zeigt vor und während des Störfalls nur geringe Schwankungen. Abweichungen zwischen den Prognosewerten und den zeitlich verschobenen Messwerten betragen weniger als 20 km/h. Nach dem Störfall kommt es zu größeren Schwankungen mit Abweichungen von mehr als 50 km/h (vgl. Abbildung 8-2).

Die Stärke der Schwankungen lässt Rückschlüsse auf die im Verkehrsfluss verfügbaren Freiheitsgrade zu. Die geringen Schwankungen vor und während des Störfalls sind ein Indikator dafür, dass nur wenige Freiheitsgrade vorhanden sind. Die Modellannahmen und die Realität stimmen in weiten Teilen überein. Als Ursache für die reduzierten Freiheitsgrade kommen im Beispiel 1.2 eine erhöhte Verkehrsdichte K_S sowie die schlechten Witterungsbedingungen („Nässe“) in Betracht. Unter den gegebenen Randbedingungen befindet sich der Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt in einem gebundenen Zustand. Untermuert wird diese Vermutung durch den kleinen Störfall zwischen 16:00 Uhr und 16:40 Uhr. Innerhalb dieses Zeitraums erreicht die mittlere Verkehrsdichte K_S Werte bis 39 Kfz/km (Ausgangsniveau ca. 35 Kfz/km), wobei kein sprunghaftes Ansteigen oder Abfallen in der Verkehrsdichteganglinie zu beobachten ist. Dies deutet darauf hin, dass das Ansteigen der Verkehrsdichte K_S selbst die Ursache für den Störfall ist. Unabhängig davon, ob dies selbst die Ursache ist oder aber ob eine andere Störfallursache vorliegt, ist zu beobachten, dass sich die Beeinträchtigung des Verkehrsflusses über einen längeren Zeitraum in der Strecke hält. Eine Eskalation des kleinen Störfalls hin zu einem „großen“ Störfall findet nicht statt. Daraus lässt sich schließen, dass trotz der Reduzierung noch genügend Freiheitsgrade im Betrachtungsabschnitt vorhanden sind, um die Auswirkungen über einen längeren Zeitraum von 40 Minuten zu kompensieren. Dies bestätigt die Vermutung, dass aufgrund der Witterungsverhältnisse im Betrachtungsabschnitt defensiver (z.B. weniger Überholvorgänge, zusätzlicher Sicherheitsabstand) gefahren wird und es dadurch früher zu einem gebundenen Verkehrszustand kommt. Zusätzliche Fahrzeuge können aufgrund des homogenisierten Verkehrsflusses durch Verringerung der zusätzlichen Sicherheitsabstände aufgenommen werden.

Die großen Schwankungen der Basisprognoseganglinie nach dem (eigentlichen) Störfall sind durch eine Zunahme der Freiheitsgrade zu erklären. Der Stauanfang wandert über den Eingangsquerschnitt aus dem Betrachtungsabschnitt hinaus und entfernt sich immer weiter vom Ausgangsquerschnitt. Hinter dem Stauanfang bildet sich ein homogenisierter Verkehrsfluss mit einer charakteristischen Zeitlücke t_{ch} in einem weitgehend freien Verkehrszustand. Mit zunehmender Distanz zwischen dem Stauanfang und dem Ausgangsquerschnitt vergrößert sich der potentielle Durchmischungsbereich (vgl. Kapitel 6.3). Die durch den Stauanfang verursachte Homogenität der Verkehrsstärke am Ausgangsquerschnitt nimmt ab. Die charakteristische Zeitlücke t_{ch} löst sich auf. Der homogenisierte Verkehrsfluss geht in einen „nicht homogenisierten“ freien bzw. teilgebundenen Verkehrsfluss über. Im freien und teilgebundenen Verkehrsfluss treten Schwankungen bei der Verkehrsdichte K_S und der Verkehrsstärke auf, die zu großen Schwankungen im Basisprognoseverfahren führen. Mehr Freiheitsgrade sind vorhanden.

Während des gesamten Störfalls liegen die Prognoseergebnisse des Basisverfahrens zeitlich vor den Messwerten. Es ist jedoch zu beobachten, dass während der Anfangsphase die Basisprognoseganglinie wesentlich stärker abfällt als die zeitlich spätere Ganglinie der gemessenen Reisegeschwindigkeiten. Erst nachdem der Stauanfang in den Betrachtungsabschnitt hineingewachsen ist (ca. 17:30 Uhr), entspricht der Prognoseganglinienverlauf, wenn auch schwankend, wieder der zeitlich verschobenen Ganglinie der Messwerte. Zurückzuführen ist dieser Verlauf ebenfalls auf die gemessenen Verkehrsstärken am Ausgangsquerschnitt und die daraus resultierende charakteristische Zeitlücke t_{ch} . In der Anfangsphase kommt es zu einem kurzen und starken Einbruch der lokalen Geschwindigkeit v_{MQY} am Ausgangsquerschnitt. Die lokale Geschwindigkeit sinkt bis auf 18 km/h. Es kommt fast zum Verkehrsstillstand. Kurzzeitig passieren nur sehr wenige Fahrzeuge den Ausgangsquerschnitt, die Verkehrsstärke ist gering. Die daraus berechnete charakteristische Zeitlücke t_{ch} ist groß, wodurch es zu den niedrigen prognostizierten Reisegeschwindigkeiten kommt. In diesem Zustand befindet sich der Stauanfang noch außerhalb des Betrachtungsabschnitts. Die am Ausgangsquerschnitt gemessenen Verkehrsgrößen beschreiben den Übergangsbereich zwischen dem freiem und gestautem Verkehrsfluss bzw. dem gestauten Verkehrsfluss stromaufwärts vor dem Stauende. Durch den sich stromaufwärts ausbreitenden Stau und den zusätzlich stromaufwärts wandernden Stauanfang verändern sich die Messwerte am Ausgangsquerschnitt stetig. Die sich ändernden Verkehrsgrößen bewirken, dass es für diesen Zeitraum keine charakteristische Zeitlücke t_{ch} gibt. Erst nachdem der Stauanfang in den Betrachtungsabschnitt hineingewandert ist, stellt sich hinter dem Stauanfang wieder eine neue charakteristische Zeitlücke t_{ch} ein (vgl. Kapitel 6.3).

Das optimierte Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren zeigt vor dem Störfall kleinere Abweichungen zu den Messwerten als das Basisprognoseverfahren. Der kleine Störfall wird von beiden Prognoseverfahren erkannt. Nach dem eigentlichen Störfall, im freien bzw. teilgebundenen Verkehr, liegen die optimierten Prognoseergebnisse im Zeitraum von 18:00 bis 18:30 Uhr teilweise bis zu 20 km/h unterhalb der gemessenen Reisezeiten. Erst danach liefert das optimierte Prognoseverfahren wieder gute Werte. Ursache dafür ist der Verlauf der Stauung im Betrachtungsabschnitt. Im aufgeführten Zeitraum sind die störfallbedingt niedrigen Geschwindigkeiten am Eingangsquerschnitt noch nicht wieder auf das Ausgangsniveau gestiegen. Der Stauanfang befindet sich nahe dem Eingangsquerschnitt

und beeinträchtigt die lokal gemessene Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt. Der restliche Teil des Betrachtungsabschnitts ist jedoch nicht (mehr) beeinträchtigt, es herrscht freier Verkehrsfluss mit entsprechend hohen Geschwindigkeiten. Eine Extrapolation der lokal gemessenen Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt spiegelt zu diesem Zeitpunkt nicht die realen Verkehrsflüsse im Betrachtungsabschnitt wider.

Beispiel 1.3:

Störung des Verkehrsflusses im gesamten Betrachtungsabschnitt

Betrachtungszeitraum:	ca. 14:15 – 15:15 Uhr
Messtag:	24.02.2007 (Samstag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-S8 bis MQ-S10
Fahrtrichtung:	Stuttgart
Abschnittslänge:	2,900 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	MQ-S8 ist eine Anschlussstelle sowie ein reiner Messquerschnitt, Hilfsquerschnitt MQ-S9 reiner Anzeigenquerschnitt
Sonstige Besonderheiten:	–
Freifahrtgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	125 km/h / frei
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	5,4 %

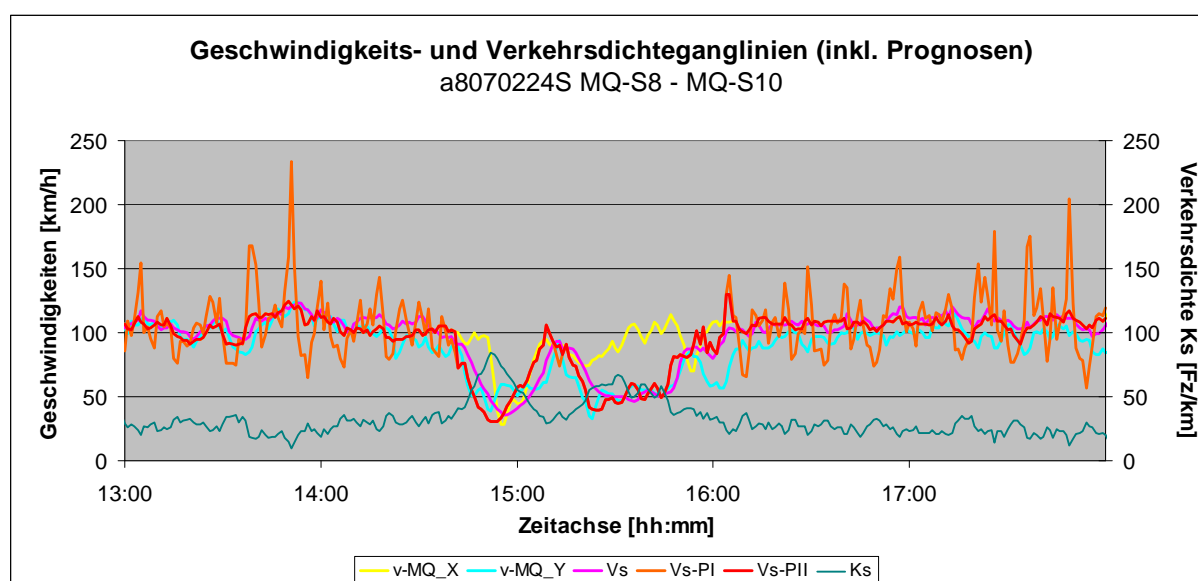


Abbildung 8-3: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (inkl. Prognose) – Beispiel 1.3

Prognose:

Während des gesamten Störfalls liegen die Prognoseergebnisse des Basisverfahrens zeitlich vor den im Nachlauf gemessenen Reisegeschwindigkeiten V_S . Zu beobachten ist, dass die Prognoseganglinie den zeitlich (später) verschobenen Verlauf der gemessenen Reisegeschwindigkeit sehr genau abbildet. Der zeitliche Abstand zwischen beiden Kurven beträgt bis zu 5 Minuten und entspricht dem Prognosegewinn. Vor dem Störfall treten beim Basisprognoseverfahren sehr große Schwankungen auf. Diese deuten auf einen freien bzw. teilgebundenen Verkehrsfluss hin, in dem entsprechende Freiheitsgrade vorhanden sind. Vor dem Störfall bildet sich keine charakteristische Zeitlücke t_{ch} , die berechneten Prognosewerte entsprechen nicht den gemessenen Reisegeschwindigkeiten V_S (vgl. Abbildung 8-3).

Das optimierte Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren entspricht während des Störfalls dem Basisverfahren und liefert die gleichen guten Ergebnisse. Vor dem Störfall, im freien bzw. teilgebundenen Verkehr, entsprechen die Prognoseergebnisse ebenfalls weitgehend den zeitlich später gemessenen Reisegeschwindigkeiten. Eine Ausnahme bildet hierbei lediglich der Zeitraum von 14:10 bis 14:40 Uhr. Innerhalb dieses Zeitraums liegen die Prognosewerte zuerst ca. 10 km/h unterhalb und später ca. 5 km/h oberhalb der gemessenen Reisegeschwindigkeiten. Die Ganglinienverläufe der Prognoseergebnisse sowie der gemessenen Reisegeschwindigkeiten ähneln sich jedoch sehr. Es ist festzustellen, dass in diesem Fall die Extrapolation der lokal gemessenen Reisegeschwindigkeit am Eingangsquerschnitt gute Ergebnisse für den freien bzw. teilgebundenen Verkehrszustand liefert.

8.3 Störfallursache im Betrachtungsabschnitt

Nachfolgend werden anhand von drei Beispielen (vgl. Kapitel 5) die beiden Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren für Störfälle untersucht, bei denen sich die ausschlaggebende Störfallursache im Betrachtungsabschnitt selbst befindet. Die Beispiele zeigen jeweils ein Stauphänomen, bei dem sich der Störfall weder am Ein- noch am Ausgangsquerschnitt manifestiert (Beispiel 2.1), ein Stauphänomen, bei dem sich der Störfall nach längerer Zeit am Eingangsquerschnitt manifestiert (Beispiel 2.2), sowie ein Stauphänomen, bei dem sich der Störfall nach kurzer Zeit am Eingangsquerschnitt manifestiert (Beispiel 2.3).

Beispiel 2.1:

Störfall manifestiert sich weder am Ein- noch am Ausgangsquerschnitt

Betrachtungszeitraum:	ca. 8:50 – 9:45 Uhr
Messtag:	27.07.2006 (Donnerstag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-S22 bis MQ-S24
Fahrtrichtung:	Stuttgart
Abschnittslänge:	3,250 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	Hilfsquerschnitt mit

	Wechselverkehrszeichengeber, Parkplatz, 2 Betriebsabfahrten
Sonstige Besonderheiten:	–
Freifahrgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	125 km/h / frei
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	22,9 %

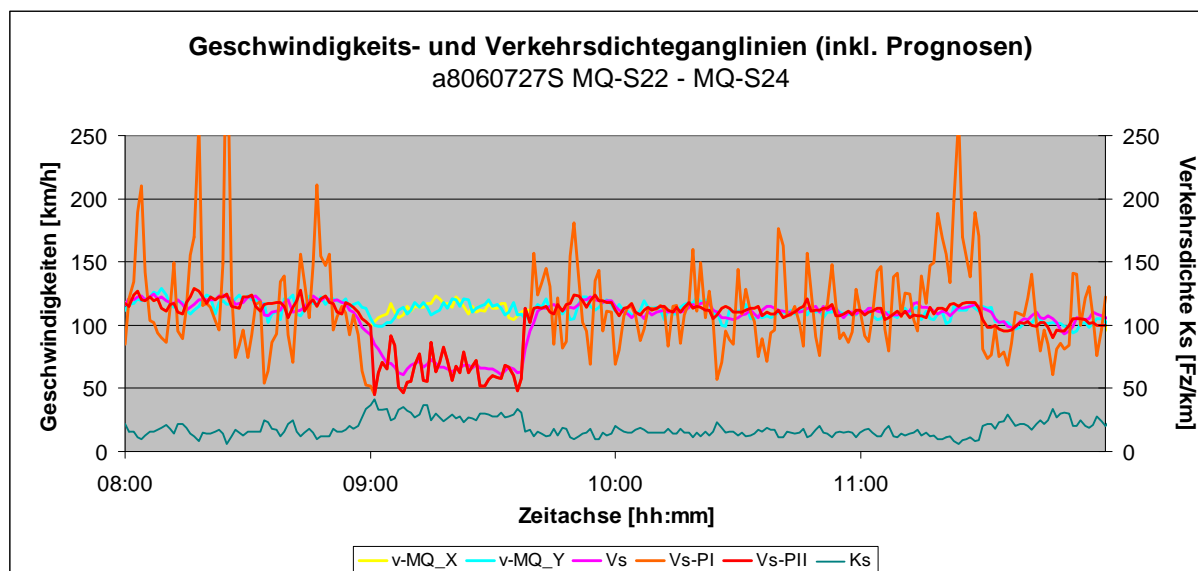


Abbildung 8-4: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (inkl. Prognose) – Beispiel 2.1

Prognose:

Vor und nach dem Störfall sind bei der Basisprognoseganglinie starke Schwankungen zwischen 50 km/h und mehr als 250 km/h zu beobachten (Hinweis: Das Basisprognoseverfahren gilt nur für den gestörten Verkehrsablauf. Das optimierte Prognoseverfahren gilt für alle Verkehrsabläufe und enthält eine Begrenzung der Prognosewerte auf 130 km/h). Die großen Schwankungen deuten hier auf einen freien bzw. teilgebundenen Verkehrsfluss hin, in dem entsprechende Freiheitsgrade vorhanden sind. In diesen Zeiträumen bildet sich keine charakteristische Zeitlücke t_{ch} . Die Ergebnisse der Basisprognose können entsprechend die gemessenen Reisegeschwindigkeiten V_s nicht widerspiegeln (vgl. Abbildung 8-4).

Zu Beginn des Störfalls bricht die Basisprognoseganglinie ein. Der Einbruch ist stärker als der Einbruch der gemessenen Reisegeschwindigkeit, liegt jedoch zeitlich bis zu 7 Minuten früher. Während des Störfalls schwanken die Ergebnisse der Basisprognose stark, bewegen sich aber im Mittel auf dem Niveau der gemessenen Reisegeschwindigkeiten. Am Störfallquerschnitt bildet sich eine charakteristische Zeitlücke t_{ch} . Die starken Schwankungen deuten auf verfügbare Freiheitsgrade im Bereich des Störfallquerschnitts selbst bzw. im Durchmischungsbereich stromabwärts hinter dem Störfall hin. Gestützt werden diese Vermutungen durch die relativ geringen und schwankenden Verkehrsdichten während des Störfalls.

Das optimierte Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren entspricht während des Störfalls weitgehend dem Basisverfahren. Nur zu Beginn des Störfalls kommt es im

Übergangsbereich zwischen freiem und gestautem Verkehrsfluss kurzzeitig zu Abweichungen zwischen den beiden Verfahren. Aufgrund der gewählten Schwellwerte wird im Übergangsbereich teilweise die extrapolierte lokale Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt als Prognosewert herangezogen, obwohl das Basisprognoseverfahren bessere Werte liefert.

Vor und nach dem Störfall, im freien bzw. teilgebundenen Verkehr, liefert das optimierte Verfahren wesentlich bessere Ergebnisse als das Basisverfahren. Die Ganglinie des optimierten Prognoseverfahrens liegt weitgehend auf gleichem Niveau wie die aktuellen bzw. mit zeitlichem Verzug gemessenen Reisegeschwindigkeiten. Streckenweise entspricht die optimierte Prognoseganglinie der Ganglinie der gemessenen Reisegeschwindigkeiten und liegt zeitlich früher (Prognosegewinn).

Beispiel 2.2:

Störfall manifestiert sich nach längerer Zeit am Eingangsquerschnitt

Betrachtungszeitraum:	8:40 – 12:20 Uhr
Messtag:	27.07.2006 (Donnerstag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-S15 bis MQ-S17
Fahrtrichtung:	Stuttgart
Abschnittslänge:	4,770 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	Hilfsquerschnitt mit Wechselverkehrszeichengeber (nach 2,1 km), Parkplatz, Betriebsabfahrt
Sonstige Besonderheiten:	Baustelle
Freifahrgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	125 km/h / frei
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	22,4 %

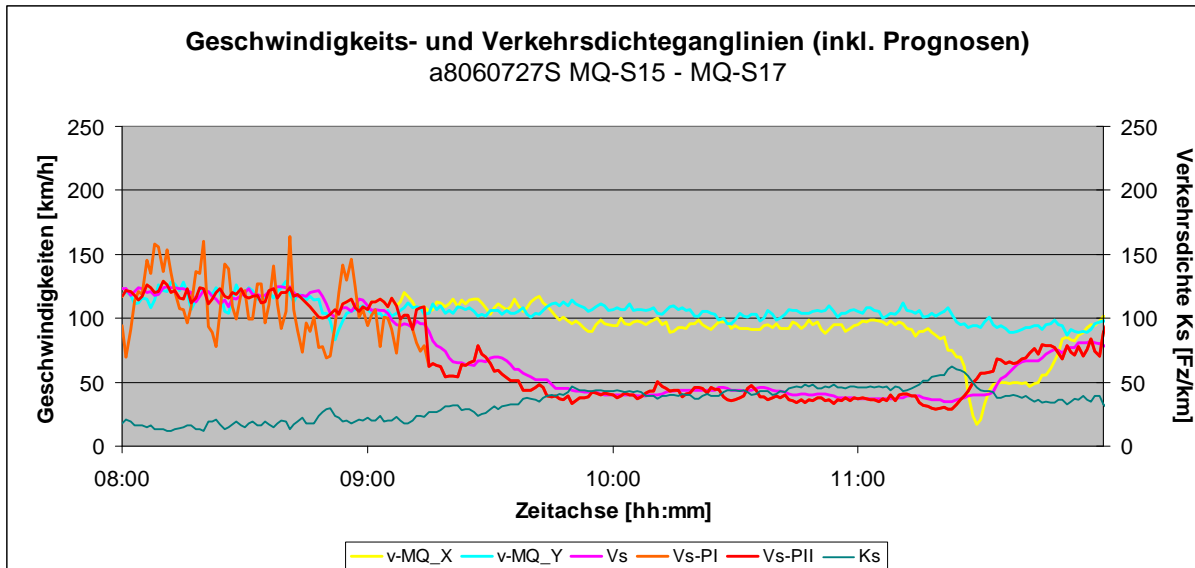


Abbildung 8-5: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (inkl. Prognose) – Beispiel 2.2

Prognose:

Vor und nach dem Störfall sind bei der Basisprognoseganglinie größere Schwankungen zwischen 60 km/h und mehr als 160 km/h zu beobachten (Hinweis: Das Basisprognoseverfahren gilt nur für den gestörten Verkehrsablauf. Das optimierte Prognoseverfahren gilt für alle Verkehrsabläufe und enthält eine Begrenzung der Prognosewerte auf 130 km/h). Die Schwankungen deuten auf einen freien bzw. teilgebundenen Verkehrsfluss hin, in dem entsprechende Freiheitsgrade vorhanden sind. In diesen Zeiträumen bildet sich keine charakteristische Zeitlücke t_{ch} . Die Ergebnisse der Basisprognose können entsprechend die gemessenen Reisegeschwindigkeiten V_s nicht widerspiegeln. Im Zeitraum zwischen ca. 9:00 und 9:11 Uhr schwanken die Basisprognosewerte zwar ebenfalls noch stark, deuten jedoch durch eine fallende Tendenz auf den beginnenden Störfall hin. Ab 9:12 Uhr bis 12:04 Uhr, dem Ende des Störfalls, stellt sich die charakteristische Zeitlücke t_{ch} am Ausgangsquerschnitt ein. Die Schwankungen der Basisprognoseganglinie sind gering. Die Ganglinie der Basisprognose bildet den Verlauf der gemessenen Reisegeschwindigkeit ab und liegt zeitlich früher. Die zeitliche Verschiebung und damit der Prognosegewinn beträgt bis zu 7 Minuten (vgl. Abbildung 8-5).

Das optimierte Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren entspricht während des Störfalls weitgehend dem Basisverfahren. Zu Beginn des Störfalls kommt es im Übergangsbereich zwischen freiem und gestautem Verkehrsfluss kurzzeitig zu Abweichungen zwischen den beiden Verfahren. Ähnliches ist im Übergangsbereich bei der Auflösung des Störfalls zu beobachten. Aufgrund der gewählten Schwellwerte wird in den Übergangsbereichen teilweise die extrapolierte lokale Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt als Prognosewert herangezogen, obwohl das Basisprognoseverfahren bessere Werte liefert und umgekehrt.

Vor und nach dem Störfall, im freien bzw. teilgebundenen Verkehr, ergibt das optimierte Verfahren wesentlich bessere Prognoseergebnisse als das Basisverfahren. Die Ganglinie des optimierten Prognoseverfahrens liegt weitgehend auf gleichem Niveau wie die aktuellen bzw. mit zeitlichem Verzug gemessenen Reisegeschwindigkeiten. Streckenweise entspricht die

optimierte Prognoseganglinie der Ganglinie der gemessenen Reisegeschwindigkeiten und liegt zeitlich früher (Prognosegewinn).

Beispiel 2.3:

Störfall manifestiert sich nach kurzer Zeit am Eingangsquerschnitt

Betrachtungszeitraum:	9:10 – 10:10 Uhr
Messtag:	13.01.2007 (Samstag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-M14 bis MQ-M16
Fahrtrichtung:	München
Abschnittslänge:	3,725 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	Hilfsquerschnitt mit Wechselverkehrszeichengeber
Sonstige Besonderheiten:	–
Freifahrtgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	teilweise über 130 km/h / frei
Freifahrtgeschwindigkeit nach dem Störfall (gemessen/zulässig):	zeitweise 100 / schwankend 100 km/h bis frei
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	6,1 %

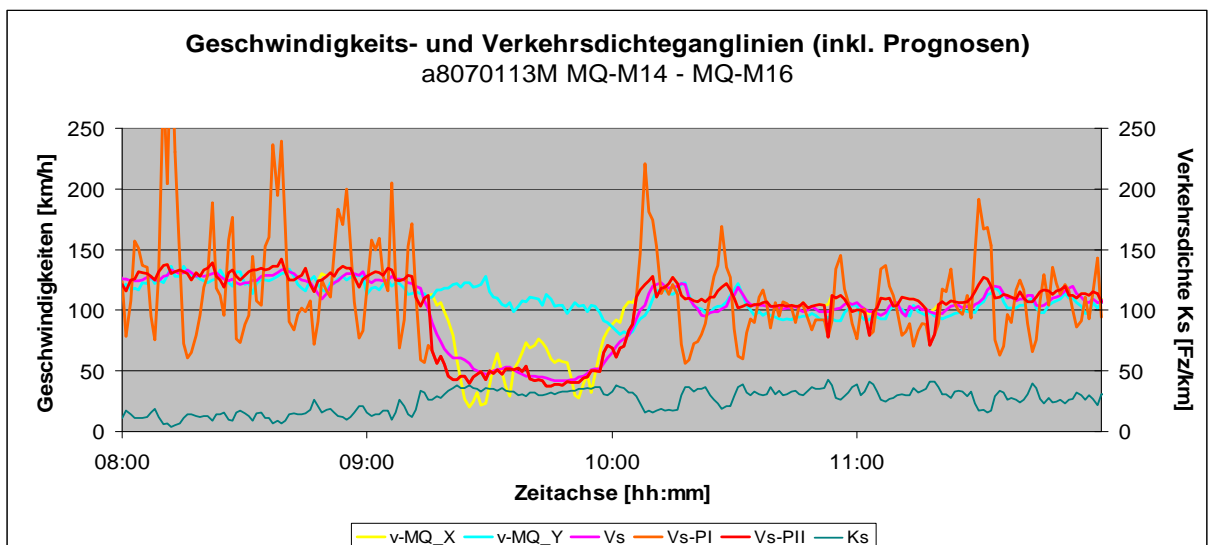


Abbildung 8-6: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (inkl. Prognose) – Beispiel 2.3

Prognose:

Vor und nach dem Störfall sind bei der Basisprognoseganglinie starke Schwankungen zwischen 60 km/h und mehr als 250 km/h zu beobachten (Hinweis: Das Basisprognose-

verfahren gilt nur für den gestörten Verkehrsablauf. Das optimierte Prognoseverfahren gilt für alle Verkehrsabläufe und enthält eine Begrenzung der Prognosewerte auf 130 km/h). Die Schwankungen deuten auf einen freien bzw. teilgebundenen Verkehrsfluss hin, in dem entsprechende Freiheitsgrade vorhanden sind. In diesen Zeiträumen bildet sich keine charakteristische Zeitlücke t_{ch} . Die Ergebnisse der Basisprognose spiegeln die gemessenen Reisegeschwindigkeiten V_s nicht wider. Während des Störfallanfangs liefert die Basisprognose gute Ergebnisse und bildet den Verlauf der gemessenen Reisegeschwindigkeit ab. Die zeitliche Verschiebung der Basisprognoseganglinie und damit der Prognosegewinn beträgt bis zu 7 Minuten (vgl. Abbildung 8-6).

Das optimierte Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren entspricht während des Störfalls weitgehend dem Basisverfahren. Nur zu Beginn des Störfalls kommt es im Übergangsbereich zwischen freiem und gestautem Verkehrsfluss kurzzeitig zu Abweichungen zwischen den beiden Verfahren. Aufgrund der gewählten Schwellwerte wird im Übergangsbereiche teilweise die extrapolierte lokale Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt als Prognosewert herangezogen, obwohl das Basisprognoseverfahren bessere Werte liefert.

Vor und nach dem Störfall, im freien bzw. teilgebundenen Verkehr, ergibt das optimierte Verfahren wesentlich bessere Prognoseergebnisse als das Basisverfahren. Die Ganglinie des optimierten Prognoseverfahrens liegt weitgehend auf gleichem Niveau wie die aktuellen bzw. mit zeitlichem Verzug gemessenen Reisegeschwindigkeiten. Streckenweise entspricht die optimierte Prognoseganglinie der Ganglinie der gemessenen Reisegeschwindigkeiten und liegt zeitlich früher (Prognosegewinn).

8.4 Störfallursache im stromaufwärts liegenden Abschnitt

Nachfolgend werden anhand eines Beispiels (vgl. Kapitel 5) die beiden Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren für einen Störfall untersucht, bei dem die ausschlaggebende Störfallursache stromaufwärts über den Eingangsquerschnitt in den Betrachtungsabschnitt hineinwandert (Beispiel 3.1). Sobald die ausschlaggebende Störfallursache im Betrachtungsabschnitt angekommen ist, entspricht der weitere Verlauf dem Verlauf eines Störfalls, bei dem die ausschlaggebende Störfallursache im Betrachtungsabschnitt selbst liegt.

Beispiel 3.1:

Störfallursache wandert stromabwärts in den Betrachtungsabschnitt hinein

Betrachtungszeitraum:	14:10 – 16:10 Uhr
Messtag:	23.02.2007 (Freitag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-S17 bis MQ-S18
Fahrtrichtung:	Stuttgart
Abschnittslänge:	2,330 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2

Bauliche Besonderheiten:	–
Sonstige Besonderheiten:	–
Freifahrgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	teilweise unter 100 / 100 km/h
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	10,1 %

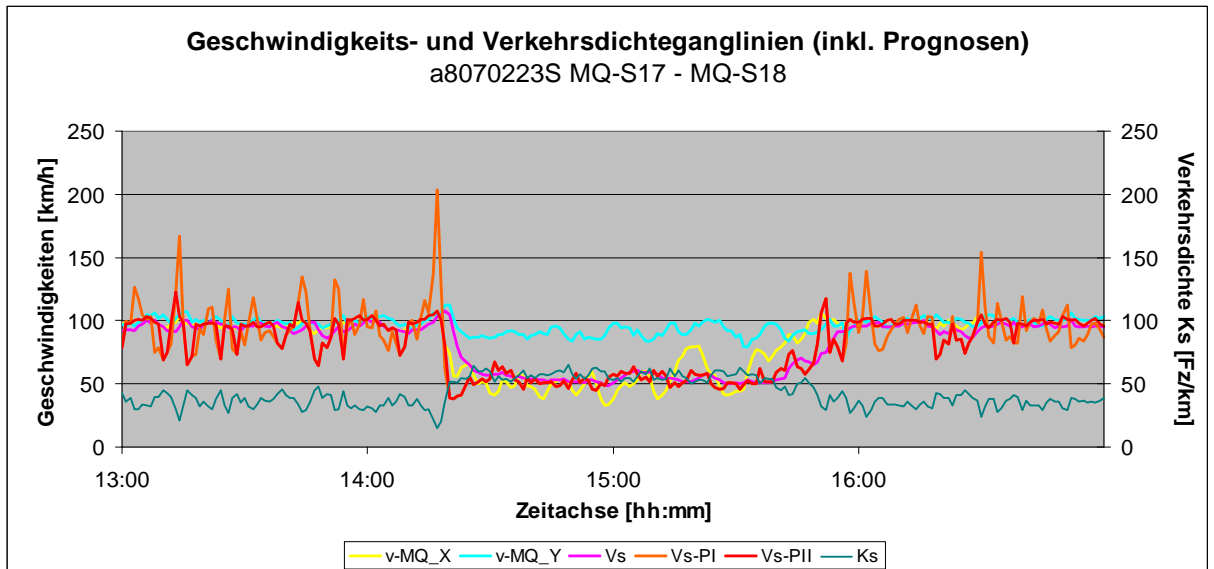


Abbildung 8-7: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (inkl. Prognose) – Beispiel 3.1

Prognose:

Vor und nach dem Störfall sind bei der Basisprognoseganglinie Schwankungen zwischen 70 km/h und 170 km/h zu beobachten (Hinweis: Das Basisprognoseverfahren gilt nur für den gestörten Verkehrsablauf. Das optimierte Prognoseverfahren gilt für alle Verkehrsabläufe und enthält eine Begrenzung der Prognosewerte auf 130 km/h). Die Schwankungen deuten auf einen teilgebundenen Verkehrsfluss hin, in dem noch entsprechende Freiheitsgrade vorhanden sind. In diesen Zeiträumen bildet sich keine charakteristische Zeitlücke t_{ch} . Die Ergebnisse der Basisprognose können entsprechend die gemessenen Reisegeschwindigkeiten V_s nicht widerspiegeln.

Kurz vor dem Einbruch der lokalen und streckenbezogenen Geschwindigkeiten steigt das Ergebnis der Basisprognose auf über 200 km/h an. Dieser Anstieg ist darauf zurückzuführen, dass zu diesem Zeitpunkt die Verkehrsdichte K_s im Betrachtungsabschnitt stark abnimmt. Ab ca. 14:28 Uhr, zu Beginn des Einbruchs der lokalen und streckenbezogenen Geschwindigkeiten, stellt sich am Ausgangsquerschnitt eine charakteristische Zeitlücke t_{ch} ein. Die Basisprognoseergebnisse bilden weitgehend den Verlauf der gemessenen Reisegeschwindigkeiten V_s ab (vgl. Abbildung 8-7).

Es ist zu beobachten, dass der Einbruch der Basisprognoseganglinie stärker als der Einbruch der gemessenen Reisegeschwindigkeit ist, jedoch zeitlich bis zu 7 Minuten früher liegt. Während des weiteren Störfalls liegt die Basisprognoseganglinie teilweise vor den mit zeitlichem Nachlauf gemessenen Reisegeschwindigkeiten. Während der Auflösung des

Störfalls schwanken die Basisprognoseergebnisse stark, liegen jedoch ebenfalls zumeist vor den Messwerten. Die starken Schwankungen deuten auf verfügbare Freiheitsgrade im Verkehrsablauf hin, die bei der Auflösung des Störfalls teilweise ausgenutzt werden.

Das optimierte Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren entspricht während des Störfalls dem Basisverfahren und liefert die gleichen Ergebnisse. Vor und nach dem Störfall, im freien bzw. teilgebundenen Verkehrszustand, liefert das optimierte Verfahren bessere Ergebnisse als das Basisverfahren. Dennoch sind teilweise starke Schwankungen und Abweichungen zu den aktuellen und im zeitlichen Nachlauf gemessenen Reisegeschwindigkeiten zu erkennen. Diese starken Schwankungen und Abweichungen sind auf die ebenfalls stark schwankende Verkehrsdichte K_S zurückzuführen. Aufgrund der gewählten Schwellwerte für das optimierte Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren greift das Verfahren zuweilen auf die Ergebnisse des Basisprognoseverfahrens zurück. Diese sind zum Teil jedoch wesentlich schlechter als die Ergebnisse, die über eine Extrapolation der lokal gemessenen Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt erzielt werden.

8.5 Betrachtung und Bewertung der Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Einzelanalysen aus den Anwendungsbeispielen (Kapitel 8.2 bis 8.4) zusammengefasst. Dabei wird das Basisprognoseverfahren sowie das optimierte Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren sowohl hinsichtlich einer generellen Einsatzfähigkeit als auch im Hinblick auf den zu erzielenden Nutzen für die Verkehrssicherheit, die Verkehrsqualität und die Energieeffizienz bewertet.

8.5.1 Generelle Einsatzfähigkeit des Basisprognoseverfahrens

Im Folgenden wird die generelle Einsatzfähigkeit des Basisprognoseverfahrens im gestörten Verkehrszustand beurteilt.

Die Anwendungsbeispiele zeigen, dass das vorgestellte Basisverfahren unter vielfältigen Randbedingungen im gestörten Verkehrszustand gute und sehr gute Prognoseergebnisse liefert. Es können Prognosegewinne von mehreren Minuten beobachtet werden. Die Qualität der Prognoseergebnisse ist dabei weitgehend unabhängig von der tatsächlichen Lage der Störfallursache. Sowohl für Störfälle, bei denen die Störfallursache außerhalb des Betrachtungsabschnitts (im stromabwärts bzw. stromaufwärts liegenden Abschnitt) liegt, als auch bei Störfällen bei denen die Störfallursache im Betrachtungsabschnitt selbst liegt, können gute Prognoseergebnisse erzielt werden.

Maßgebend für die Qualität der Prognoseergebnisse des Basisverfahrens ist die charakteristische Zeitlücke t_{ch} (vgl. Kapitel 6). Stellt sich aufgrund eines Störfalls eine charakteristische Zeitlücke t_{ch} am Ausgangsquerschnitt ein und ist diese Zeitlücke hinreichend charakteristisch für den gesamten Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt, so erzielt das Basisverfahren gut Prognoseergebnisse.

Eine charakteristische Zeitlücke t_{ch} und somit eine gute Prognose beruht dabei einerseits auf den jeweiligen Randbedingungen am Störfallquerschnitt (liegt schon bzw. noch eine

Rückstauung vor) und andererseits auf dem Verkehrsablauf zwischen Störfall- und Ausgangsquerschnitt (liegt schon bzw. noch ein gleichförmiger Verkehrsfluss vor). Liegt am Störfallquerschnitt keine Rückstauung vor oder aber ist der Verkehrsfluss zwischen Störfall- und Ausgangsquerschnitt nicht gleichförmig, so stellt sich am Ausgangsquerschnitt keine charakteristische Zeitlücke t_{ch} ein. In diesem Fall werden verfahrensbedingt mit der Basisprognose auch keine guten Ergebnisse erzielt.

Beispiele für Störfälle, bei denen eine Störung des Verkehrsablaufs im Betrachtungsabschnitt vorliegt, die Prognoseergebnisse des Basisverfahrens jedoch keine guten Prognoseergebnisse erzielen, sind ebenfalls in den Anwendungsbeispielen zu beobachten. Speziell in den Übergangsbereichen zwischen freien und gestörten Verkehrszuständen (zumeist zu Beginn und zum Ende des Störfalls) treten vereinzelt Situationen auf, in denen die am Ausgangsquerschnitt gemessene charakteristische Zeitlücke t_{ch} noch nicht bzw. nicht mehr für den gesamten Betrachtungsabschnitt charakteristisch ist. Die in diesen Fällen berechnete Basisprognose weicht teilweise von den gemessenen Reisegeschwindigkeiten V_S ab. Schwankungen und/oder unterschiedlich ausgeprägte Steigungen (positiv und negativ) sind in den Basisprognoseganglinien zu beobachten.

Die Dauer der Übergangszustände hängt maßgeblich von der Lage der Störfallursachen und den verkehrlichen Randbedingungen ab.

Liegt die Störfallursache im Betrachtungsabschnitt selbst bzw. im stromaufwärts liegenden Abschnitt, so beginnt der Übergangszustand kurz nach der Entstehung des Störfalls und besteht so lange, bis sich der aufgrund des Störfalls veränderte Verkehrsablauf auch am Ausgangsquerschnitt eingestellt hat. Die Dauer des Übergangszustands entspricht somit der mittleren Reisezeit der Fahrzeuge, die diese unter den gegebenen Randbedingungen benötigen, um den Teilabschnitt zwischen Störfallquerschnitt (Entstehungsort) und Ausgangsquerschnitt (Messort) zu durchfahren. Aufgrund der kurzen Betrachtungsabschnittslängen in den gewählten Anwendungsbeispielen ist die Dauer der jeweiligen Übergangszustände zumeist ebenfalls kurz.

Liegt die Störfallursache im stromabwärts liegenden Betrachtungsabschnitt, so beginnt der Übergangszustand im Betrachtungsabschnitt zu dem Zeitpunkt, an dem sich die ersten störfallbedingten Änderungen im Verkehrsablauf des Betrachtungsabschnitts einstellen. Beendet ist der Übergangszustand zu dem Zeitpunkt, an dem der homogenisierte Rückstau, der sich stromabwärts vor dem Störfallquerschnitt bildet, über den Ausgangsquerschnitt in den Betrachtungsabschnitt hineingewachsen ist. Die Zeitdauer dieses Übergangszustands ist von der Entfernung des Störfallquerschnitts zum Ausgangsquerschnitt sowie den verkehrlichen Randbedingungen abhängig. Je nach Entfernung und Rückstaugeschwindigkeit kann dieser Übergangszustand eine längere oder kürzere Zeitdauer haben.

Teilweise kommt es zu Störfallverläufen, bei denen sich mehrere Übergangszustände innerhalb eines kurzen Zeitraums einstellen. Dieses ist beispielsweise bei einer rücklaufenden Stauwelle der Fall. Bei einer Stauwelle entspricht der erste sich einstellende Übergangszustand dem eines Störfalls, bei dem die Störfallursache im stromabwärts liegenden Abschnitt liegt. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich die Stauwelle inklusive des Stauendes noch im stromabwärts liegenden Abschnitt. Sobald das Stauende den Ausgangsquerschnitt erreicht hat, endet dieser

erste Übergangszustand. Es schließt sich ein zweiter Übergangszustand an, der den Zeitraum bis zum vollständigen Eintritt der Stauwelle in den Betrachtungsabschnitt abdeckt. Während dieses Zeitraums verändert sich der Verkehrsablauf am Ausgangsquerschnitt permanent.

Eine charakteristische Zeitlücke t_{ch} stellt sich erst ab dem Zeitpunkt am Ausgangsquerschnitt ein, an dem sich die Stauwelle vollständig im Betrachtungsabschnitt befindet. Der stetig weiterwandernde Stauanfang (Ursprung der charakteristischen Zeitlücke t_{ch}) kann diese aber selbst dann noch beeinflussen.

In den zugrunde gelegten Modellannahmen und gewählten Ansätzen werden Übergangszustände weitgehend vernachlässigt. Sie sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

8.5.2 Generelle Einsatzfähigkeit des optimierten Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahrens

Das optimierte Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren koppelt das Basisprognoseverfahren mit einem Extrapolationsverfahren. Ziel des optimierten Verfahrens ist es, Prognoseergebnisse auch im ungestörten Verkehrszustand zu erhalten (vgl. Kapitel 7.6). Da die generelle Einsatzfähigkeit des Basisprognoseverfahrens für den gestörten Verkehrszustand bereits vorstehend in Kapitel 8.5.1 diskutiert wird, wird im Folgenden nur auf das Extrapolationsverfahren im ungestörten Verkehrszustand eingegangen.

Die Anwendungsbeispiele zeigen, dass das eingesetzte Extrapolationsverfahren im ungestörten Verkehrszustand gute Prognoseergebnisse liefert. Dabei ist die Qualität der Prognoseergebnisse von den vorhandenen Freiheitsgraden im Verkehrsablauf abhängig. Im freien Verkehrszustand (maximale Anzahl an Freiheitsgraden) liefert das Prognoseverfahren teilweise sehr gute Ergebnisse. Die Abweichungen zwischen den prognostizierten und den mit zeitlichem Verzug gemessenen Reisegeschwindigkeiten V_s sind gering. Die Prognoseganglinien entsprechen weitgehend der Ganglinie der gemessenen Reisegeschwindigkeiten V_s . Geschwindigkeitsschwankungen innerhalb des freien Verkehrsflusses werden zumeist mit zeitlichem Vorlauf prognostiziert. Das ist der Prognosegewinn. Mit abnehmenden Freiheitsgraden im Verkehrsfluss kommt es zu Abweichungen zwischen den gemessenen und den prognostizierten Werten des Extrapolationsverfahrens. Besonders in den Anwendungsbeispielen, bei denen im weiteren Verlauf ein Störfall auftritt, dessen Störfallursache im stromabwärts liegenden Abschnitt liegt, ist dieses zu beobachten.

Das optimierte Verfahren verfügt zusätzlich über eine Begrenzung der maximalen Prognosewerte. Unplausibel hohe Prognosewerte werden auf 130 km/h begrenzt. In den aufgeführten Anwendungsbeispielen kommt dies nur selten vor und dann zumeist in Übergangszuständen.

8.5.3 Bewertung der Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahrens

Im Folgenden werden das Basisprognoseverfahren sowie das optimierte Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren hinsichtlich ihres potentiellen Nutzens zur Steigerung der Verkehrssicherheit, der Verkehrsqualität und der Energieeffizienz bewertet.

Verkehrssicherheit (Störfallerkennung):

Die erzielten Ergebnisse der angeführten Anwendungsbeispiele zeigen, dass beide Prognoseverfahren ein hohes Potential aufweisen, die Verkehrssicherheit auf Autobahnen signifikant zu steigern. Mittels beider Prognoseverfahren können auftretende Störfälle im Betrachtungsabschnitt zumeist schnell und zuverlässig erkannt werden. Der Prognosegewinn, das ist der zeitliche Abstand der Prognoseganglinien und der gemessenen Reisegeschwindigkeitganglinie, ist dabei von der Lage der ausschlaggebenden Störfallursache abhängig.

Störfälle, die den Verkehrsfluss im Betrachtungsabschnitt beeinträchtigen, führen zu Auffälligkeiten bei den lokalen (am Ein- und Ausgangsquerschnitt) und/oder streckenbezogen gemessenen Geschwindigkeiten. Welche der gemessenen Geschwindigkeiten bei einem Störfall als erste Auffälligkeiten zeigt, ist ebenfalls abhängig von der Lage der Störfallursache (vgl. Kapitel 3).

Anhand der Anwendungsbeispiele ist zu erkennen, dass unabhängig davon, welche der gemessenen Geschwindigkeiten im Betrachtungsabschnitt zuerst Auffälligkeiten zeigt, bei den Prognoseergebnissen früher bzw. spätestens annähernd zum Zeitpunkt des Ereignisses Auffälligkeiten sichtbar sind.

Speziell bei den Störfällen, bei denen die Störfallursache im Betrachtungsabschnitt selbst liegt, ist zu beobachten, dass der Prognosegewinn teilweise mehrere Minuten beträgt. Hinzu kommt, dass es bei dieser Art von Störfällen unter gewissen Randbedingungen zu einem Fließgleichgewicht innerhalb des Betrachtungsabschnitts kommen kann (Staulänge und Lage des Staus sind konstant), welches weder am Ein- noch am Ausgangsquerschnitt mit lokalen Verkehrsgrößen zuverlässig erkannt werden kann. In diesen Fällen ist der Nutzen der vorgestellten Prognoseverfahren besonders hoch, da diese eine entsprechend niedrigere Reisegeschwindigkeit prognostizieren und damit auf den Störfall innerhalb des Betrachtungsabschnitts hinweisen.

Ein schnelles und zuverlässiges Erkennen von Störfällen bildet die Grundlage jeder regulierenden und/oder warnenden Maßnahme zur Steigerung der Verkehrssicherheit. Der Nutzen der Prognoseverfahren hinsichtlich einer Steigerung der Verkehrssicherheit ist somit als hoch zu beurteilen.

Verkehrsqualität:

Nachfolgend werden die Prognoseverfahren differenziert nach ihren Einflussmöglichkeiten auf die objektive und subjektive Verkehrsqualität betrachtet. Hierbei beziehen sich die Aussagen auf den Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt.

Zur Beurteilung der objektiven Verkehrsqualität definiert das HBS 2001 sechs Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV). Die Einteilung in die sechs Qualitätsstufen A bis F kann dabei über die Parameter Auslastungsgrad, mittlere Reisezeit der Pkw, mittlere Reisegeschwindigkeit der Pkw oder aber über die Verkehrsdichte erfolgen [For01].

Für das gerade in den Betrachtungsabschnitt einfahrende Fahrzeug (Fahrzeugkollektiv) kann die objektive Verkehrsqualität anhand möglicher aus den Ergebnissen der Prognoseverfahren abgeleiteter Strategien nicht mehr beeinflusst werden. Eine kurzfristige (Zeithorizont: aktuelle

Reisezeit) Veränderung vorstehender Parameter ist nicht möglich. Die objektive Verkehrsqualität im Betrachtungsabschnitt bleibt für dieses Fahrzeug (Fahrzeugkollektiv) unverändert.

Für nachfolgende Fahrzeuge (Fahrzeugkollektive) kann durch entsprechend abgeleitete Verkehrsbeeinflussungsstrategien die objektive Verkehrsqualität jedoch sehr wohl beeinflusst werden. Maßgeblich für die Parameter mittlere Reisezeit bzw. mittlere Reisegeschwindigkeit der Fahrzeuge sowie für die Verkehrsdichte im Betrachtungsabschnitt sind der Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt selbst sowie die Anzahl der zu- und abfließenden Fahrzeuge.

Zum Beispiel durch das Schalten von entsprechenden Wechselverkehrszeichen im stromaufwärts liegenden Abschnitt kann der Zufluss reglementiert werden, wodurch sich dann eine bessere objektive Verkehrsqualität einstellen kann.

Ein positiver Einfluss des Basisprognoseverfahrens und des optimierten Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahrens auf die objektive Verkehrsqualität nach HBS 2001 ist somit für das gerade in den Betrachtungsabschnitt einfahrende Fahrzeug (Fahrzeugkollektiv) nicht gegeben, für die nachfolgenden Fahrzeuge (Fahrzeugkollektive) jedoch sehr wohl.

Neben der im HBS 2001 definierten objektiven Verkehrsqualität rückt zunehmend zusätzlich die vom Fahrer empfundene bzw. beeinflussbare subjektive Verkehrsqualität in den Forschungsfokus. Als Parameter der subjektiven Verkehrsqualität werden dabei die Gesamtreisezeit, die Verkehrssicherheit und der Fahrkomfort genannt [TKH05].

Die Ergebnisse der Prognoseverfahren können den Fahrern als zusätzliche Information in Verbindung mit einer geeigneten (Fahr-)Strategie zur Verfügung gestellt werden [HNP+09]. Eine entsprechende Zuverlässigkeit und Akzeptanz der Informationen und Empfehlungen vorausgesetzt, können diese dazu beitragen, den Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt zu homogenisieren und zusätzliche Störfälle im Annäherungsbereich zu vermeiden (z.B. Auffahrunfälle am Stauende). Dadurch wird im Betrachtungsabschnitt sowohl die Verkehrssicherheit optimiert als auch, durch ein mit dem homogenisierten Verkehrsablauf einhergehendes defensiveres Fahrverhalten, der Fahrkomfort gesteigert.

In Bezug auf die empfundene bzw. beeinflussbare subjektive Verkehrsqualität ist der Nutzen der Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren als hoch zu bewerten.

Energieeffizienz:

Energieeffizientes Autofahren wird von einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren beeinflusst. Dazu zählt neben der Gruppe der fahrzeugabhängigen Faktoren, z.B. Reifen und Motorisierung, auch die Gruppe der individuell vom Fahrer beeinflussbaren Faktoren, wie z.B. das vorausschauende Fahren sowie das Vermeiden von hohen Geschwindigkeiten [Bun08].

Eine direkte oder indirekte Beeinflussung der fahrzeugabhängigen Faktoren durch Anwendung der Prognoseverfahren ist im Gegensatz zu den von den Fahrern beeinflussbaren Faktoren nicht möglich.

Im Hinblick auf die von den Fahrern beeinflussbaren Faktoren liefern die Ergebnisse der Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren besonders im Störfall wertvolle

zusätzliche Informationen über den Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt. Zusätzliche Informationen, wie z.B. Informationen über einen bestehenden Störfall, den zu erwartenden Reisezeitverlust sowie den Verkehrsablauf im bevorstehenden Autobahnabschnitt (Betrachtungsabschnitt), können zu einer erhöhten Akzeptanz der empfohlenen Reisegeschwindigkeit bzw. der zulässigen Höchstgeschwindigkeit führen. Das Einhalten von empfohlenen bzw. zulässigen (Höchst-)Geschwindigkeiten führt zu einer Homogenisierung des Verkehrsablaufs und zum vorausschauenden Fahren. Unnötige Beschleunigungsvorgänge (positiv und negativ) werden reduziert, die Sicherheitsabstände besser eingehalten. Die Harmonisierung des Verkehrsablaufs führt zu einer Verkehrsoptimierung, die sowohl im Hinblick auf die Verkehrssicherheit, die Verkehrsqualität als auch auf die Energieeffizienz einen hohen Nutzen darstellt.

In Bezug auf die Energieeffizienz ist der Nutzen der Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren als hoch zu bewerten.

8.6 Zusammenfassung „Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren – Überprüfung“

Im vorangegangenen Kapitel werden die theoretischen Überlegungen des Basisverfahrens sowie des optimierten Verfahrens zur Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose anhand von empirischen Erhebungen bestätigt. In den angeführten Anwendungsbeispielen kann für zahlreiche Randbedingungen gezeigt werden, dass das Basisverfahren im gestörten Verkehrszustand zumeist gute Prognoseergebnisse liefert. Der Prognosegewinn beträgt teilweise mehrere Minuten.

Das optimierte Prognoseverfahren, welches aus einer Kopplung des Basisverfahrens mit einem Extrapolationsverfahren besteht, liefert darüber hinaus ebenfalls für den nicht freien Verkehrszustand gute Prognoseergebnisse. Anhand des optimierten Prognoseverfahrens kann zudem nachgewiesen werden, dass das Basisverfahren prinzipiell mit anderen Prognoseansätzen koppelbar ist.

Der Einfluss der Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren hinsichtlich einer Steigerung der Verkehrssicherheit, der Verkehrsqualität und der Energieeffizienz ist generell als hoch zu bewerten.

Für die Verkehrssicherheit ist dabei entscheidend, dass die Verfahren das schnelle und zuverlässige Erkennen von Störfällen ermöglichen. Dieses kann Grundlage für regulierende und/oder warnende Maßnahmen sein.

Die subjektive und indirekt auch die objektive Verkehrsqualität kann durch die Bereitstellung von zusätzlichen Informationen gesteigert werden, die auf den Prognoseergebnissen aufbauen. Das Bereitstellen von zuverlässigen zusätzlichen Informationen kann die Akzeptanz steigern, die geschalteten Anzeigen (z.B. Geschwindigkeiten, Ge- und Verbote) zu befolgen. Durch die Anzeigen wird der Verkehrsablauf homogenisiert, ein defensiveres und vorausschauendes Fahrverhalten wird erleichtert. Dieses kann zur Vermeidung von unnötigen Beschleunigungs- und Bremsvorgängen sowie zum Einhalten der Sicherheitsabstände zwischen den Fahrzeugen führen, wodurch die Energieeffizienz gesteigert wird.

9 Staulängenberechnungsverfahren – Theorie

Ziel: Im folgenden Kapitel wird ein neuartiges dynamisches Verfahren zur Staulängenberechnung auf Autobahnen vorgestellt. Das Verfahren soll auf einer Verknüpfung von gemittelten lokalen und streckenbezogenen Verkehrsgrößen, die kollektiv für den Betrachtungsabschnitt erhoben bzw. über Modelle ermittelt werden, aufbauen. Dadurch soll im Störfall die voraussichtliche Staulänge für das gerade in den Betrachtungsabschnitt einfallende Fahrzeug (Fahrzeugkollektiv) fortlaufend ermittelt werden.

9.1 Vorgehensweise und Aufbau

Anhand des nachfolgenden Flussdiagramms in Abbildung 9-1 wird kurz die generelle Vorgehensweise sowie der Aufbau des Staulängenberechnungsverfahrens beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen in dem Diagramm aufgeführten Stationen findet in den sich anschließenden Unterkapiteln statt.

Ausgehend von den (verfügbaren) lokalen und streckenbezogenen Messwerten, kann der reale Verkehrsablauf vereinfachend über das Verkehrsmodell S abgebildet werden. Fokus des Verkehrsmodells S ist die Unterteilung des Betrachtungsabschnitts in Teilabschnitte mit einem gleichförmigen freien bzw. gestörten Verkehrsablauf in eingeschwungenen Verkehrszuständen. Als Ergebnis ergibt sich ein modellierter Verkehr S , der mit dem 2-Bereichsmodell beschrieben werden kann. Sowohl der modellierte Verkehr S als auch das 2-Bereichsmodell bilden die Grundlage für das sich anschließende Staulängenberechnungsverfahren. Ergebnis des Staulängenberechnungsverfahrens ist ein Gleichungssystem zur Berechnung der Staulänge im Betrachtungsabschnitt. Als Eingangsgrößen für das Gleichungssystem werden die Verkehrsdichten für die gestörten Teilabschnitte (K_1) sowie die freien Teilabschnitte (K_2) benötigt. Diese können einerseits für Störfallsituationen, bei denen die lokalen Verkehrswerte die streckenbezogenen Verkehrsabläufe genügend genau repräsentieren, über eine Extrapolation von diesen lokalen Messwerten am Ein- und Ausgangsquerschnitt ermittelt werden. Dieser Ansatz wird aufgrund der über kurze Zeitintervalle sehr stark schwankenden lokalen Messwerte (vgl. Kapitel 6.3, Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3) sowie der lediglich bedingten Einsetzbarkeit des Verfahrens nicht weiter verfolgt. Andererseits können die Verkehrsdichten K_1 und K_2 mittels streckenbezogener Messwerte sowie einem Fundamentaldiagramm (hier: Dreiecksdiagramm) erzeugt werden. Die so erzeugten Verkehrsdichten zeichnen sich durch ihre große Robustheit gegen Unruhe im Verkehrsfluss sowie eine Allgemeingültigkeit im Hinblick auf die Störfallsituationen aus. Dieser Ansatz wird weiterverfolgt.

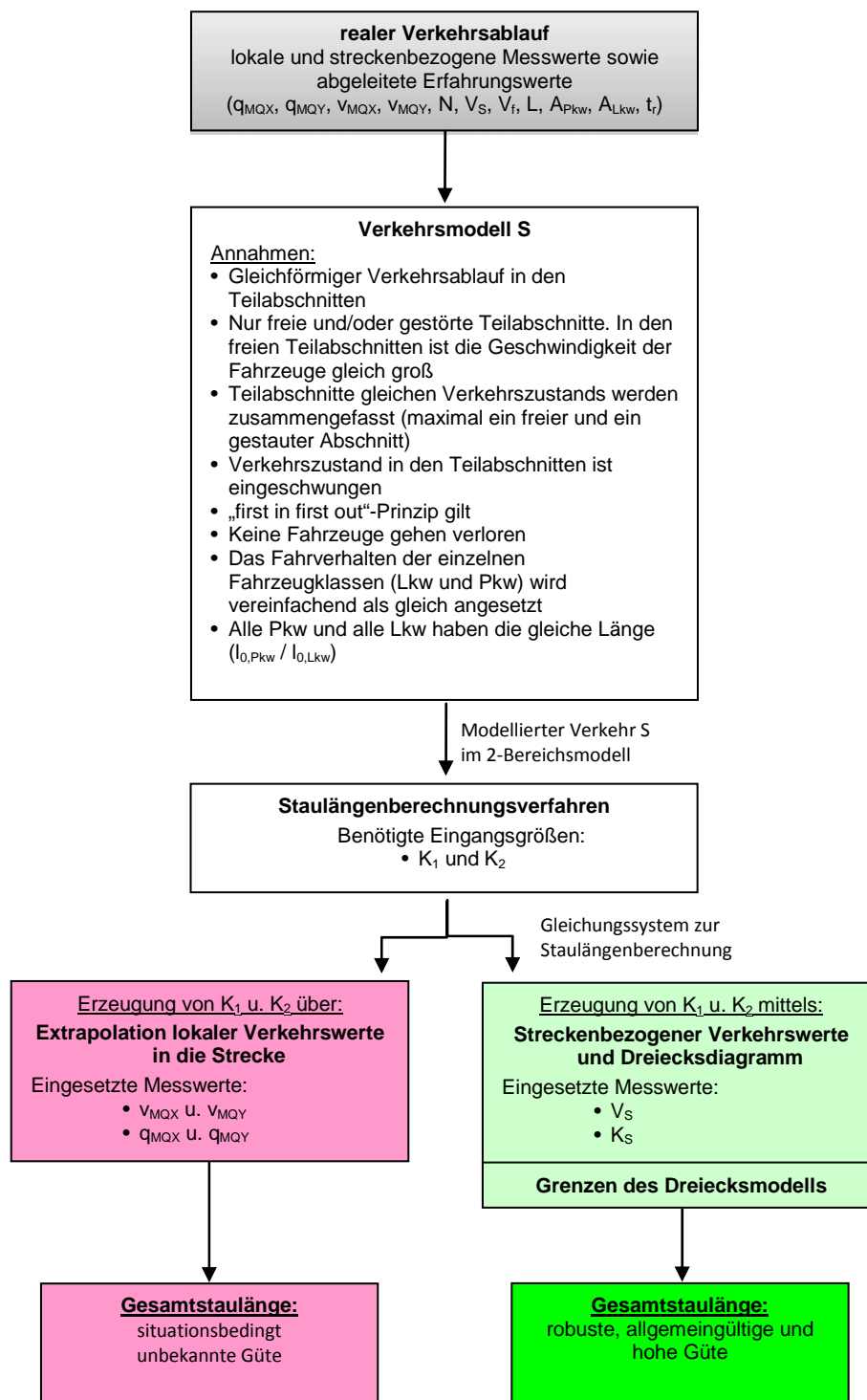


Abbildung 9-1: Flussdiagramm Gesamtstaulängenberechnung

Ausgehend von der Gesamtstaulänge robuster, allgemeingültiger und hoher Güte, können darüber hinaus teilweise Aussagen über die Lage der Stauung gemacht werden. Wie im Flussdiagramm Abbildung 9-2 dargestellt, wird dazu eine Fallunterscheidung nach herrschender Störfallsituation im Betrachtungsabschnitt vorgenommen. Es wird aufgrund der Lage des Störfallquerschnitts nach 1-, 2- und n-Bereichsmodellen unterschieden. Für die beiden Erstgenannten sind Aussagen über die Lage der Stauung möglich (Stauanfang und Stauende innerhalb des Betrachtungsabschnitts). Beim n-Bereichsmodell ist dies nicht möglich.

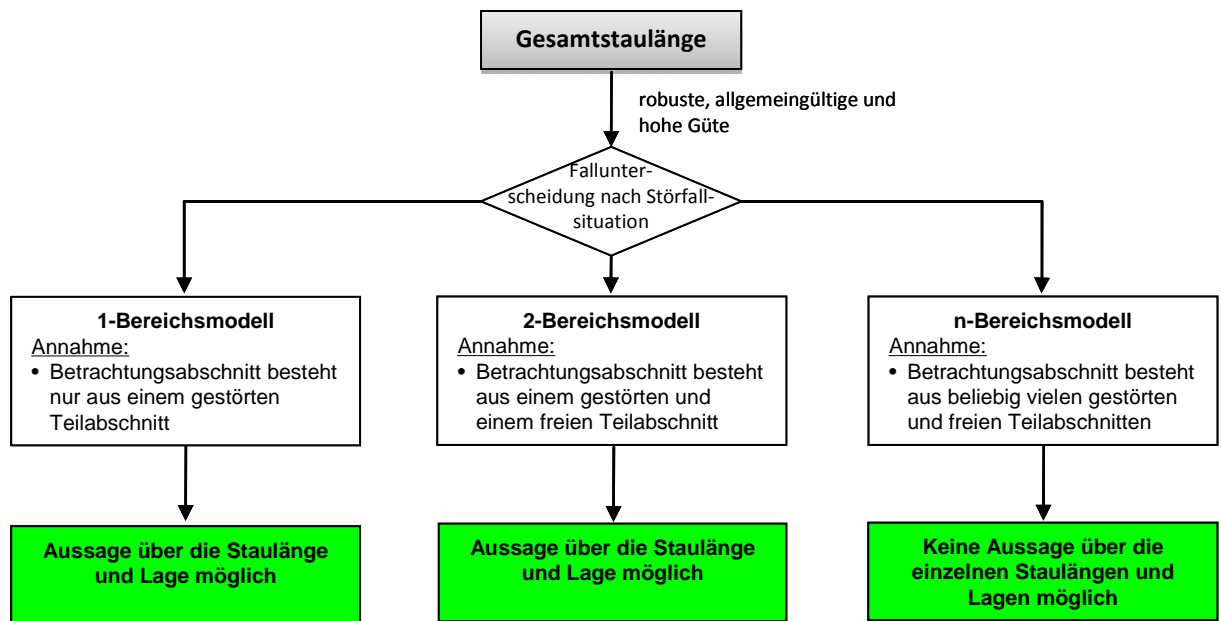


Abbildung 9-2: Flussdiagramm Staulage

9.2 Verkehrsmodell S

Die folgenden Modellannahmen sind dem Staulängenberechnungsverfahren zugrunde gelegt:

Annahmen für das Verkehrsmodell S:

1. Der Verkehrsablauf, der sich in den einzelnen Teilabschnitten des Betrachtungsabschnitts einstellt, ist gleichförmig.
2. Innerhalb des Betrachtungsabschnitts bilden sich nur Teilabschnitte mit freiem und/oder gestörtem Verkehrszustand. Im freien Verkehrszustand haben alle Fahrzeuge die gleiche Geschwindigkeit. Teilabschnitte gleichen Verkehrszustands werden zusammengefasst (maximal ein freier und ein gestauter Abschnitt)
3. Der Verkehrszustand in den einzelnen Teilabschnitten ist während eines genügend kurzen Zeitintervalls (gewählt wird im weiteren 1 Minute) eingeschwungen. Das bedeutet, dass die Anzahl der dem Teilabschnitt zu- und abfließenden Fahrzeuge gleich groß ist. Lage und Länge der Teilabschnitte im Betrachtungsabschnitt ändern sich nicht.
4. Das Fahrverhalten der einzelnen Fahrzeugklassen (Lkw und Pkw) wird vereinfachend als gleich angesetzt.
5. Die im Betrachtungsabschnitt stattfindenden Überholvorgänge werden vernachlässigt. Es gilt das Prinzip „first in first out“.
6. Im Betrachtungsabschnitt gehen keine Fahrzeuge verloren.
7. Alle Pkw und alle Lkw haben die gleiche Fahrzeuglänge ($l_{0,\text{Pkw}}$ und $l_{0,\text{Lkw}}$)

9.3 Folgerungen aus den getroffenen Annahmen

Nachstehend werden aus den im Verkehrsmodell S (vgl. Kapitel 9.2) getroffenen vereinfachenden Annahmen vier Folgerungen abgeleitet.

1. Phasensprung

Annahmen 1 und 2 führen dazu, dass die Verkehrsstärke an der Grenze zwischen zwei Teilabschnitten gleich bleibt, die Verkehrsdichte sich jedoch sprunghaft ändert. Diese Gegebenheit wird im Folgenden als Phasensprung bezeichnet.

Erläuterung:

Phasenübergänge bilden sich immer dann im Betrachtungsabschnitt, wenn dieser sich aus mehreren Teilabschnitten mit unterschiedlichen Verkehrszuständen zusammensetzt. In der Realität bilden sich zwischen Teilabschnitten mit freien und gestörten Verkehrszuständen räumlich ausgedehnte Übergangsbereiche (Phasenübergänge). Dort verändert sich der Verkehrsablauf des freien in den Verkehrsablauf für einen gestauten Verkehrszustand und umgekehrt. In den Phasenübergängen herrscht kein gleichförmiger Verkehrsablauf. Aufgrund der getroffenen Annahmen 1 und 2, dass sich vereinfachend nur gestaute und/oder freie Verkehrszustände mit gleichförmigem Verkehrsablauf in den einzelnen Teilabschnitten einstellen können, wird den räumlich zumeist kleinen Übergangsbereichen die Länge null zugeordnet. Im Modell stoßen damit freie und gestörte Verkehrszustände mit gleichförmigem Verkehrsablauf direkt aneinander. Dies führt dazu, dass in der Modellvorstellung die Verkehrsstärke beim Phasenübergang gleich bleibt, die Verkehrsdichte sich jedoch sprunghaft verändert (Phasensprung).

2. Verkehrsstärke bleibt gleich

Aus den Annahmen 1, 2 und 3 (vgl. Kapitel 9.2) folgt, dass die Verkehrsstärke in allen Teilabschnitten für das gewählte Zeitintervall gleich groß ist. Damit entspricht die Verkehrsstärke q der einzelnen Teilabschnitte ebenfalls der Verkehrsstärke Q_S im gesamten Betrachtungsabschnitt innerhalb des jeweiligen Betrachtungsintervalls.

Erläuterung:

Der Betrachtungsabschnitt setzt sich modellbedingt nur aus gleichförmigen Teilabschnitten mit freiem und/oder gestörtem Verkehrszustand zusammen. Die Anzahl der den einzelnen Teilabschnitten zu- und abfließenden Fahrzeuge ist innerhalb des Betrachtungsintervalls gleich groß. Die Länge der Teilabschnitte verändert sich nicht. Es fließen jedem Teilabschnitt innerhalb des Betrachtungsabschnitts gleich viele Fahrzeuge zu wie ab. Aufgrund der Gleichförmigkeit ist somit die Verkehrsstärke in allen Teilabschnitten und damit auch im gesamten Betrachtungsabschnitt gleich groß.

3. Bereichsmodelle

Annahmen 2 und 3 (vgl. Kapitel 9.2) folgend sind prinzipiell vier verschiedene eingeschwungene Störfallsituationen möglich. Diese sind den 1-, 2- und 3-Bereichsmodellen zuzuordnen.

Erläuterung:

Bei genau einem gestörten und einer nicht näher spezifizierten Anzahl von freien Teilbereichen können sich unter der Modellannahme des eingeschwungenen

Verkehrszustands nur die folgenden vier Störfallsituationen für den Betrachtungsabschnitt ergeben (vgl. Abbildung 9-3 bis Abbildung 9-6).

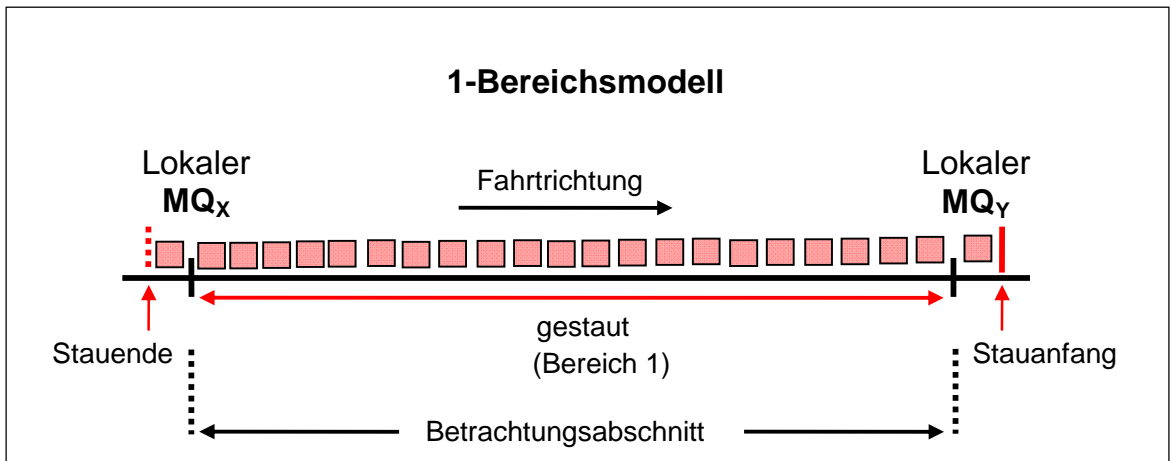


Abbildung 9-3: Eingeschwungenes 1-Bereichsmodell mit gestörtem Verkehrsablauf (Überstauung des gesamten Betrachtungsabschnitts)

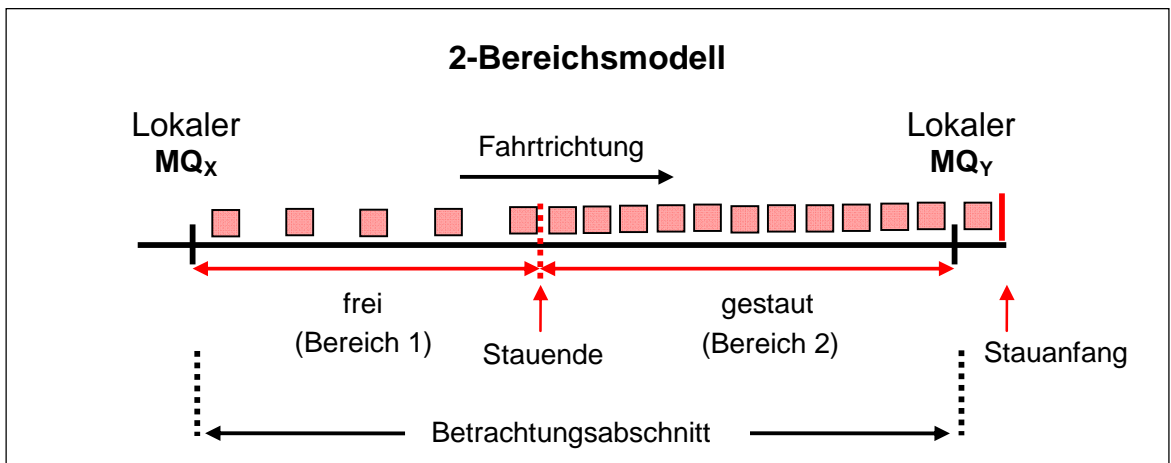


Abbildung 9-4: Eingeschwungenes 2-Bereichsmodell mit gestörtem Verkehrsablauf (Überstauung MQ_y)

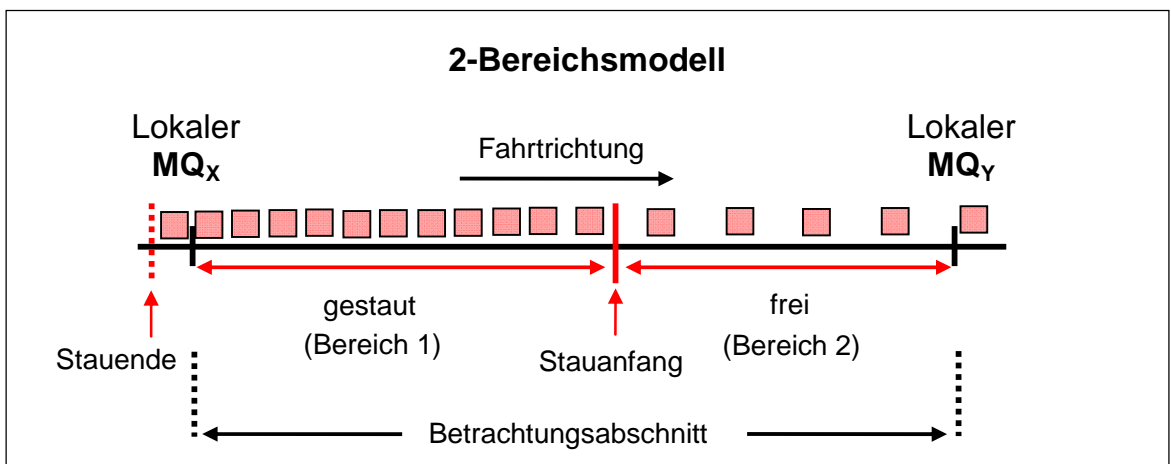


Abbildung 9-5: Eingeschwungenes 2-Bereichsmodell mit gestörtem Verkehrsablauf (Überstauung MQ_x)

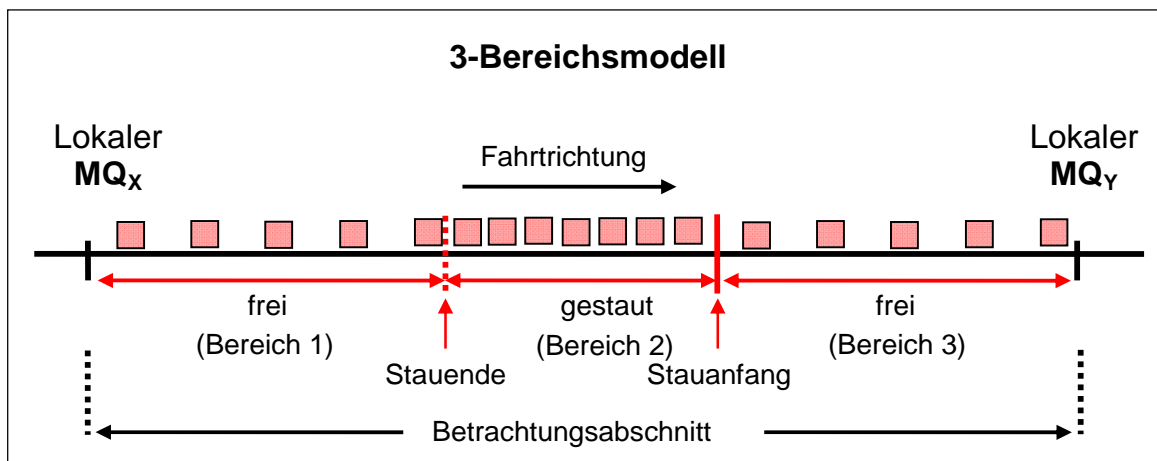


Abbildung 9-6: Eingeschwungenes 3-Bereichsmodell mit gestörtem Verkehrsablauf (nicht manifestierte Stauung)

4. Vereinfachung des 3-Bereichsmodells in ein 2-Bereichmodell

Für das 3-Bereichsmodell (siehe vorstehende Folgerung 3) herrscht gemäß Annahme 2 (vgl. Kapitel 9.2) und vorstehender Folgerung 2 in den beiden freien Teilabschnitten der gleiche Verkehrsablauf. Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit sind identisch. Damit können die beiden Teilabschnitte zu einem freien Teilabschnitt zusammengefasst werden, wodurch sich ein 2-Bereichsmodell ergibt.

Da vorstehende Folgerung 2 nicht auf das 3-Bereichsmodell beschränkt ist, kann die Folgerung auf beliebig viele freie und gestörte Teilabschnitte verallgemeinert werden. Alle freien und alle gestörten Teilabschnitte des Betrachtungsabschnitts können zu jeweils einem Teilabschnitt zusammengefasst werden. Auf diese Weise ergeben sich auch für die verallgemeinerte Betrachtung immer nur zwei zusammenfassbare Teilabschnitte für den Betrachtungsabschnitt und somit ein 2-Bereichsmodell.

Grenzfälle des 2-Bereichsmodells sind zum einen ein gänzlich freier (kein gestörter Teilabschnitt vorhanden) und zum anderen ein gänzlich gestörter Betrachtungsabschnitt (kein freier Teilabschnitt vorhanden). Auch diese 1-Bereichsmodelle werden als Grenzfall vom 2-Bereichsmodell abgedeckt.

Für die weitere Betrachtung kann deshalb das 2-Bereichsmodell in allen Störfallsituationen angewendet werden.

Erläuterung:

In Abbildung 9-7 ist die Vereinfachung des eingeschwungenen 3-Bereichsmodells in ein eingeschwungenes 2-Bereichsmodell schematisch dargestellt.

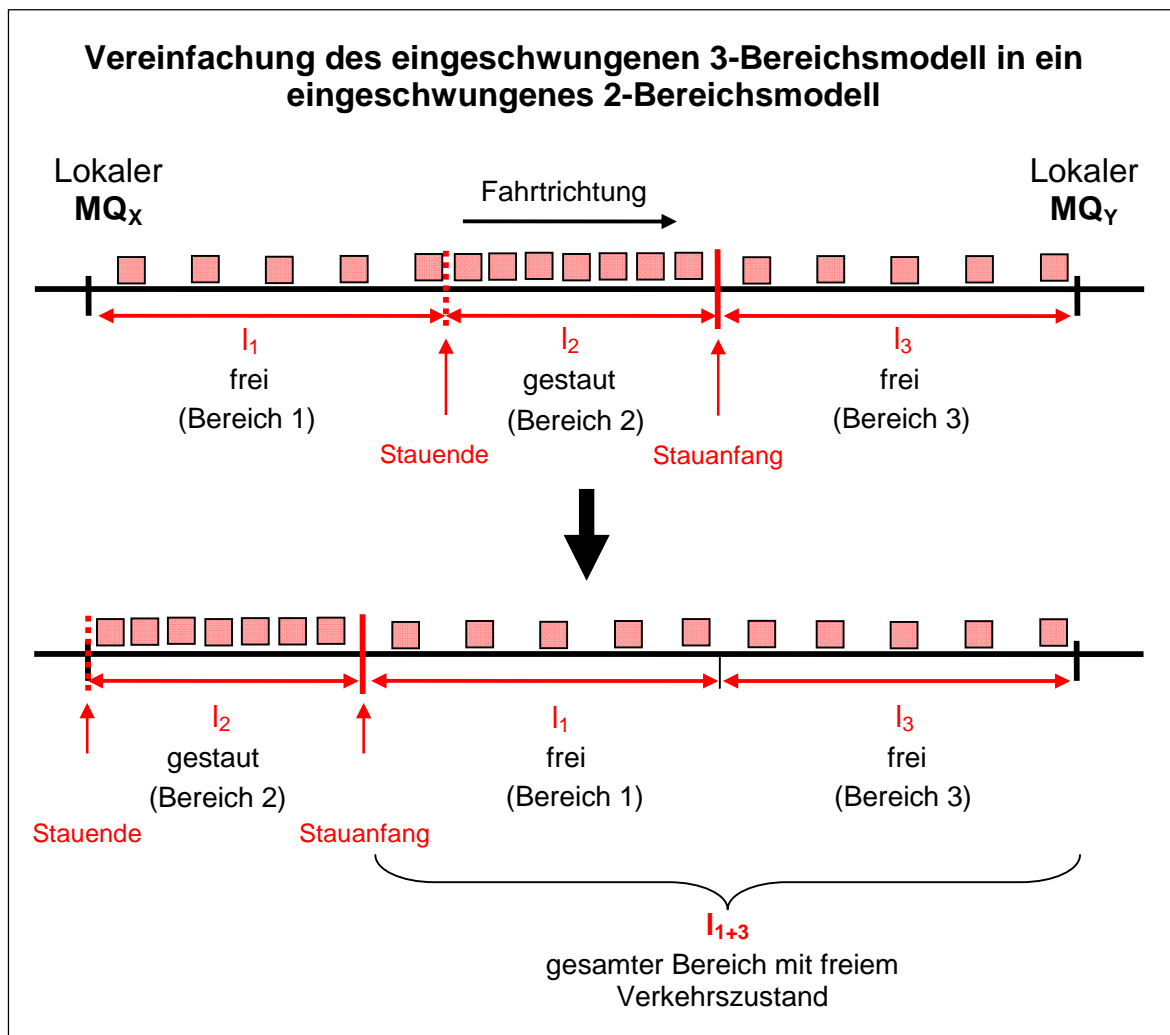


Abbildung 9-7: Vereinfachung des eingeschwungenen 3- in ein eingeschwungenes 2-Bereichsmodell

9.4 Fundamentaldiagramm – Dreiecksfunktion

Das Fundamentaldiagramm, die empirische Beziehung zwischen Verkehrsstärke und Verkehrsdichte (q - k -Diagramm), ist besonders geeignet, Verkehrsabläufe zu beschreiben und zu quantifizieren. Zur möglichst genauen Beschreibung der realen Verkehrsabläufe in einer q - k -Beziehung existieren in der Literatur vielfältige Ansätze (vgl. [For05]). Nachfolgend wird für die weitere Staulängenberechnung der Ansatz der „Dreiecksfunktion“ als vereinfachte Verkehrsstärke-Verkehrsdichte-Relation zugrunde gelegt (vgl. [For05]). Die Dreiecksfunktion gehört zu den 2-Bereichsmodellen, die unterschiedliche lineare Relationsansätze für den freien und gestörten Verkehrszustand verknüpfen. Dabei werden für den freien Verkehrszustand „Geschwindigkeits-Verkehrsdichte“-Beziehungen und im gestörten Verkehrszustand „Abstands-Phänomene“ herangezogen [For05].

Es ist anzumerken, dass die Dreiecksfunktion lediglich ein mögliches Modell darstellt. Sie wird hier aufgrund der mathematisch einfachen Handhabbarkeit gewählt. Der Einsatz anderer (komplexerer) Modelle ist möglich. Eine Optimierung hinsichtlich des gewählten Modells ist nicht Gegenstand der Arbeit.

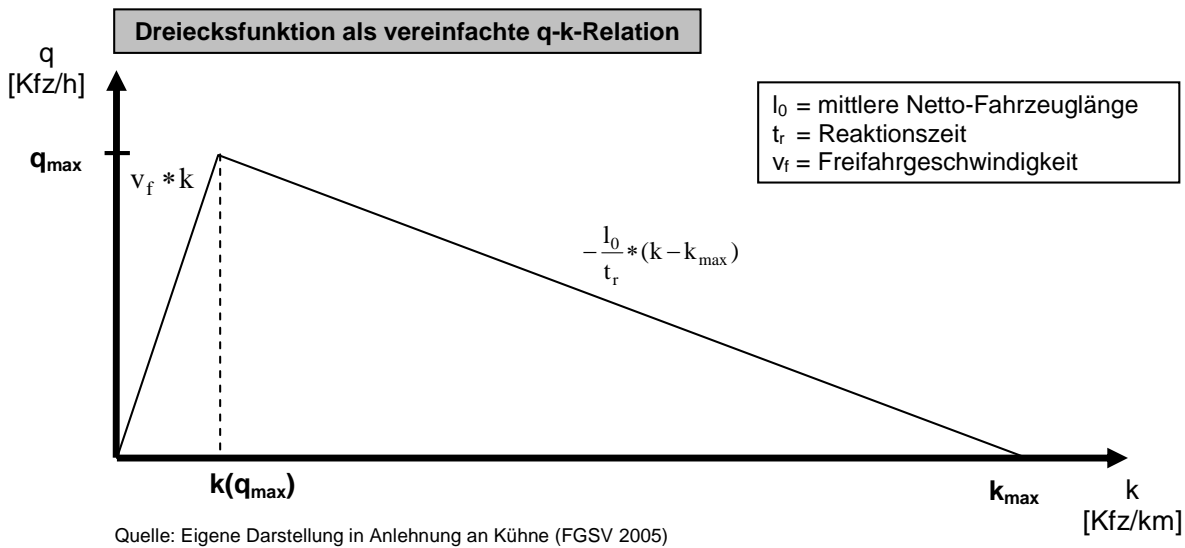


Abbildung 9-8: Dreiecksfunktion als vereinfachte q-k-Relation

Abbildung 9-8 zeigt die Dreiecksfunktion als vereinfachte q-k-Relation. Die linke Dreiecksseite beschreibt dabei den freien Verkehrszustand über die Geradengleichung

$$q = v_f \cdot k \quad (9.1)$$

mit:

- q = Verkehrsstärke
- v_f = freie Geschwindigkeit (konstant)
- k = Verkehrsdichte

Die rechte Dreiecksseite repräsentiert den gestörten Verkehrszustand über die Geradengleichung

$$q = -\frac{l_0}{t_r} \cdot (k - k_{\max}) \quad (9.2)$$

mit:

- l = l₀ + v · t_r
- k = $\frac{1}{l}$
- k_{max} = $\frac{1}{l_0}$

l	=	Mittlere Brutto-Fahrzeuglänge
l_0	=	Mittlere Netto-Fahrzeuglänge
k	=	Verkehrsdichte
k_{\max}	=	Maximale Verkehrsdichte
q	=	Verkehrsstärke
t_r	=	Reaktionszeit

- Unter der Brutto-Fahrzeuglänge l wird hier der Fahrzeugplatzbedarf inklusive Reaktionsweg verstanden.
- Unter der Netto-Fahrzeuglänge l_0 wird hier der Fahrzeugplatzbedarf ohne Reaktionsweg verstanden.
- Die mittlere Brutto-Fahrzeuglänge wird hier nach der Mindestabstandsformel „Tacho-Halbe“ ermittelt.

Um die Dreiecksfunktion zu spezifizieren, müssen Annahmen für die mittlere Netto-Fahrzeuglänge l_0 , die Freifahrtgeschwindigkeit v_f sowie die Reaktionszeit t_r getroffen werden.

Die mittlere Netto-Fahrzeuglänge l_0 variiert und ist abhängig von der Zusammensetzung des jeweils herrschenden Fahrzeugkollektivs. In den folgenden Beispielen werden zu deren Bestimmung die Fahrzeuge, die den Betrachtungsabschnitt im Betrachtungsintervall passieren, den beiden Fahrzeugklassen „Pkw-ähnliche“ und „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge zugeordnet und ein mittlerer Fahrzeugklassenanteil berechnet. Über die angenommenen mittleren Fahrzeuglängen der beiden Klassen ergibt sich so die mittlere Fahrzeuglänge für das gesamte Fahrzeugkollektiv im jeweiligen Betrachtungszeitraum (vgl. Formel 9.3)

$$l_0 = A_{\text{Pkw}} \cdot l_{0\text{Pkw}} + A_{\text{Lkw}} \cdot l_{0\text{Lkw}} \quad (9.3)$$

mit:

l_0	=	Mittlere Netto-Fahrzeuglänge (Kollektiv)
$l_{0\text{Pkw}}$	=	Mittlere Netto-Fahrzeuglänge Pkw
$l_{0\text{Lkw}}$	=	Mittlere Netto-Fahrzeuglänge Lkw
A_{Pkw}	=	%-Anteil der Pkw-ähnlichen Fahrzeuge
A_{Lkw}	=	%-Anteil der Lkw-ähnlichen Fahrzeuge

Als mittlere Netto-Fahrzeuglänge wird für die Klasse der „Pkw-ähnlichen“ Fahrzeuge 5,5 m, für die Klasse der „Lkw-ähnlichen“ Fahrzeuge 18,625 m angenommen. Zu beachten ist, dass beide Werte nicht die reine mittlere Netto-Fahrzeuglänge darstellen. Da über die reziproke mittlere Netto-Fahrzeuglänge (Kollektiv) l_0 die maximale Verkehrsdichte k_{\max} berechnet wird

(vgl. Formel 9.4), die Fahrzeuge jedoch auch im dichten Stau nicht Stoßstange an Stoßstange stehen, werden die mittleren Netto-Fahrzeuglängen (4,5 und 17,625m) jeweils um 1 m vergrößert.

$$k_{\max} = \frac{1}{l_0} \quad (9.4)$$

mit:

$$\begin{aligned} k_{\max} &= \text{Maximale Fahrzeugdichte} \\ l_0 &= \text{Mittlere Netto-Fahrzeuglänge (Kollektiv)} \end{aligned}$$

Die Freifahrtgeschwindigkeit v_f wird ebenfalls aus den Messwerten für den jeweiligen Beispielfall abgeleitet. Dazu werden die gemessenen Geschwindigkeiten während des Betrachtungsintervalls ausgewertet und eine entsprechende Freifahrtgeschwindigkeit v_f ermittelt. Aufgrund der Besonderheit, dass die Messwerte der Datenbasis im Bereich einer Streckenbeeinflussungsanlage mit Wechselverkehrszeichen erhoben wurden, kann die Freifahrtgeschwindigkeit variieren. Ursache dafür ist die sich ändernde geschaltete „zulässige Höchstgeschwindigkeit“.

Für die Reaktionszeit t_r wird ein Wert von 1,5 s gewählt. Dieser Wert wird aus empirischen Messungen abgeleitet und entspricht weitgehend den gängigen Werten aus der Literatur (vgl. [FHS+08], [All07]).

Die Steigung der Dreiecksseite für gestörten Verkehr wird in der Literatur Proportionalitätskonstante P genannt [For05]. Sie entspricht der Stauausbreitungsgeschwindigkeit. Formel 9.5 stellt diese dar.

$$P = -\frac{l_0}{t_r} \quad (9.5)$$

mit:

$$\begin{aligned} P &= \text{Proportionalitätskonstante} \\ l_0 &= \text{Mittlere Fahrzeuglänge} \\ t_r &= \text{Reaktionszeit} \end{aligned}$$

In empirischen Messungen wurde von Kerner eine (mittlere) Stauausbreitungsgeschwindigkeit von 15km/h beobachtet [Ker04]. Mit den in den Beispielen zugrunde gelegten Werten, der mittleren Netto-Fahrzeuglänge l_0 und der Reaktionszeit t_r , ergeben sich in der vorliegenden Arbeit ähnliche große Stauausbreitungsgeschwindigkeiten. Diese sind dabei von der mittleren

Netto-Fahrzeuglänge l_0 abhängig, die ihrerseits vom Lkw-Anteil innerhalb des Fahrzeugkollektivs abhängt.

Eine Optimierung des Staulängenberechnungsverfahrens hinsichtlich der Eingangswerte ist nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

9.5 Dreiecksfunktion – horizontaler Phasensprung

Im Phasensprung zwischen freiem und gestautem Verkehrszustand bewegt sich der Arbeitspunkt modellbedingt (vgl. Folgerung 1, Kapitel 9.3) horizontal von der linken Dreiecksseite für den freien auf die rechte Dreiecksseite für den gestörten Verkehrszustand. Die Verkehrsstärke ist auf beiden Seiten des Phasenübergangs (sowohl im gestörten als auch im freien Verkehrszustand) gleich groß.

Abbildung 9-9 zeigt einen solchen horizontalen Phasensprung in der q - k -Ebene.

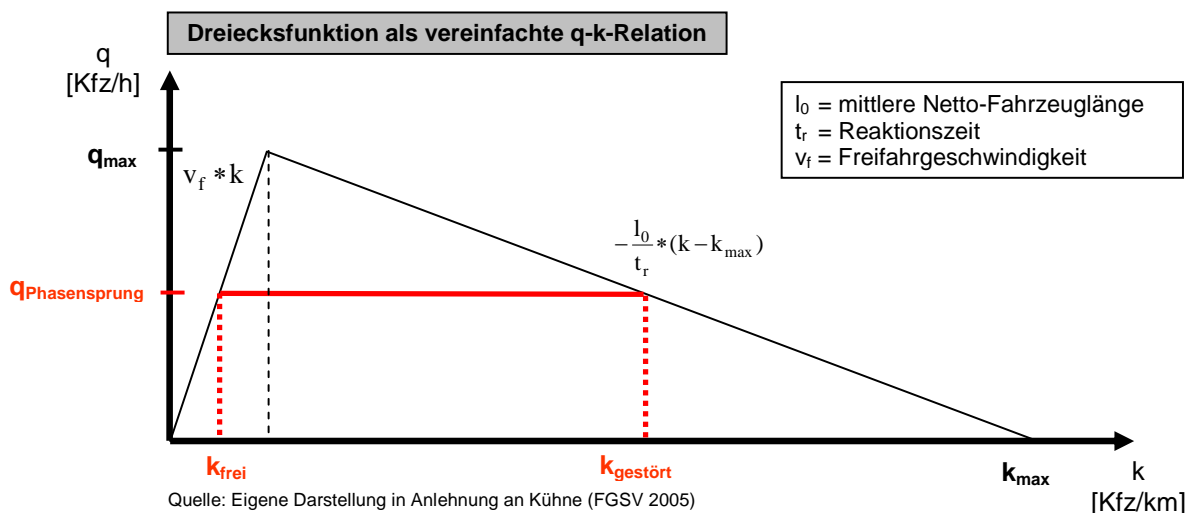


Abbildung 9-9: Horizontaler Phasensprung

Generell ist anzumerken, dass der streckenbezogene Verkehrsablauf für jeden Betrachtungs- und Teilabschnitt als Arbeitspunkt in das Diagramm der Dreiecksfunktion eingezeichnet werden kann. Aufgrund der getroffenen Modellannahme, dass sich in den einzelnen Teilabschnitten nur freie oder gestörte Verkehrszustände ausbilden (vgl. Annahme 2, Kapitel 9.2), befinden sich die Arbeitspunkte der Teilabschnitte immer auf der linken (freier Verkehrszustand) oder aber auf der rechten Seite (gestörter Verkehrszustand) der Dreiecksfunktion. Arbeitspunkte für die Teilabschnitte können der Modellvorstellung folgend niemals innerhalb der Dreiecksfunktion liegen.

Der Verkehrsablauf des gesamten Betrachtungsabschnitts kann sich modellbedingt (vgl. Annahme 2, Kapitel 9.2) aus den Verkehrsabläufen von mehreren Teilabschnitten mit freiem oder gestörtem Verkehrszustand zusammensetzen. Dadurch kann der dazugehörige Arbeitspunkt des Betrachtungsabschnitts sowohl auf den Seiten des Dreiecks als auch innerhalb der Dreiecksfunktion liegen. Liegt der Arbeitspunkt des Betrachtungsabschnitts auf der linken Seite, so herrscht im gesamten Betrachtungsabschnitt ein freier Verkehrszustand (kein Teilabschnitt mit gestörtem Verkehrszustand vorhanden). Liegt der Arbeitspunkt auf der

rechten Seite, so herrscht im gesamten Betrachtungsabschnitt ein gestörter Verkehrszustand (gänzlich gestörter Betrachtungsabschnitt). Liegt der Arbeitspunkt des Betrachtungsabschnitts innerhalb der Dreiecksfunktion, so ist der Verkehrszustand im Betrachtungsabschnitt wenigstens in einem Teilbereich gestört. In diesem Fall setzt sich der Betrachtungsabschnitt sowohl aus Teilabschnitten mit freiem als auch mit gestörtem Verkehrszustand zusammen.

9.6 Ermittlung der Staulängen

Aufbauend auf den zugrunde gelegten Annahmen, den daraus abgeleiteten Folgerungen sowie den gewonnenen Erkenntnissen aus der Störfallanalyse auf Teilabschnittsebene (vgl. Kapitel 9.2 , 9.3 sowie 4.3), wird im Folgenden ein Gleichungssystem zur Staulängenberechnung hergeleitet.

Im Gegensatz zum Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren ist beim Staulängenberechnungsverfahren nicht nur eine zeitliche, sondern ebenfalls eine räumliche Prognose erforderlich. Grundlage für die räumliche Prognose bildet eine detaillierte Analyse des Verkehrsablaufs für den gesamten Betrachtungsabschnitt. Dazu werden sowohl der über den gesamten Betrachtungsabschnitt gemittelte Verkehrsablauf als auch die gemittelten Verkehrsabläufe der einzelnen Teilabschnitte betrachtet und miteinander kombiniert.

Zur weiteren Analyse werden die Verkehrsabläufe für das relevante 2-Bereichsmodell (vgl. Folgerung 4, Kapitel 9.3) in einem „Anzahl der Fahrzeuge-Strecke“- Diagramm abgebildet. Abbildung 9-10 zeigt ein solches Diagramm.

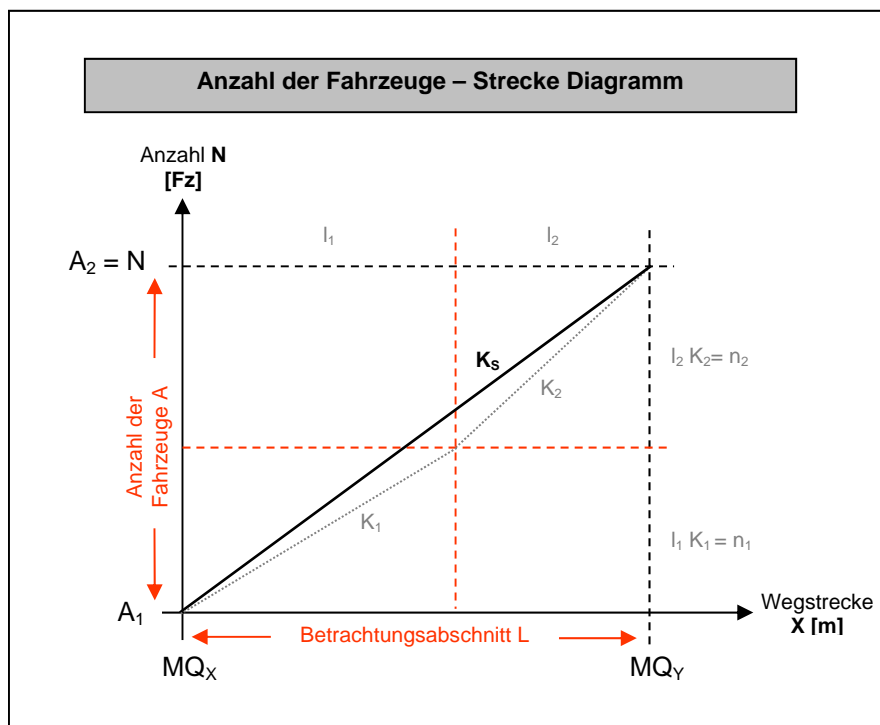


Abbildung 9-10: Anzahl der Fahrzeuge-Strecke Diagramm

Zur Darstellung des über den gesamten Betrachtungsabschnitt gemittelten Verkehrsablaufs im „Anzahl der Fahrzeuge-Strecke“ Diagramm wird auf der Abszisse die Betrachtungsabschnittslänge L und auf der Ordinate die Anzahl der Fahrzeuge in der Strecke N aufgetragen, die sich

im Betrachtungsabschnitt befinden (vgl. Abbildung 9-10). Die mittlere Verkehrsdichte K_S ergibt sich aus dem Quotienten der Anzahl der Fahrzeuge im Betrachtungsabschnitt N und der Betrachtungsabschnittslänge L (schwarze Diagonale). Aussagen über einzelne Teilabschnitte sind bei einer Analyse auf Betrachtungsabschnittsebene nicht möglich.

Um detailliertere Aussagen über den Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt machen zu können, werden zusätzlich die aufsummierten Teilabschnitte als kleinste Betrachtungseinheit eingetragen. Die Betrachtungsabschnittslänge L unterteilt sich für das 2-Bereichsmodell in die Teilabschnittslängen l_1 und l_2 (vgl. Formel 9.6). Für die beiden Teilabschnitte ergeben sich somit die „Anzahl der Fahrzeuge pro Teilabschnitt“ n_1 und n_2 , die sich für den gesamten Betrachtungsabschnitt zur „Anzahl der Fahrzeuge im Betrachtungsabschnitt“ N aufaddieren (vgl. Formel 9.7). Die Anzahl der Fahrzeuge pro Teilabschnitt ergibt sich aus dem Produkt der Teilabschnittslänge und der dazugehörigen Dichte.

$$L = l_1 + l_2 \quad (9.6)$$

$$N = n_1 + n_2 \quad (9.7)$$

mit:

$$n_1 = l_1 \cdot K_1$$

$$n_2 = l_2 \cdot K_2$$

$$L = \text{Betrachtungsabschnittslänge}$$

$$l_{1/2} = \text{Teilabschnittslänge 1 bzw. 2}$$

$$N = \text{Anzahl der Fahrzeuge im Betrachtungsabschnitt}$$

$$n_{1/2} = \text{Anzahl der Fahrzeuge im Teilabschnitt 1 bzw. 2}$$

$$K_{1/2} = \text{Mittlere streckenbezogene Dichte im Teilabschnitt 1 bzw. 2}$$

Zusammenfassend können die verkehrlichen Zusammenhänge in der „Anzahl der Fahrzeuge-Strecke“-Ebene für das 2-Bereichsmodell über zwei Gleichungen ausgedrückt werden (vgl. Formel 9.8 und Formel 9.6).

$$N = l_1 \cdot K_1 + l_2 \cdot K_2 \quad (9.8)$$

mit:

$$N = \text{Anzahl der Fahrzeuge im Betrachtungsabschnitt}$$

$$l_{1/2} = \text{Teilabschnittslänge 1 bzw. 2}$$

$$K_{1/2} = \text{Mittlere streckenbezogene Dichte im Teilabschnitt 1 bzw. 2}$$

Als Eingangsgrößen für die Gleichungen stehen der streckenbezogene Messwert „Anzahl der Fahrzeuge im Betrachtungsabschnitt N“ sowie die „Betrachtungsabschnittslänge L“ zur Verfügung, die der eingesetzten Datenbasis direkt zu entnehmen sind.

Die streckenbezogenen Verkehrsgrößen „Verkehrsdichte K_1 und K_2 “ der einzelnen Teilabschnitte werden als bekannt vorausgesetzt. Die Herleitung ist in Kapitel 9.7 dargestellt. Unbekannt und gesucht sind lediglich die „Längen l_1 und l_2 “ des freien und gestörten Teilabschnitts. Diese lassen sich aus dem umgeformten Gleichungssystem berechnen und ergeben sich zu:

$$l_1 = L - \frac{L \cdot K_1 - N}{K_1 - K_2} \quad (9.9)$$

$$l_2 = \frac{L \cdot K_1 - N}{K_1 - K_2} \quad (9.10)$$

mit:

N	=	Anzahl der Fahrzeuge im Betrachtungsabschnitt
L	=	Betrachtungsabschnittslänge
$l_{1/2}$	=	Teilabschnittslänge 1 bzw. 2
$K_{1/2}$	=	Mittlere streckenbezogene Dichte im Teilabschnitt 1 bzw. 2

9.7 Ermittlung von K_1 und K_2

Die für das Gleichungssystem zur Staulängenberechnung benötigten Eingangsgrößen K_1 und K_2 können entweder über lokale oder aber streckenbezogene Messwerte mit entsprechenden Modellen erzeugt werden. Darüber hinaus besteht theoretisch auch die Möglichkeit, die Verkehrsdichte K_1 und K_2 direkt streckenbezogen zu messen. Dazu müssten am Ein- und Ausgang jedes Teilabschnitts Messwerte erhoben werden. Da die Anzahl der Teilabschnitte sowie die Lage der Ein- und Ausgangsquerschnitte jedoch stark variieren können, ist eine solche Messung nur sehr eingeschränkt möglich und wird im Weiteren vernachlässigt. Die anderen Vorgehensweisen werden nachfolgend kurz dargestellt.

9.7.1 K_1 und K_2 über lokale Messwerte und Extrapolation

Unter der Voraussetzung, dass zusätzlich zu den getroffenen Annahmen und Folgerungen (vgl. Kapitel 9.2 und 9.3) der Betrachtungsabschnitt aus einem zusammenhängend freien und/oder einem gestörten Teilabschnitt besteht, können K_1 und K_2 über lokale Messwerte und Modelle ermittelt werden.

In diesem Fall liegt entweder ein Grenzfall des 2-Bereichsmodells, ein gänzlich freier Betrachtungsabschnitt (1-Bereichsmodell mit freiem Verkehrszustand) bzw. ein gänzlich

gestörter Betrachtungsabschnitt (1-Bereichsmodell mit gestörtem Verkehrszustand), oder aber ein 2-Bereichsmodell mit genau zwei zusammenhängenden Teilabschnitten (frei und gestört) vor. Bei den 1-Bereichsmodellen wird modellbedingt angenommen, dass am Ein- und Ausgangsquerschnitt des Betrachtungsabschnitts der gleiche Verkehrszustand herrscht (vgl. Bereichsmodelle in Kapitel 9.3). Dieser kann dort mittels lokaler Messungen erhoben werden. Über den Quotienten aus der gemessenen lokalen Verkehrsstärke und der lokalen Geschwindigkeit ergibt sich die lokale Verkehrsdichte, die aufgrund des angenommenen gleichförmigen Verkehrsablaufs über den gesamten Teilabschnitt zu einer streckenbezogenen Verkehrsdichte K_1 bzw. K_2 extrapoliert werden kann.

Ähnlich verhält es sich beim 2-Bereichsmodell. In diesem Fall werden jedoch am Ein- und Ausgangsquerschnitt unterschiedliche Verkehrszustände modellbedingt angenommen (vgl. Abschnitt Bereichsmodelle Kapitel 9.3). Somit können an einem Querschnitt die lokalen Verkehrsgrößen für den freien und am andern Querschnitt die lokalen Verkehrsgrößen für den gestörten Verkehrszustand ermittelt werden. Analog zum 1-Bereichsmodell ergeben sich dann die streckenbezogenen Verkehrsdichten K_1 und K_2 der Teilabschnitte.

Anzumerken ist, dass lokal gemessene Verkehrsgrößen generell sehr starken Schwankungen unterliegen. Durch die Mittelung über das der Datenbasis zugrunde gelegte Aggregationsintervall von einer Minute werden diese zwar etwas beruhigt, dennoch sind nach wie vor starke Ausschläge zu beobachten (vgl. Kapitel 6.3, Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3). Werden die Mittelungsintervalle vergrößert, so können die Schwankungen der Verkehrsgrößen weiter beruhigt werden. Die resultierenden Ergebnisse werden jedoch träger.

Aufgrund der nur bedingten Anwendbarkeit für wenige Störfallsituationen, deren Vorhandensein zudem nicht sicher erkannt werden kann, und den stark dynamischen Schwankungen der gemessenen lokalen Verkehrswerte wird dieses Vorgehen nicht weiter verfolgt.

9.7.2 K_1 und K_2 über streckenbezogene Messung und Dreiecksfunktion

Ein allgemein gültiges Verfahren zur Generierung der streckenbezogenen Verkehrsdichten K_1 und K_2 für die Teilabschnitte stellt die Kombination aus für den Betrachtungsabschnitt erhobenen streckenbezogenen Verkehrsgrößen und der Dreiecksfunktion dar. Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieses Verfahrens sind lediglich die in Kapitel 9.2 und 9.3 getroffenen Annahmen und Folgerungen.

Folgerung 2 besagt, dass die Verkehrsstärke in den einzelnen Teilabschnitten sowie für den Betrachtungsabschnitt im jeweiligen Betrachtungsintervall gleich groß ist. Somit liegen die Arbeitspunkte für die Teilabschnitte und den Betrachtungsabschnitt in der Dreiecksfunktion alle auf einer Linie parallel zur Abszisse. Zusätzlich liegen die Arbeitspunkte der Teilabschnitte aufgrund der Modellannahme, dass sich nur Teilabschnitte mit freiem und/oder gestörtem Verkehrszustand innerhalb des Betrachtungsabschnitts bilden, auf den beiden Seiten der Dreiecksfunktion. Dies ermöglicht es, die entsprechenden Arbeitspunkte der freien und gestörten Teilabschnitte über den streckenbezogenen Arbeitspunkt des Betrachtungsabschnitts in Kombination mit der Dreiecksfunktion zu erzeugen. Abbildung 9-11 stellt diese grafisch dar.

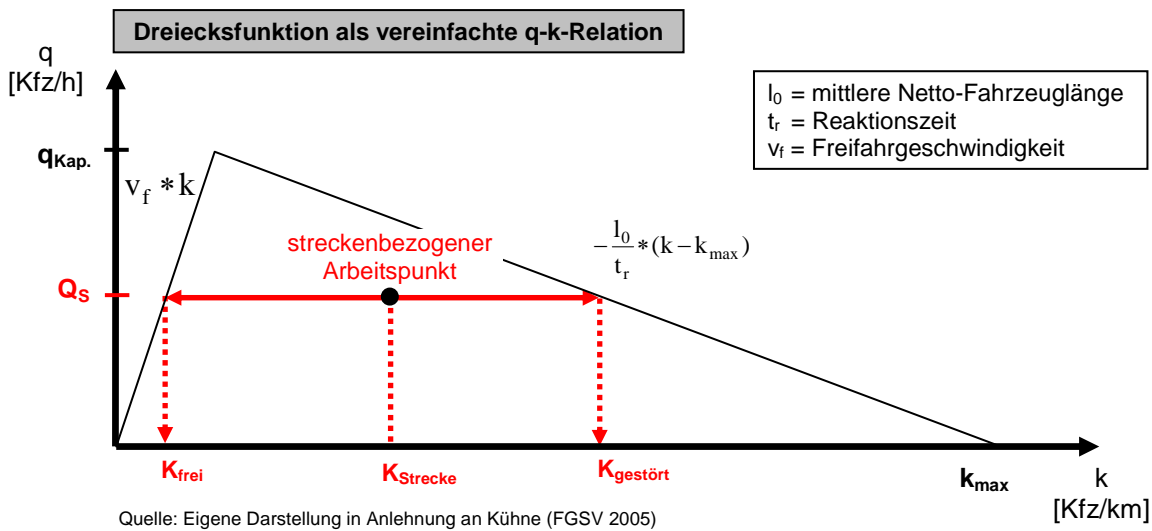


Abbildung 9-11: Herleitung von $K_{\text{frei/gestört}}$ über die Dreiecksfunktion als vereinfachte $q-k$ -Relation

Die Lage des Arbeitspunkts im Betrachtungsabschnitt ergibt sich aus der gemessenen, über den Betrachtungsabschnitt gemittelten „Verkehrsdichte K_S “ (vgl. Formel 9.11) sowie der über die Fundamentalgleichung berechneten streckenbezogenen „Verkehrsstärke Q_S “ (vgl. Formel 9.12).

$$K_S = \frac{N}{L} \quad (9.11)$$

$$Q_S = K_S \cdot V_S \quad (9.12)$$

mit:

- K_S = Mittlere streckenbezogene Verkehrsdichte im Betrachtungsabschnitt
- N = Anzahl der Fahrzeuge im Betrachtungsabschnitt
- L = Länge des Betrachtungsabschnitts
- Q_S = Mittlere streckenbezogene Verkehrsstärke im Betrachtungsabschnitt
- V_S = Mittlere streckenbezogene Reisegeschwindigkeit

Wird nun eine entsprechende horizontale Linie durch den streckenbezogenen Arbeitspunkt gelegt, so ergeben sich zwei Schnittpunkte dieser Linie mit der Dreiecksfunktion (vgl. Abbildung 9-11). Diese Schnittpunkte entsprechen den Arbeitspunkten der freien und gestörten Teilabschnitte.

Über die umgeformten Formeln der Dreiecksfunktion (vgl. Kapitel 9.4, Formel 9.1 und Formel 9.2) ergeben sich die benötigten Verkehrsdichten K_1 bzw. K_{frei} und K_2 bzw. $K_{\text{gestört}}$ zu:

$$K_1 = \frac{Q_S}{v_f} \quad (9.13)$$

und

$$K_2 = k_{\max} - Q_S \frac{t_r}{l_0} \quad (9.14)$$

mit:

Q_S	=	Mittlere streckenbezogene Verkehrsstärke im Betrachtungsabschnitt
v_f	=	freie Geschwindigkeit (konstant)
K_1	=	Verkehrsdichte im freien Teilabschnitt
K_2	=	Verkehrsdichte im gestörten Teilabschnitt
l_0	=	Mittlere Netto-Fahrzeuglänge
t_r	=	Reaktionszeit

Aufgrund der allgemeingültigen Anwendbarkeit für alle Störfallsituationen und der Robustheit der eingesetzten streckenbezogenen Messwerte gegen dynamische Schwankungen im Verkehrsablauf wird dieses Vorgehen im Weiteren angewendet.

9.8 Fallunterscheidung nach Störfallsituation

Für einige Störfallsituationen im Betrachtungsabschnitt können zusätzlich zu der gesamten Staulänge auch noch die Lage des Störfallanfangs bzw. –endes im Betrachtungsabschnitt bestimmt werden. Möglich ist dieses generell beim 1-Bereichsmodell und unter bestimmten Voraussetzungen ebenfalls beim 2-Bereichsmodell. Beim 3- bzw. n-Bereichsmodell ist dieses nicht möglich.

1-Bereichsmodell

Im Falle eines gestörten 1-Bereichsmodells ist der gesamte Betrachtungsabschnitt überstaut (vgl. Kapitel 9.3, Abbildung 9-3). Somit fällt der Stauanfang bzw. das –ende innerhalb des Betrachtungsabschnitts mit dem Ein- bzw. Ausgangsquerschnitt zusammen. Dabei ist es für Stauanfang bzw. –ende im Betrachtungsabschnitt irrelevant, ob sich der Stau noch außerhalb des Abschnitts weiter ausbreitet. Die Staulänge in Bezug auf den Betrachtungsabschnitt ist maximal.

2-Bereichsmodell

Im Falle eines 2-Bereichsmodells und unter der zusätzlichen Annahme, dass es jeweils nur einen zusammenhängenden freien sowie einen gestörten Teilabschnitt im Betrachtungsabschnitt gibt (vgl. Kapitel 9.3, Abbildung 9-4 und Abbildung 9-5), kann der im Betrachtungsabschnitt befindliche Stauanfang bzw. das Stauende ebenfalls bestimmt werden. In diesem Fall hat sich der Störfall entweder am Ein- oder aber am Ausgangsquerschnitt manifestiert. Somit ist bekannt, von wo die berechnete Staulänge abgetragen werden muss. Hieraus ist die Lage des Störfallanfangs bzw. –endes innerhalb des Betrachtungsabschnitts bestimmbar.

9.9 Grenzen der Dreiecksfunktion

Das dem Staulängenberechnungsverfahren zugrunde gelegte Modell, bestehend aus der Dreiecksfunktion und den dazugehörigen Eingangswerten, stellt lediglich eine Näherung zur Beschreibung realer Verkehrsabläufe dar. Der tatsächliche Verkehrsablauf ist zuweilen ungleich komplexer und wird nicht immer hinreichend genau durch das vereinfachende Modell abgebildet.

Je nach tatsächlichem Verkehrsablauf bzw. nach herrschenden Randbedingungen (z.B. reale Freifahrtgeschwindigkeit, Zusammensetzung des Fahrzeugkollektivs, Abstandsverhalten) kann es vorkommen, dass trotz für den Regelfall sinnvoll getroffener Modellannahmen und richtiger Messwerte der streckenbezogene Arbeitspunkt des Betrachtungsabschnitts außerhalb der gewählten Dreiecksfunktion liegt. Da bereits die Seiten der Dreiecksfunktion einen gänzlich freien oder aber gänzlich gestörten Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt darstellen, ist eine Verbesserung bzw. Verschlechterung des Verkehrsablaufs in dieser Funktion nicht mehr darstellbar.

In diesem Falle führt eine Staulängenberechnung über den ursprünglich gewählten Ansatz zu Fehlern. Es bedarf einer Anpassung der Dreiecksfunktion an die dann herrschende Verkehrssituation. Hilfsweise kann aber auch eine Verschiebung des betreffenden streckenbezogenen Arbeitspunktes des Betrachtungsabschnitts vorgenommen werden.

Bei einer Anpassung der Dreiecksfunktion (vgl. Abbildung 9-12) werden die Seiten des Dreiecks so lange verschoben, bis der betrachtete streckenbezogene Arbeitspunkt des Betrachtungsabschnitts sich auf einer Dreiecksseite befindet. Dabei bedeutet eine Anpassung der linken Dreiecksseite (freier Verkehrszustand) eine Veränderung der zugrunde gelegten Freifahrtgeschwindigkeit v_f bzw. der Verkehrsstärke an der Kapazität q_{Kap} . Bei einer Anpassung der rechten Dreiecksseite (gestörter Verkehrszustand) verändert sich die zugrunde gelegte maximale Verkehrsdichte K_{max} bzw. die Proportionalitätskonstante P bestehend aus der mittleren Netto-Fahrzeuglänge l_0 und der Reaktionszeit t_r .

Eine Anpassung der Dreiecksfunktion ist nur dann sinnvoll, wenn die zu den angepassten Dreiecksseiten dazugehörenden verkehrlichen Größen die Realität widerspiegeln. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn die zugrunde gelegte Freifahrtgeschwindigkeit (im Folgenden wird dazu zumeist die geschaltete zulässige Höchstgeschwindigkeit gewählt) höher als die realen Messwerte liegt.

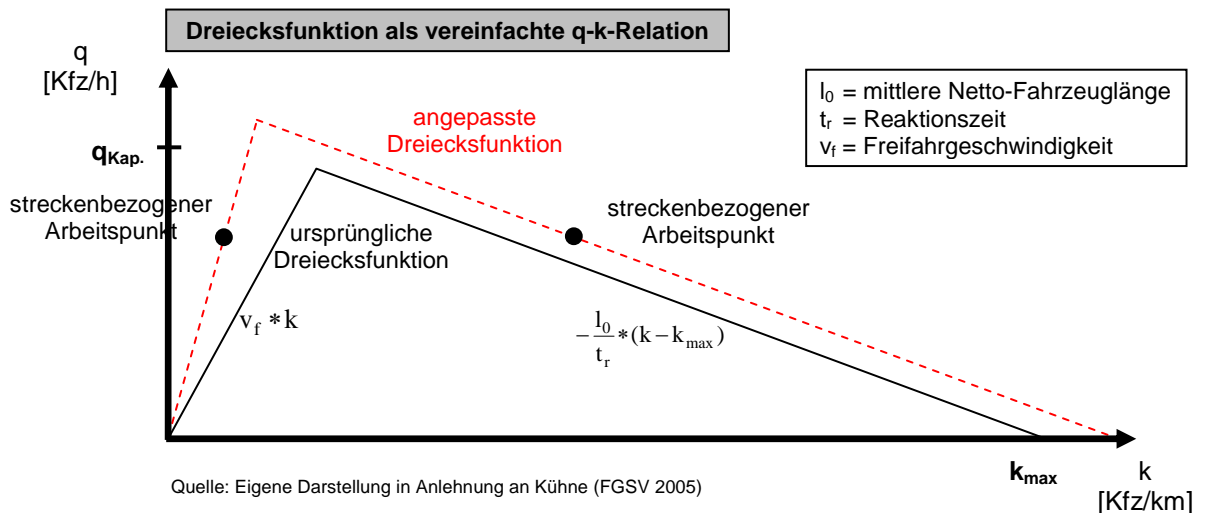


Abbildung 9-12: Anpassung der Dreiecksfunktion

Bei einer Verschiebung des streckenbezogenen Arbeitspunktes (vgl. Abbildung 9-13) wird die ursprüngliche Dreiecksfunktion beibehalten und der betrachtete Arbeitspunkt horizontal auf eine Dreiecksseite verschoben. In diesem Fall werden lediglich einzelne Messwerte für kurze, vom angenommenen regulären Verhalten abweichende, Verkehrsabläufe angepasst.

Eine Verschiebung der streckenbezogenen Arbeitspunkte ist dann sinnvoll, wenn nur vereinzelt Arbeitspunkte außerhalb der Dreiecksfunktion liegen.

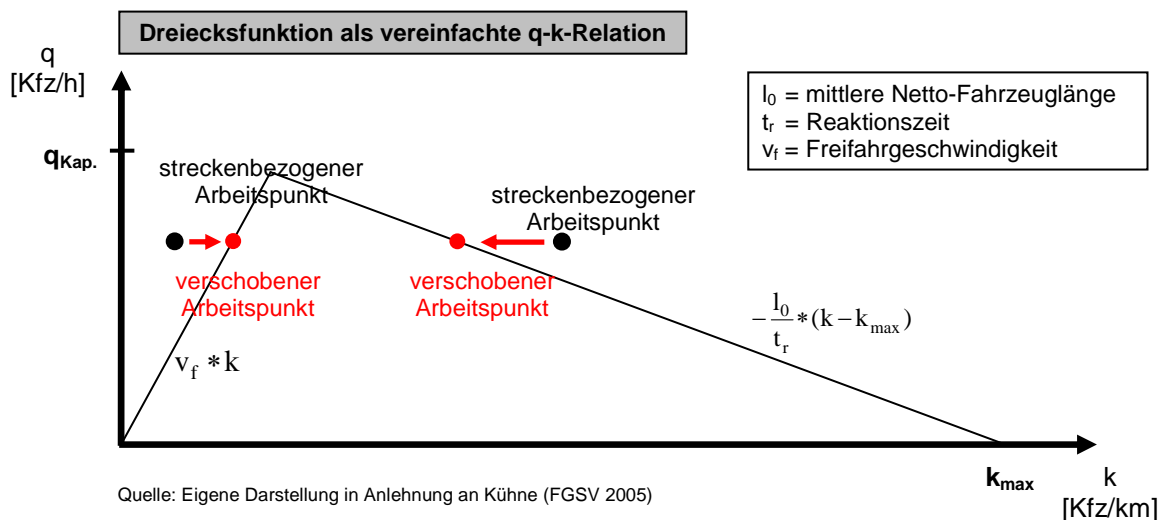


Abbildung 9-13: Verschiebung des streckenbezogenen Arbeitspunktes

Generell ist anzumerken, dass eine exakte Abbildung der Realität mit einem vereinfachenden Modell nicht möglich ist. Da die Arbeitspunkte des Betrachtungsabschnitts, die außerhalb der Dreiecksfunktion liegen, entweder einem gänzlich freien oder gestörten Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt zuzuordnen sind, ist eine Anpassung der Dreiecksfunktion bzw. eine Verschiebung der streckenbezogenen Arbeitspunkte durchaus sinnvoll. Nach der Anpassung bzw. Verschiebung befinden sich diese Arbeitspunkte direkt auf den Seiten der Dreiecksfunktion und werden somit nach wie vor dem gänzlich freien bzw. gestörten Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt zugeordnet.

9.10 Zusammenfassung „Beitrag zur Staulängenberechnung – Theorie“

Im vorangegangenen Kapitel wird ein neuartiges dynamisches Verfahren zur Staulängenberechnung auf Autobahnen vorgestellt. Das Verfahren beruht auf einer Verknüpfung von gemittelten lokalen und streckenbezogenen Verkehrsgrößen, die kollektiv für den Betrachtungsabschnitt erhoben bzw. über Modelle ermittelt werden. Ergebnis des Staulängenberechnungsverfahrens ist die für das gerade in den Betrachtungsabschnitt einfahrende Fahrzeug (Fahrzeugkollektiv) relevante Staulänge. In Abhängigkeit von der vorherrschenden Störfallsituation kann darüber hinaus in einigen Fällen zusätzlich die Lage des Störfalls (Störfallanfang bzw. –ende) im Betrachtungsabschnitt bestimmt werden.

Die resultierenden dynamischen Ergebnisse haben eine zeitlich begrenzte Gültigkeit, die dem Betrachtungsintervall (hier eine Minute) entspricht. Diese Ergebnisse werden fortlaufend neu und unabhängig voneinander ermittelt. Es besteht keine Fehlerfortpflanzung.

Die Basis für das neuartige Staulängenberechnungsverfahren bildet das zugrunde gelegte Verkehrsmodell, eine fundierte Analyse der Verkehrsabläufe im Betrachtungsabschnitt und den Teilabschnitten sowie die Dreiecksfunktion als vereinfachtes Fundamentaldiagramm.

Zunächst werden nur Störfallsituationen betrachtet, bei denen sich maximal drei Teilabschnitte im Betrachtungsabschnitt bilden. Es kann gezeigt werden, dass das hierfür vorgestellte 2-Bereichsmodell unter den getroffenen Modellannahmen auch auf Störfallsituationen mit einer beliebigen Anzahl freier oder gestörter Teilabschnitte verallgemeinert werden kann.

Zur Ermittlung der für das dazugehörige Gleichungssystem benötigten Eingangswerte (Verkehrsdichte der freien und gestörten Teilabschnitte) wird ein Verfahren entwickelt, welches auf der Dreiecksfunktion in Kombination mit streckenbezogenen Verkehrsgrößen des Betrachtungsabschnitts basiert. Dieses Verfahren zeichnet sich durch eine große Robustheit gegen dynamisch stark schwankende Verkehrsabläufe und eine allgemeingültige Anwendbarkeit aus. Es ist ebenfalls unabhängig von der Störfallsituation.

Abschließend wird eine Betrachtung der Grenzen der eingesetzten Dreiecksfunktion durchgeführt.

Das in diesem Kapitel hergeleitete Verfahren zur Staulängenberechnung wird zur Überprüfung seiner Funktion im folgenden Kapitel auf ausgewählte Beispiele des Verkehrsablaufs angewendet.

10 Staulängenberechnungsverfahren – Überprüfung

Ziel: Im Folgenden soll der in Kapitel 0 vorgestellte theoretische Ansatz zur Staulängenberechnung für den eingeschwungenen Verkehrszustand anhand von empirischen Erhebungen überprüft werden. Dazu werden die in Kapitel 5 angeführten Beispiele herangezogen, die ausgesuchte Störfallsituationen mit unterschiedlichen Randbedingungen abdecken.

Mit diesen sollen Einzelanalysen für die ausgesuchten Störfallsituationen durchgeführt werden. Ziel ist es, die generelle Einsatzfähigkeit des Staulängenberechnungsverfahrens sowie den verkehrlichen Nutzen für die Verkehrssicherheit, die Verkehrsqualität und die Energieeffizienz aufzuzeigen.

10.1 Vorgehensweise – Überprüfung des Staulängenberechnungsverfahrens

Grundlagen für die im Weiteren durchgeführte Überprüfung des Staulängenberechnungsverfahrens bilden umfassende Analysen des tatsächlichen Verkehrsablaufs für die ausgewählten Störfallsituationen (vgl. Kapitel 5). Die für die Berechnung der Staulängen gewählten notwendigen Eingangsgrößen, die zusätzlich neben den kontinuierlich erhobenen Messwerten benötigt werden, beruhen dabei auf Modellen und/oder Annahmen (vgl. Kapitel 9.4).

In den Betrachtungszeiträumen werden für die jeweiligen Störfallsituationen mittels des entwickelten Verfahrens Staulängen berechnet, die, aufgetragen über der Zeitachse, als Säulendiagramm dargestellt werden. Den Säulendiagrammen ist sowohl die Länge des gestörten (im Diagramm: „I1“ – lila Säule) als auch die Länge des ungestörten Teilabschnitts (im Diagramm: „I2“ – blaue Säule) im Betrachtungsabschnitt zu entnehmen. Die genaue Lage des Störfalls (Anfang bzw. Ende) jedoch nicht. Eine Bestimmung der Lage des Störfalls ist nach der zugrunde gelegten Modellvorstellung nur möglich, wenn der Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt dem direkten 2-Bereichsmodell zugeordnet werden kann. In diesem Fall ist, im Gegensatz zum aus dem n-Bereichsmodell überführten 2-Bereichsmodell, durch die Überstauung des Ein- bzw. Ausgangsquerschnitts ein „Startpunkt“ der Stauung innerhalb des Betrachtungsabschnitts bekannt. Von diesem „Startpunkt“ aus kann dann die entsprechende Staulänge abgetragen werden. Der dazugehörige Stauanfang bzw. das Stauende im Betrachtungsabschnitt ergibt sich aus diesem und der Staulänge im Betrachtungsabschnitt und kann somit direkt bestimmt werden.

Die für die Beispiele berechneten Staulängen werden analysiert und mit den realen Verkehrsabläufen während der Störfälle verglichen (vgl. Kapitel 5).

Da eine kontinuierliche direkte Ermittlung der realen Staulängen mit den zur Verfügung stehenden Daten nicht möglich ist, wird bei der Analyse der berechneten Staulängen auf indirekte Überprüfungsverfahren zurückgegriffen. Die indirekten Verfahren beziehen sich dabei auf den messbaren Verkehrsablauf, der streckenbezogen für den gesamten Betrachtungsabschnitt und lokal an den einzelnen Messquerschnitten bekannt ist.

In den Beispielfällen, in denen ein Hilfsquerschnitt im jeweiligen Betrachtungsquerschnitt vorhanden ist, stehen dort zusätzliche lokale Messwerte zur Staulängenanalyse zur Verfügung.

10.2 Störfallursache im stromabwärts liegenden Abschnitt

Liegt die Störfallursache für eine Beeinträchtigung des Verkehrsflusses im Betrachtungsabschnitt im stromabwärts liegenden Abschnitt, so wächst der Stau über den Ausgangsquerschnitt in den Betrachtungsabschnitt hinein. Der sich einstellende Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt kann vereinfachend dem direkt eingeschwungenen 2-Bereichsmodell zugeordnet werden, bei dem sich der Störfall (anfänglich) am Ausgangsquerschnitt manifestiert. Der weitere Störfallverlauf kann dazu führen, dass der Störfallanfang in den Betrachtungsabschnitt hineinwandert und somit der Verkehrsablauf am Ausgangsquerschnitt nicht mehr gestört ist.

Als Beispiele werden die bereits in Kapitel 5 vorgestellten Stauphänomene einer im Betrachtungsabschnitt zum Stillstand kommenden Rückstauwelle (Beispiel 1.1), einer Rückstauwelle, die den gesamten Betrachtungsabschnitt durchläuft (Beispiel 1.2), und einer Störung des Verkehrsflusses im gesamten Betrachtungsabschnitt (Beispiel 1.3) herangezogen.

Beispiel 1.1:

Rückstauwelle kommt im Betrachtungsabschnitt zum Stillstand

Betrachtungszeitraum:	ca. 11:20 – 14:00 Uhr
Messtag:	25.02.2007 (Sonntag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-S13 bis MQ-S15
Fahrtrichtung:	Stuttgart
Abschnittslänge:	3,375 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	Hilfsquerschnitt mit Wechselverkehrszeichengeber, Betriebsabfahrt
Sonstige Besonderheiten:	Nässe
Freifahrtgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	125 / 120 km/h
Freifahrtgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen) bei „Nässe“:	100 km/h
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	2,9 %

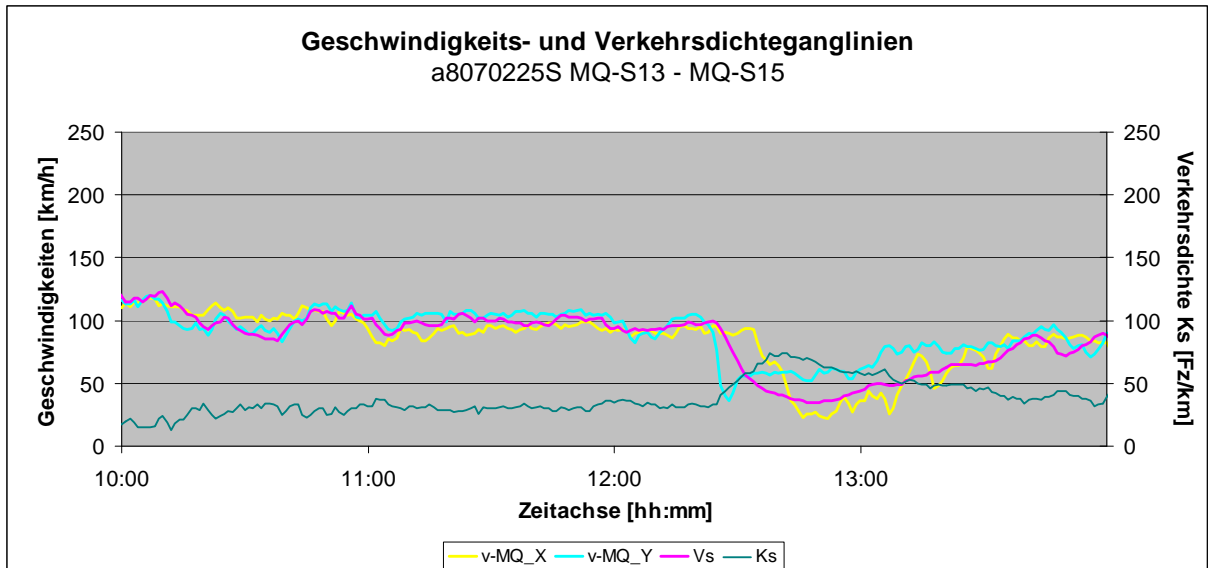


Abbildung 10-1: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 1.1

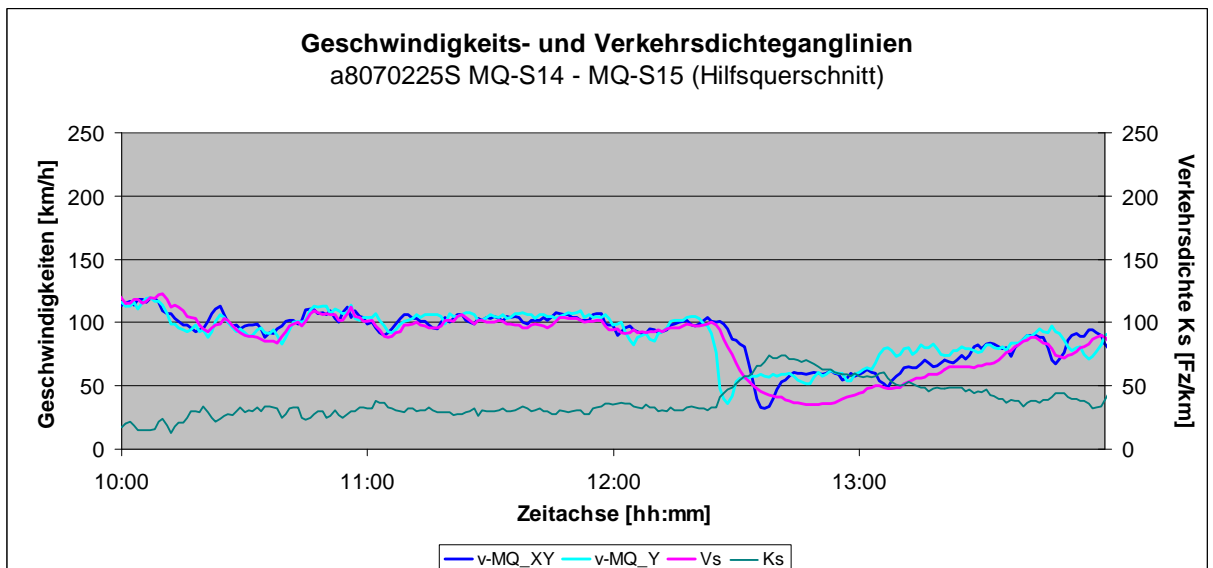


Abbildung 10-2: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 1.1

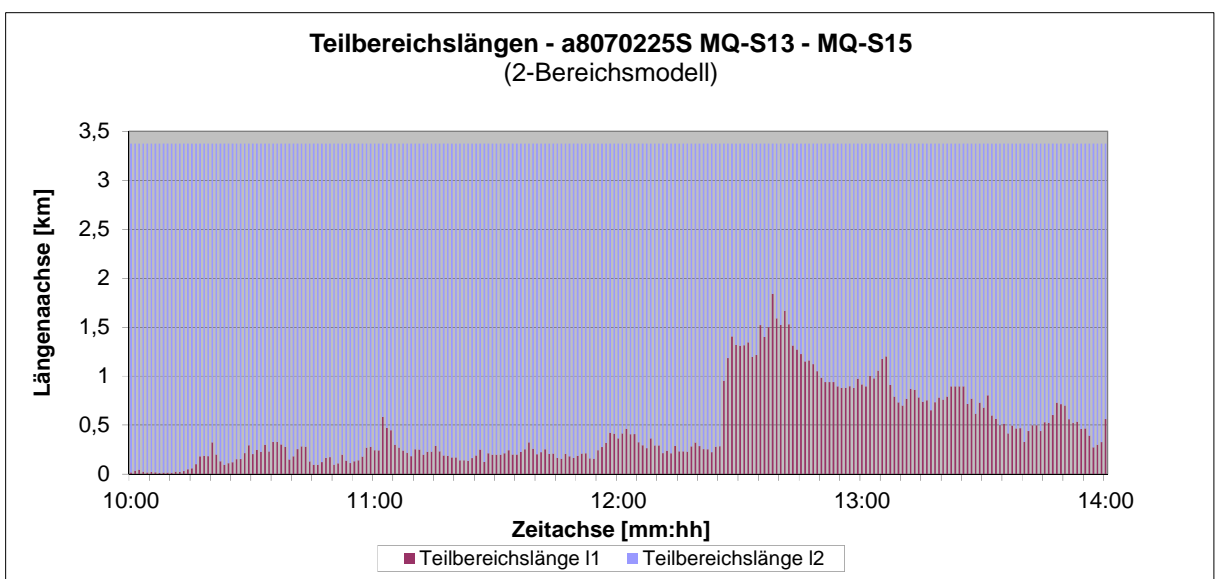


Abbildung 10-3: Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 125 \text{ km/h}$) – Beispiel 1.1

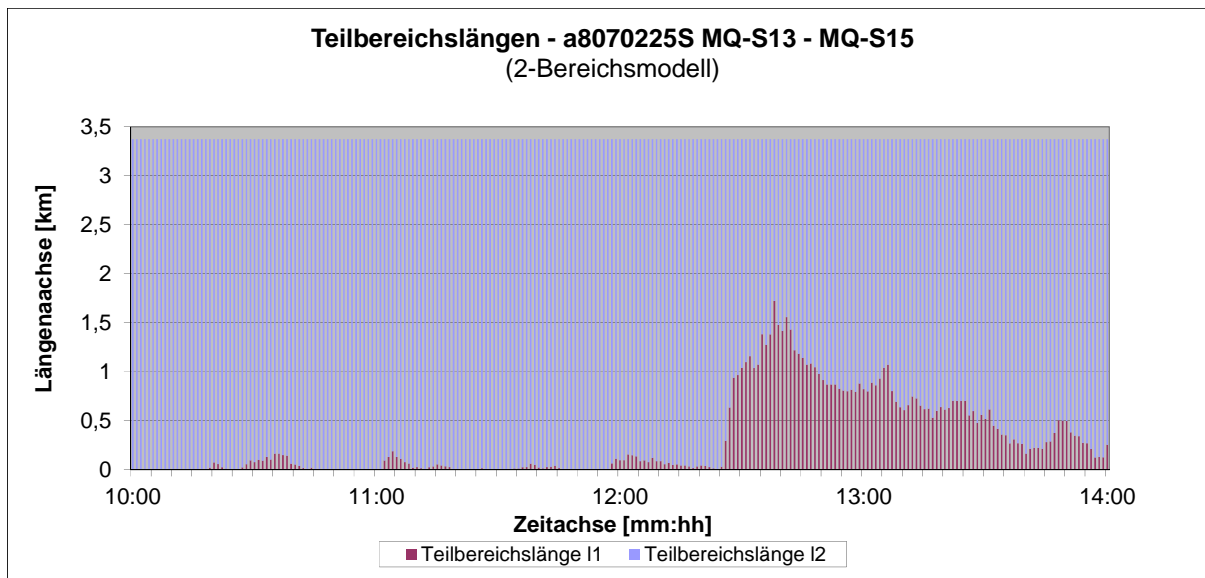


Abbildung 10-4: Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 100 \text{ km/h}$) – Beispiel 1.1

Die für das Beispiel 1.1 berechneten und in Abbildung 10-3 dargestellten Staulängen zeigen einen schnellen Anstieg der Staulängen zu Beginn des Störfalls, gefolgt von einer langsameren Abnahme bei der Störfallauflösung. Der Verlauf der berechneten Staulängen deckt sich weitgehend mit dem aufgrund der Störfallanalyse (vgl. Kapitel 5.2.1) erwarteten Verlauf der Staulängen.

Der schnelle Anstieg der berechneten Staulängen zu Beginn des Störfalls spiegelt sich in den Messwerten im schnellen Anstieg der Verkehrsdichteganglinie und dem starken Einbruch der lokalen Geschwindigkeiten am Ausgangsquerschnitt sowie der Reisegeschwindigkeit V_S wider. Ähnlich verhält es sich bei der Auflösung des Störfalls. Die zu beobachtende langsamere Abnahme der berechneten Staulängen geht mit dem langsameren Abfallen der Verkehrsdichteganglinie und der langsameren Zunahme der lokalen Geschwindigkeit am Ausgangsquerschnitt sowie der Reisegeschwindigkeit V_S einher (vgl. Abbildung 10-1 und Abbildung 10-2).

Auffällig bei der Betrachtung der berechneten Staulängen im Beispiel 1.1 ist, dass schon vor dem eigentlichen Störfallbeginn um 12:20 Uhr Staulängen vorhanden sind. Diese Staulängen sind auf die besonderen Witterungsbedingungen („Nässe“) während dieses Zeitraums zurückzuführen. Wie schon bei den Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren (vgl. Kapitel 8.2) festgestellt wird, beeinflusst „Nässe“ das Fahrverhalten. Der Verkehrsfluss wird homogenisiert, die gefahrenen Geschwindigkeiten liegen mit ca. 100 km/h rund 20 km/h unterhalb der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h. Der Bruttoabstand zwischen den Fahrzeugen vergrößert sich. Das veränderte Fahrverhalten, speziell die verringerte Freifahrtgeschwindigkeit, führt dazu, dass sich das dazugehörige Fundamentaldiagramm ändert.

Eine Verringerung der Freifahrtgeschwindigkeit zeigt sich im vereinfachten Dreiecksdiagramm dadurch, dass die linke Seite flacher geneigt ist. Bei gleichbleibender Verkehrsstärke ergibt sich somit eine größere Verkehrsdichte für den freien Verkehrsfluss (vgl. Kapitel 9.9).

Im vorliegenden Beispiel 1.1 wird in Abbildung 10-3, im Gegensatz zu Abbildung 10-4, die Freifahrtgeschwindigkeit nicht den Witterungsbedingungen angepasst. Die Abweichung zwischen dem zugrunde gelegten Fundamentaldiagramm und dem tatsächlichen Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt führt bei der Staulängenberechnung zu den dargestellten Abweichungen der Staulängen (vgl. Abbildung 10-3 und Abbildung 10-4).

Liegt der streckenbezogene Arbeitspunkt außerhalb der dem Modell zugrunde gelegten Dreiecksfunktion, so sind die gewählten Modellannahmen nicht zutreffend (vgl. Abbildung 9-12). In diesem Fall ist der Arbeitspunkt, je nach Lage, der freien oder gestörten Seite der Dreiecksfunktion zuzuordnen, da sich ansonsten über die Modellformeln physikalisch unmögliche Teilbereichslängen ergeben.

Dass die Witterungsbedingungen zu einer Verdichtung im Betrachtungsabschnitt führen, zeigt sich anhand der Verkehrsdichteganglinie, die zu Beginn der „Nässe“ ansteigt. Der Anstieg der Verkehrsdichteganglinie führt jedoch nicht zu einem massiven Störfall mit entsprechendem Einbruch der Geschwindigkeitsganglinien, sondern (erst einmal nur) zu einer Homogenisierung des Verkehrsablaufs. Es sind nur geringe Schwankungen sowie ein gleichbleibend hohes Niveau bei den Verkehrsdichte- und Geschwindigkeitsganglinien zu beobachten (vgl. Abbildung 10-1 und Abbildung 10-2).

In Beispiel 1.1 liegt zu keinem Zeitpunkt eine vollständige Überstauung des ersten und/oder des zweiten Teilabschnitts vor. Zu den Zeitpunkten, an denen der Ausgangs-, Hilfs- bzw. Eingangsquerschnitt überstaut ist, fließt an den anderen beiden Querschnitten der Verkehr noch bzw. schon wieder. Deshalb ist eine Messung der tatsächlichen Staulänge im Betrachtungszeitraum nicht möglich.

Beispiel 1.2:

Stauwelle durchläuft den Betrachtungsabschnitt

Betrachtungszeitraum:	ca. 17:00 – 18:00 Uhr
Messtag:	30.07.2006 (Sonntag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-S15 bis MQ-S17
Fahrtrichtung:	Stuttgart
Abschnittslänge:	4,770 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	Hilfsquerschnitt mit Wechselverkehrszeichengeber, Parkplatz, Betriebsabfahrt
Sonstige Besonderheiten:	Nässe
Freifahrtgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	120 / 120 km/h

Freifahrtgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen) bei „Nässe“:	100 km/h
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	5,8 %

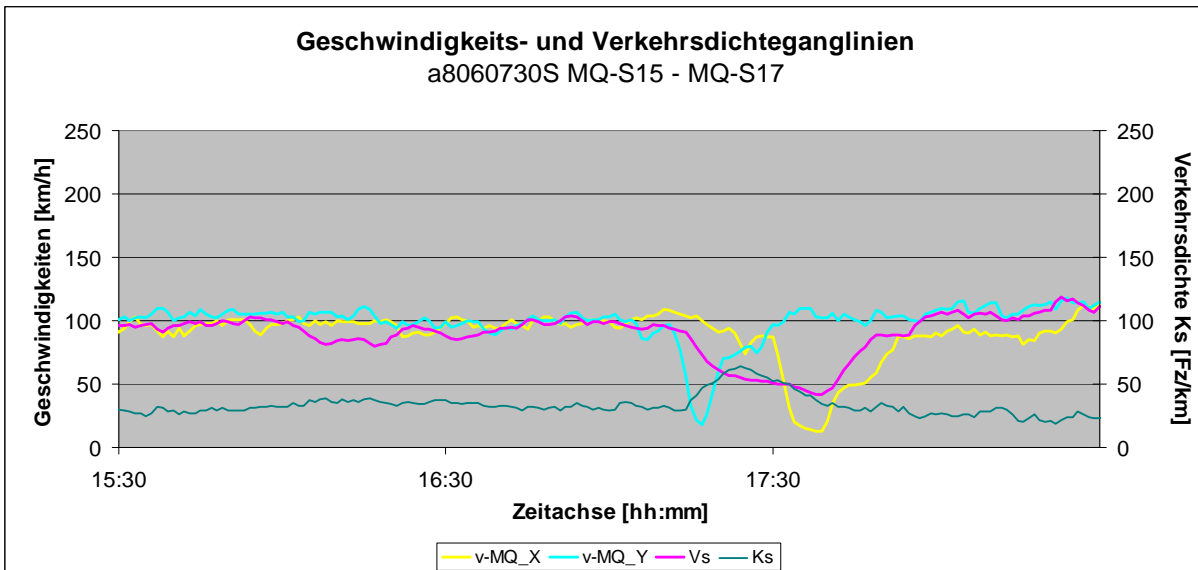


Abbildung 10-5: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 1.2

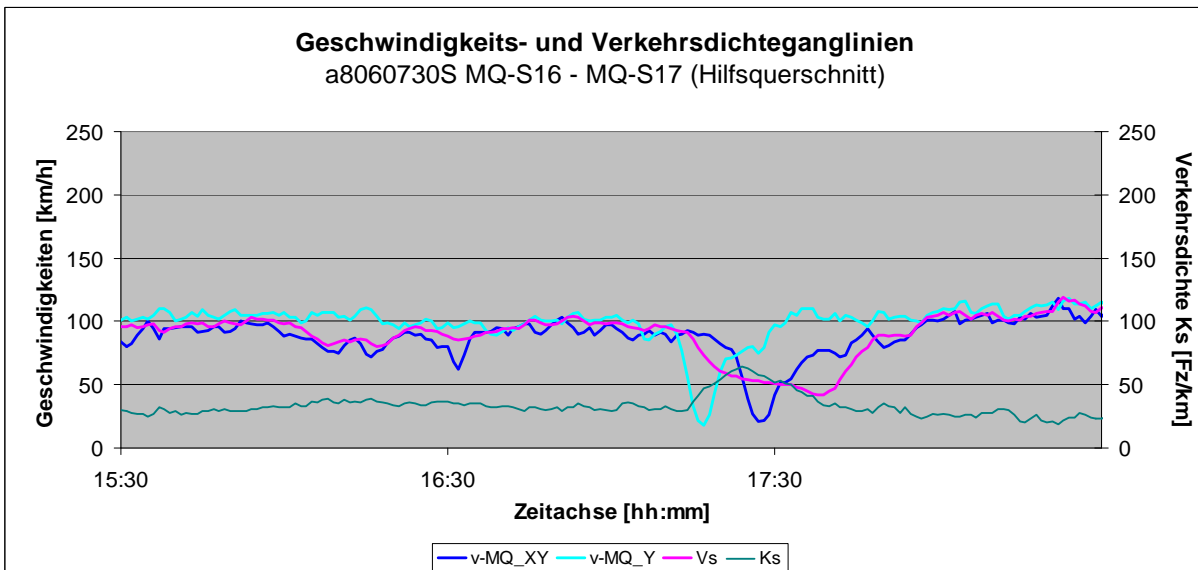


Abbildung 10-6: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 1.2

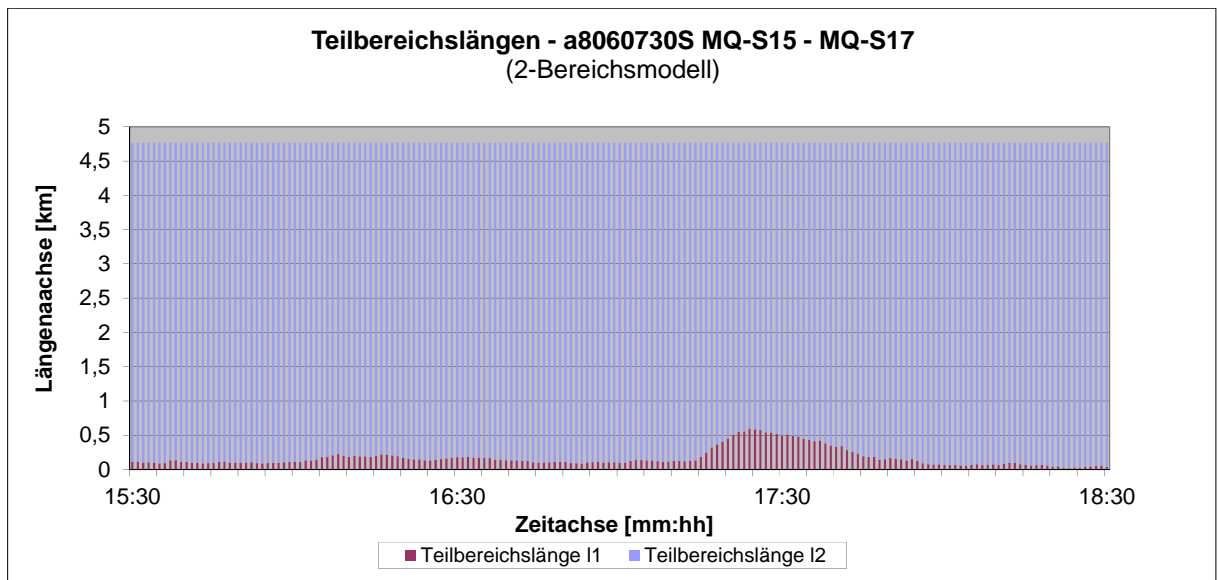


Abbildung 10-7: Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 120 \text{ km/h}$) – Beispiel 1.2

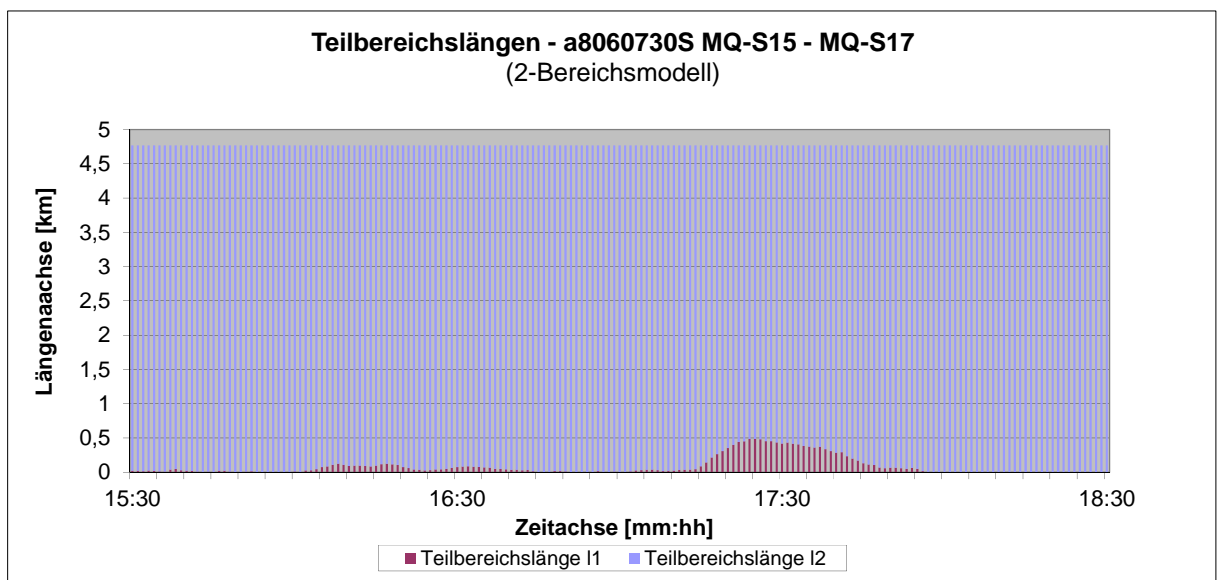


Abbildung 10-8: Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 100 \text{ km/h}$) – Beispiel 1.2

Die für das Beispiel 1.2 berechneten und in Abbildung 10-7 dargestellten Staulängen zeigen einen schnellen Anstieg dieser ab dem Zeitpunkt, an dem die stromaufwärts laufende Stauwelle über den Ausgangsquerschnitt in den Betrachtungsabschnitt hineinläuft. Ab dem Zeitpunkt, zu dem die Stauwelle den Eingangsquerschnitt erreicht hat und den Betrachtungsabschnitt wieder verlässt, ist eine langsamere Abnahme der berechneten Staulängen zu beobachten.

Der Verlauf der berechneten Staulängen deckt sich weitgehend mit dem aufgrund der Störfallanalyse (vgl. Kapitel 5.2.2) erwarteten Verlauf der Staulängen. Der Anstieg der berechneten Staulängen zu Beginn des Störfalls spiegelt sich in den Messwerten im Anstieg der Verkehrsdichteganlinie und dem Einbruch der lokalen Geschwindigkeiten am Ausgangsquerschnitt sowie der Reisegeschwindigkeit wider. Ähnlich verhält es sich bei der Auflösung des Störfalls. Die zu beobachtende langsamere Abnahme der berechneten Staulängen geht mit dem langsameren Abfallen der Verkehrsdichteganlinie und der

langsameren Zunahme der lokalen Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt sowie der Reisegeschwindigkeit einher (vgl. Abbildung 10-5 und Abbildung 10-6).

Auffällig bei der Betrachtung der berechneten Staulängen im Beispiel 1.2 ist, dass schon vor dem eigentlichen Störfallbeginn gegen 17:00 Uhr Staulängen vorhanden sind. Diese Staulängen sind, genau wie in Beispiel 1.1, auf die besonderen Witterungsbedingungen („Nässe“) zurückzuführen, die während dieses Zeitraums herrschen. Auch in Beispiel 1.2 liegt die zulässige Höchstgeschwindigkeit vor dem Störfall bei 120 km/h, die tatsächlich gemessenen Geschwindigkeiten mit rund 100 km/h ca. 20 km/h niedriger. Wird auch hier die dem Modell zugrunde gelegte Dreiecksfunktion angepasst (vgl. Abbildung 9-12), so ergeben sich nur noch Staulängen, die dem betrachteten Störfall selbst bzw. einem kleineren Störfall im Zeitraum zwischen 16:00 und 16:40 Uhr zugeordnet werden können (vgl. Abbildung 10-8).

In Beispiel 1.2 liegt zu keinem Zeitpunkt eine vollständige Überstauung des ersten und/oder des zweiten Teilabschnitts vor. Zu den Zeitpunkten, an denen der Ausgangs-, Hilfs- bzw. Eingangsquerschnitt überstaut ist, fließt an den anderen beiden Querschnitten der Verkehr noch bzw. schon wieder. Deshalb ist eine Messung der tatsächlichen Staulänge im Betrachtungszeitraum nicht möglich.

Beispiel 1.3:

Störung des Verkehrsflusses im gesamten Betrachtungsabschnitt

Betrachtungszeitraum:	ca. 14:15 – 15:15 Uhr
Messtag:	24.02.2007 (Samstag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-S8 bis MQ-S10
Fahrtrichtung:	Stuttgart
Abschnittslänge:	2,900 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	MQ-S8 ist eine Anschlussstelle sowie ein reiner Messquerschnitt, Hilfsquerschnitt MQ-S9 reiner Anzeigenquerschnitt
Sonstige Besonderheiten:	–
Freifahrtgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	125 km/h / frei
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	5,4 %

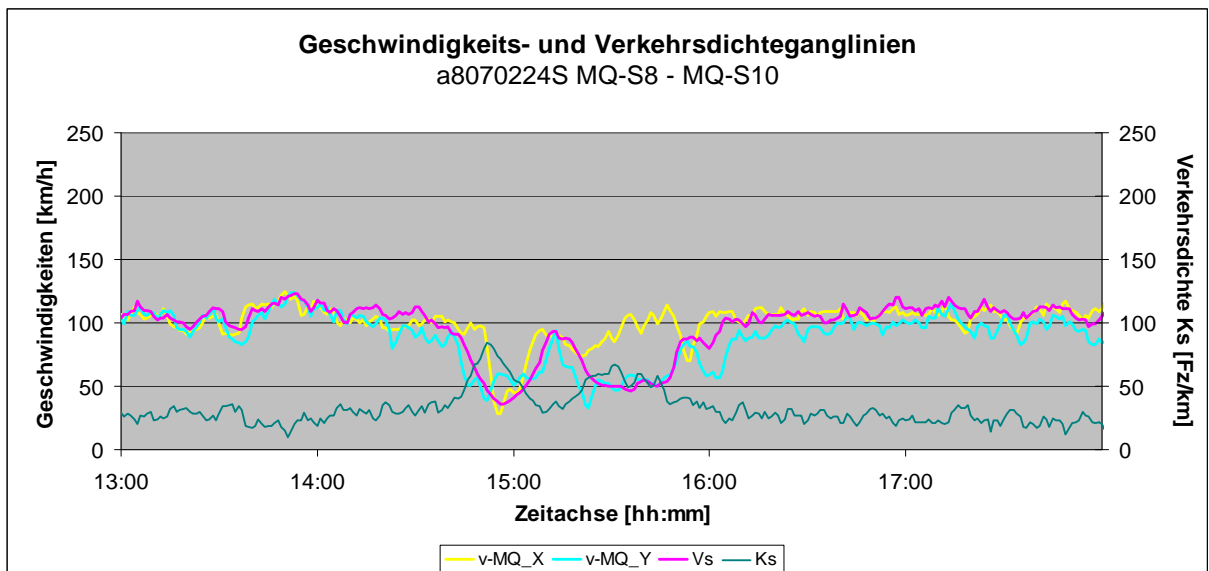


Abbildung 10-9: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 1.3

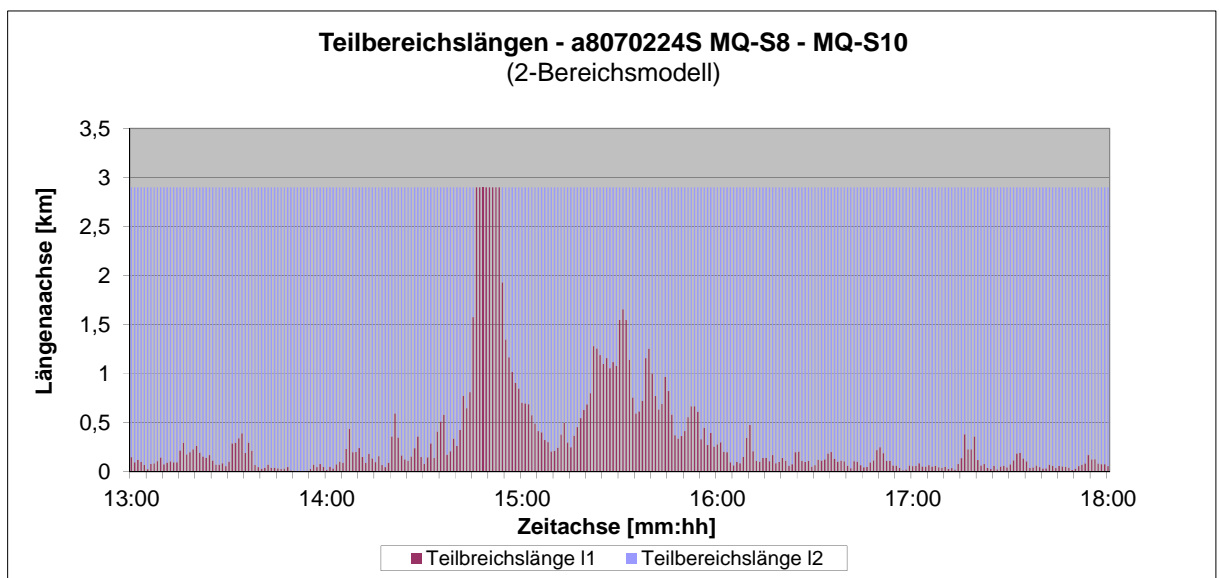


Abbildung 10-10: Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 125 \text{ km/h}$) – Beispiel 1.3

Die für das Beispiel 1.3 berechneten und in Abbildung 10-10 dargestellten Staulängen zeigen einen schnellen Anstieg der Staulängen zu Beginn des Störfalls, gefolgt von einer schnellen Abnahme bei der Störfallauflösung. Der Verlauf der berechneten Staulängen deckt sich weitgehend mit dem aufgrund der Störfallanalyse (vgl. Kapitel 5.2.3) erwarteten Verlauf der Staulängen.

Der schnelle Anstieg der berechneten Staulängen zu Beginn des Störfalls spiegelt sich in den Messwerten im schnellen Anstieg der Verkehrsdichteganglinie und dem ebenfalls starken Einbruch der lokalen Geschwindigkeiten am Aus- und Eingangsquerschnitt sowie der Reisegeschwindigkeit wider. Ähnlich verhält es sich bei der Auflösung des Störfalls. Die zu beobachtende schnelle Abnahme der berechneten Staulängen geht mit dem schnellen Abfallen der Verkehrsdichteganglinie und der schnellen Zunahme der lokalen Geschwindigkeiten am Ein- und Ausgangsquerschnitt sowie der Reisegeschwindigkeit einher (vgl. Abbildung 10-9).

Auffällig bei der Berechnung der Staulängen im Beispiel 1.3 ist, dass während des Störfalls die berechneten Staulängen teilweise länger als die gesamte Betrachtungsabschnittslänge von 2,9 km sind. Ursachen dafür sind das zugrunde gelegte Modell sowie die Lage des entsprechenden streckenbezogenen Arbeitspunktes. In diesen Fällen liegt der streckenbezogene Arbeitspunkt außerhalb der Dreiecksfunktion im gestörten Bereich. Das Staulängenberechnungsverfahren ist hier nicht ohne Weiteres anwendbar. Durch die Verschiebung der entsprechenden Arbeitspunkte auf die gestörte Dreiecksseite wird die maximale Staulänge auf die Betrachtungsabschnittslänge begrenzt (vgl. Kapitel 9.9).

Dies bedeutet für das Beispiel 1.3, dass zu den Zeitpunkten, an denen der streckenbezogene Arbeitspunkt außerhalb der Dreiecksfunktion im gestörten Bereich liegt, für den gesamten Betrachtungsabschnitt ein 1-Bereichsmodell mit gestörtem Verkehrszustand angesetzt wird. Die dazugehörige Staulänge entspricht der gesamten Betrachtungsabschnittslänge (vgl. Abbildung 10-10).

In Beispiel 1.3 kommt es kurzzeitig zu einer vollständigen Überstauung des gesamten Betrachtungsabschnitts. Kurz vor 15:00 Uhr liegen die gemessenen Verkehrsgrößen der lokalen Geschwindigkeiten am Ein- und Ausgangsquerschnitt sowie die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit annähernd zeitgleich auf einem Niveau von nur ca. 40 km/h. Dies bedeutet, dass im gesamten Betrachtungsabschnitt der gleiche gestörte Verkehrszustand vorherrscht (1-Bereichsmodell) und der Verkehr mit nur 40 km/h fließt. Gleichzeitig ist eine sehr hohe gemessene streckenbezogene Verkehrsdichte zu beobachten, die teilweise bei über 80 Fz/km (für zwei Fahrstreifen) liegt. Hier ist eine Messung der tatsächlichen Staulänge im Betrachtungszeitraum möglich. Die Staulänge entspricht der Betrachtungsabschnittslänge.

10.3 Störfallursache liegt im Betrachtungsabschnitt

Liegt die Störfallursache für eine Beeinträchtigung des Verkehrsflusses im Betrachtungsabschnitt selbst, so entspricht der Verkehrsablauf zunächst einem 3-Bereichsmodell. Wächst der Stau im weiteren Störfallverlauf über den Ein- oder Ausgangsquerschnitt, so bildet sich ein direktes 2-Bereichsmodell. Ist dieses (noch) nicht der Fall, so kann das eingeschwungene 3-Bereichsmodell aufgrund der zugrunde gelegten Modellannahmen in ein eingeschwungenes 2-Bereichsmodell überführt werden (vgl. Kapitel 9.3, Folgerung 4).

Die gewählten und aus Kapitel 5 bekannten Beispiele zeigen ein Stauphänomen, bei dem sich der Störfall weder am Ein- noch am Ausgangsquerschnitt manifestiert (Beispiel 2.1), ein Stauphänomen, bei dem sich der Störfall nach längerer Zeit am Eingangsquerschnitt manifestiert (Beispiel 2.2), sowie ein Stauphänomen, bei dem sich der Störfall nach kurzer Zeit am Eingangsquerschnitt manifestiert (Beispiel 2.3).

Beispiel 2.1:

Störfall manifestiert sich weder am Ein- noch am Ausgangsquerschnitt

Betrachtungszeitraum:	ca. 8:50 – 9:45 Uhr
Messtag:	27.07.2006 (Donnerstag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-S22 bis MQ-S24

Fahrtrichtung:	Stuttgart
Abschnittslänge:	3,250 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	Hilfsquerschnitt mit Wechselverkehrszeichengeber, Parkplatz, 2 Betriebsabfahrten
Sonstige Besonderheiten:	–
Freifahrgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	125 km/h / frei
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	22,9 %

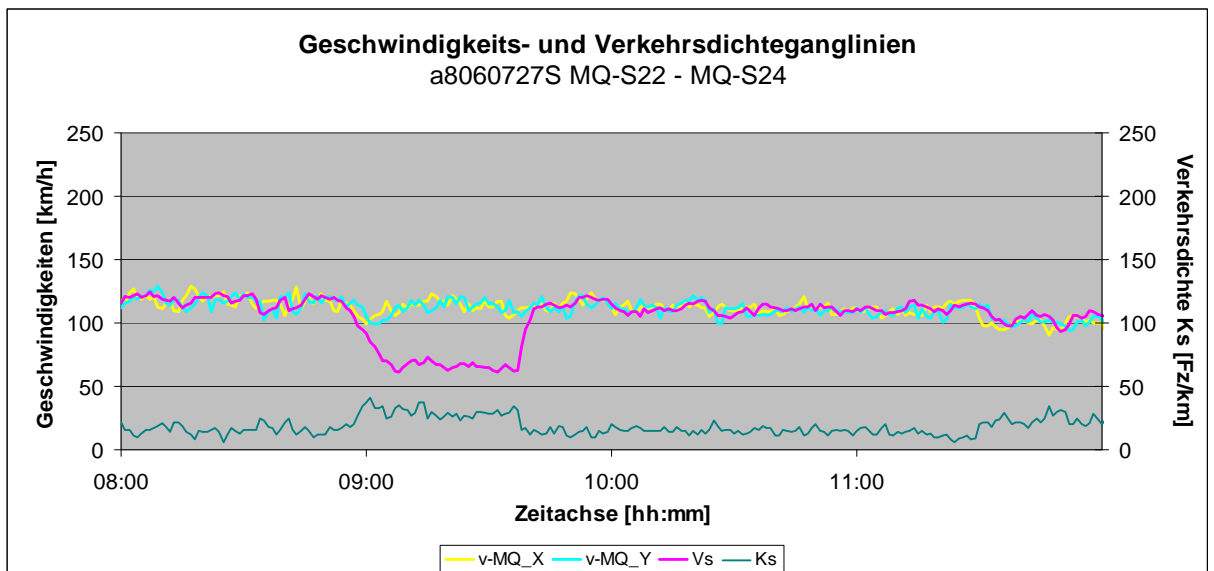


Abbildung 10-11: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichtegangelinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 2.1

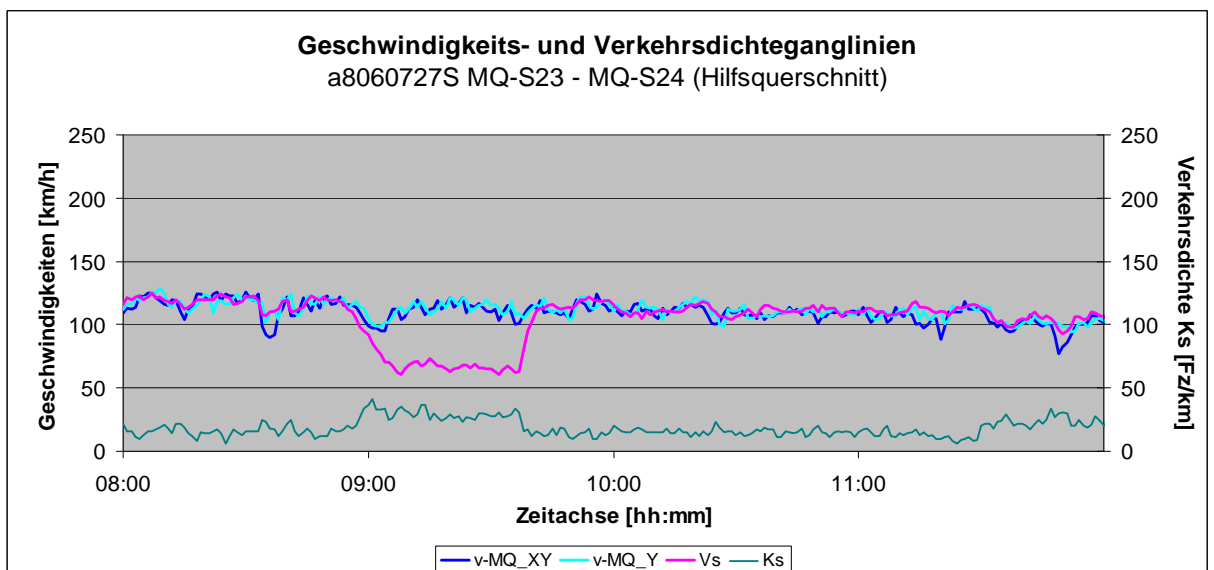


Abbildung 10-12: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichtegangelinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 2.1

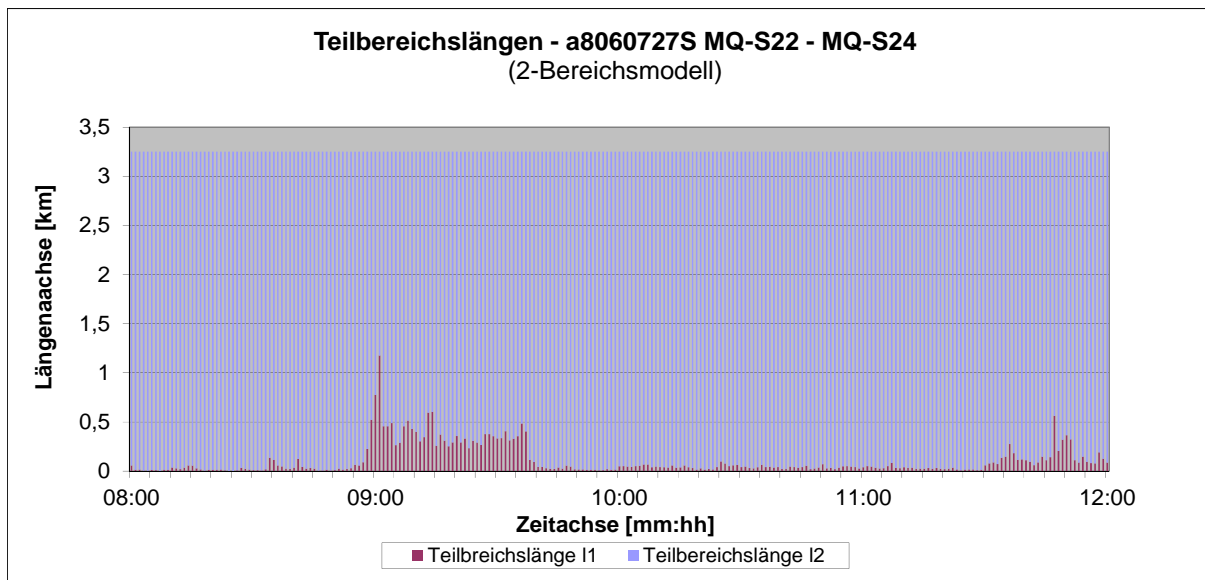


Abbildung 10-13: Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 125 \text{ km/h}$) – Beispiel 2.1

Die für das Beispiel 2.1 berechneten und in Abbildung 10-13 dargestellten Staulängen zeigen einen sprunghaften Anstieg der Staulängen ab dem Zeitpunkt, an dem sich der Störfall im Betrachtungsabschnitt bildet. Im weiteren Verlauf verbleiben die berechneten Staulängen auf einem ähnlichen Niveau. Erst zum Ende des Störfalls ist, ebenfalls sprunghaft, eine Abnahme der berechneten Staulängen zu beobachten.

Der Verlauf der berechneten Staulängen deckt sich weitgehend mit dem aufgrund der Störfallanalyse (vgl. Kapitel 5.3.1) erwarteten Verlauf der Staulängen. Der sprunghafte Anstieg der berechneten Staulängen zu Beginn des Störfalls spiegelt sich in den Messwerten im sprunghaften Anstieg der Verkehrsdichteganlinie und dem starken Einbruch der Reisegeschwindigkeit wider. Ähnlich verhält es sich bei der Auflösung des Störfalls. Die zu beobachtende sprunghafte Abnahme der berechneten Staulängen geht mit einem sprunghaften Abfallen der Verkehrsdichteganlinie und einem schnellen Anstieg der Reisegeschwindigkeit einher (vgl. Abbildung 10-11 und Abbildung 10-12).

In Beispiel 2.1 liegt zu keinem Zeitpunkt eine vollständige Überstauung des ersten und/oder des zweiten Teilabschnitts vor. Der Störfall manifestiert sich weder am lokalen Eingangs-, Hilfs- noch Ausgangsquerschnitt. Deshalb ist eine Messung der tatsächlichen Staulänge im Betrachtungszeitraum nicht möglich.

Beispiel 2.2:

Störfall manifestiert sich nach längerer Zeit am Eingangsquerschnitt

Betrachtungszeitraum:	8:40 – 12:20 Uhr
Messtag:	27.07.2006 (Donnerstag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-S15 bis MQ-S17
Fahrtrichtung:	Stuttgart

Abschnittslänge:	4,770 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	Hilfsquerschnitt mit Wechselverkehrszeichengeber (nach 2,1 km), Parkplatz, Betriebsabfahrt
Sonstige Besonderheiten:	Baustelle
Freifahrgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	125 km/h / frei
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	22,4 %

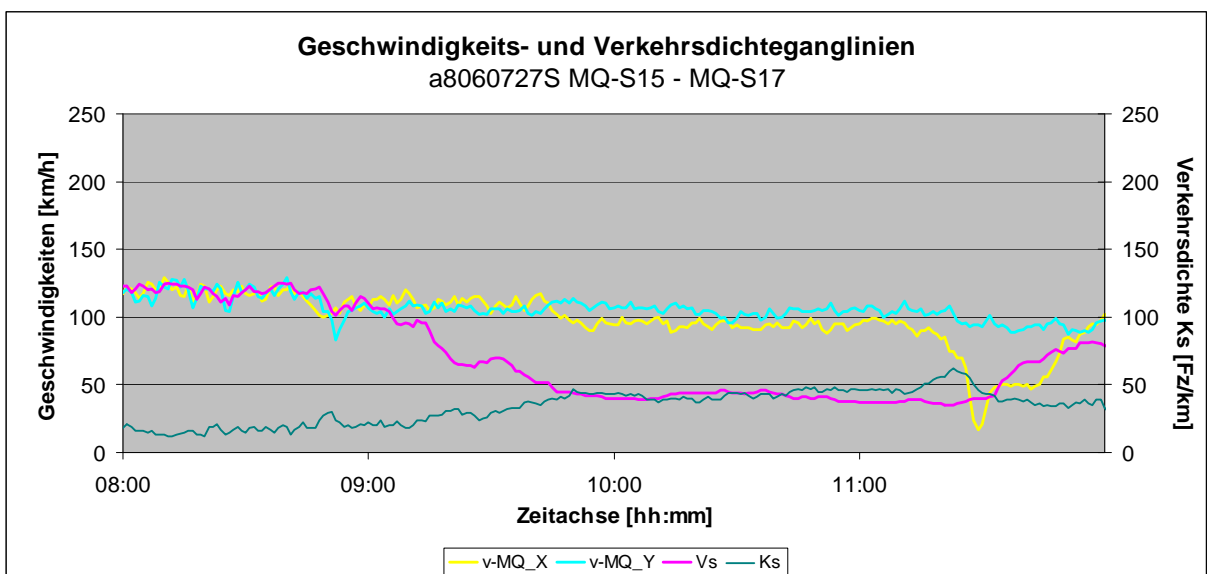


Abbildung 10-14: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 2.2

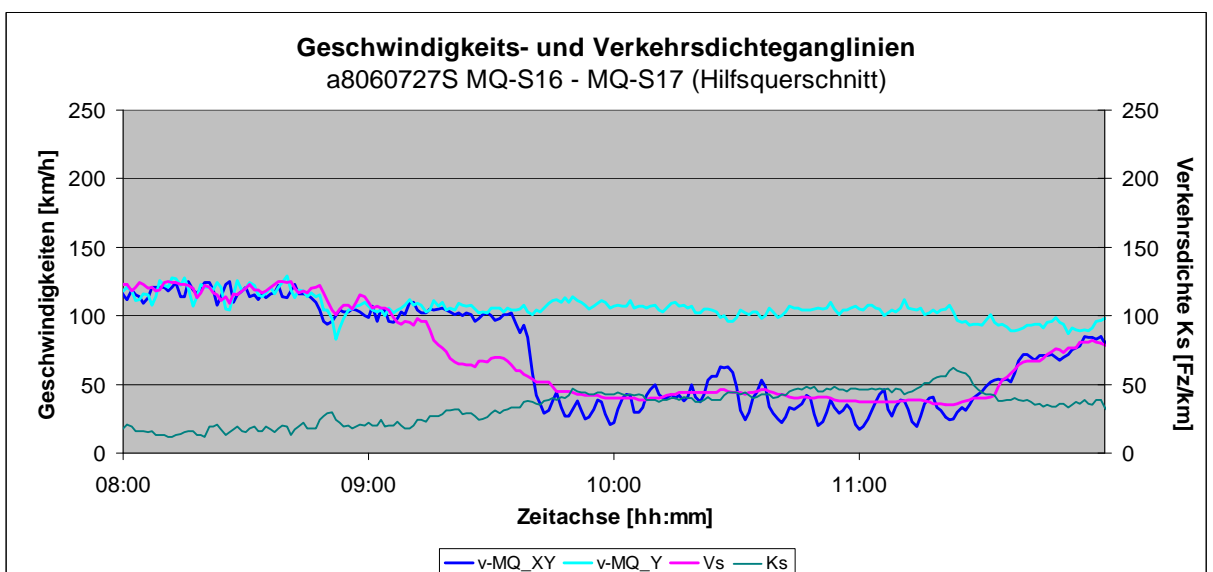


Abbildung 10-15: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 2.2

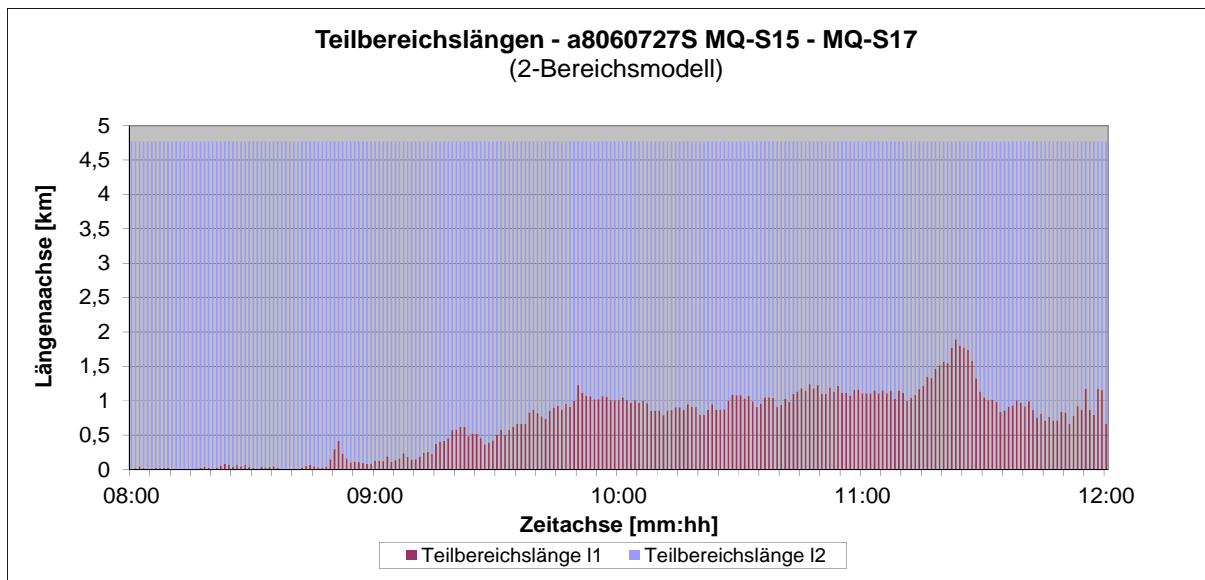


Abbildung 10-16: Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 125 \text{ km/h}$) – Beispiel 2.2

Die für das Beispiel 2.2 berechneten und in Abbildung 10-16 dargestellten Staulängen zeigen einen langsamen Anstieg der Staulängen ab dem Zeitpunkt, an dem sich der Störfall im Betrachtungsabschnitt bildet. Im weiteren Verlauf wachsen die berechneten Staulängen an und verbleiben dann für einen längeren Zeitraum auf einem ähnlichen Niveau. Nach ca. 1,5 Stunden kommt es zu einem erneuten, starken Anstieg der Staulängen, gefolgt von einer zunächst schnellen, im weiteren Verlauf dann langsamen Abnahme der berechneten Staulängen.

Der Verlauf der berechneten Staulängen deckt sich weitgehend mit dem aufgrund der Störfallanalyse (vgl. Kapitel 5.3.2) erwarteten Verlauf der Staulängen.

Der langsame Anstieg der berechneten Staulängen zu Beginn des Störfalls spiegelt sich in den Messwerten im langsamen Anstieg der Verkehrsdichteganglinie und dem langsamen Einbruch der Reisegeschwindigkeit wider. Während der Zeitspanne, in der die berechnete Staulänge gleichbleibend ist, verbleiben sowohl die streckenbezogene Verkehrsdichteganglinie als auch die streckenbezogene Reisegeschwindigkeit ebenfalls auf einem gleichbleibend hohen bzw. niedrigen Niveau. Zu dem Zeitpunkt, an dem die Staulängen erneut anwachsen, steigt ebenfalls die Verkehrsdichteganglinie erneut an. Es kommt zu einer Überstauung des Eingangsquerschnitts. Bei der Auflösung des Störfalls geht die zuerst schnelle, später dann langsamere Abnahme der Staulängen mit einem zuerst schnellen und dann langsameren Abfallen der Verkehrsdichteganglinie einher. Gleichzeitig ist zunächst eine schnelle, später dann eine langsamere Zunahme der lokalen Geschwindigkeiten am Eingangs- und Hilfsquerschnitt sowie der streckenbezogenen Reisegeschwindigkeit zu beobachten (vgl. Abbildung 10-14 und Abbildung 10-15).

Auffällig bei der Betrachtung der berechneten Staulängen im Beispiel 2.2 ist, dass zum Ende des Betrachtungszeitraums in Abbildung 10-16 immer noch eine berechnete Staulänge zu beobachten ist. Dies hängt wahrscheinlich damit zusammen, dass sich dem betrachteten Störfall direkt ein erneuter Störfall anschließt und der erste Störfall zum Ende des Betrachtungsintervalls noch nicht vollständig aufgelöst ist. Gestützt wird diese Annahme

durch die lokalen und streckenbezogenen Messwerte. Zum Ende des Betrachtungszeitraums ist eine noch relativ hohe streckenbezogene Verkehrsdichte zu beobachten. Zusätzlich liegen die gemessenen lokalen und streckenbezogenen Geschwindigkeiten nur annähernd auf demselben Niveau, welches nicht ganz dem freien Ausgangsniveau vor dem Störfall entspricht.

In Beispiel 2.2 liegt kurz vor 11:30 Uhr eine annähernd vollständige Überstauung des ersten Teilabschnitts vor. Innerhalb einer kurzen Zeitspanne sind zuerst am Hilfs-, dann am Eingangsquerschnitt annähernd gleiche, sehr niedrige lokale Geschwindigkeiten zu beobachten. Zeitgleich liegen die streckenbezogenen Reisegeschwindigkeiten auf einem nur geringfügig höheren Niveau, und es herrscht eine hohe Verkehrsdichte. Zu diesem Zeitpunkt herrscht im Betrachtungsabschnitt annähernd ein homogener gestörter Verkehrszustand (1-Bereichsmodell). Hier ist eine Messung der tatsächlichen Staulänge im Betrachtungszeitraum möglich. Die Staulänge entspricht annähernd der Betrachtungsabschnittslänge. Die berechneten Staulängen sind mit rund 1,9 km nur geringfügig kleiner als die Teilabschnittslänge von 2,1 km (vgl. Abbildung 10-16).

Beispiel 2.3:

Störfall manifestiert sich nach kurzer Zeit am Eingangsquerschnitt

Betrachtungszeitraum:	9:10 – 10:10 Uhr
Messtag:	13.01.2007 (Samstag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-M14 bis MQ-M16
Fahrtrichtung:	München
Abschnittslänge:	3,725 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	Hilfsquerschnitt mit Wechselverkehrszeichengeber
Sonstige Besonderheiten:	–
Freifahrgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	teilweise über 130 km/h / frei
Freifahrgeschwindigkeit nach dem Störfall (gemessen/zulässig):	zeitweise 100 / schwankend 100 km/h bis frei
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	6,1 %

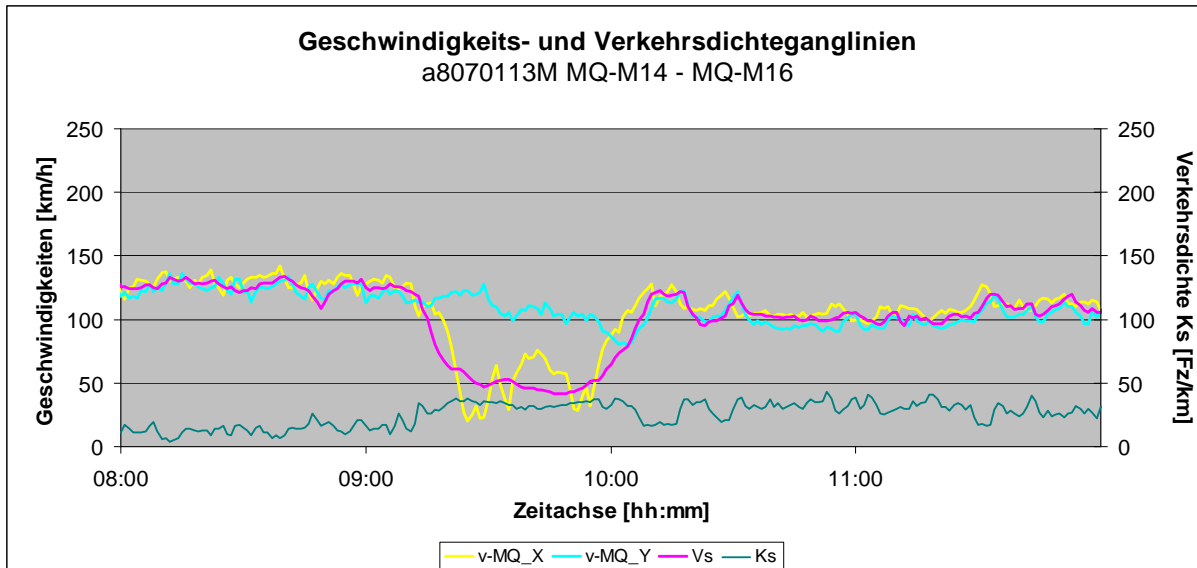


Abbildung 10-17: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 2.3

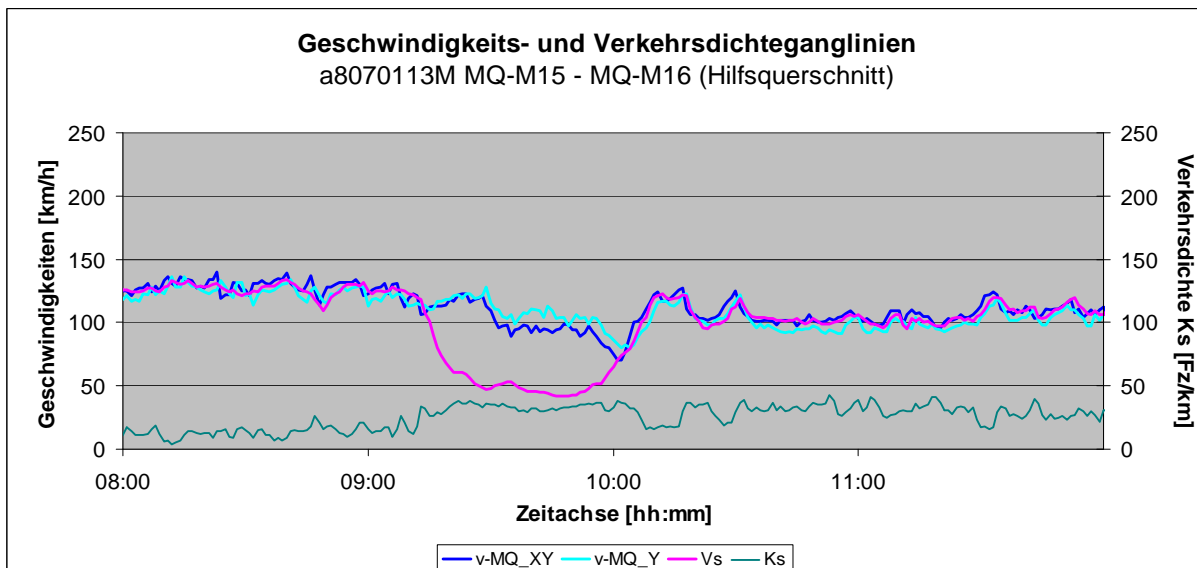


Abbildung 10-18: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Hilfsquerschnitt) – Beispiel 2.3

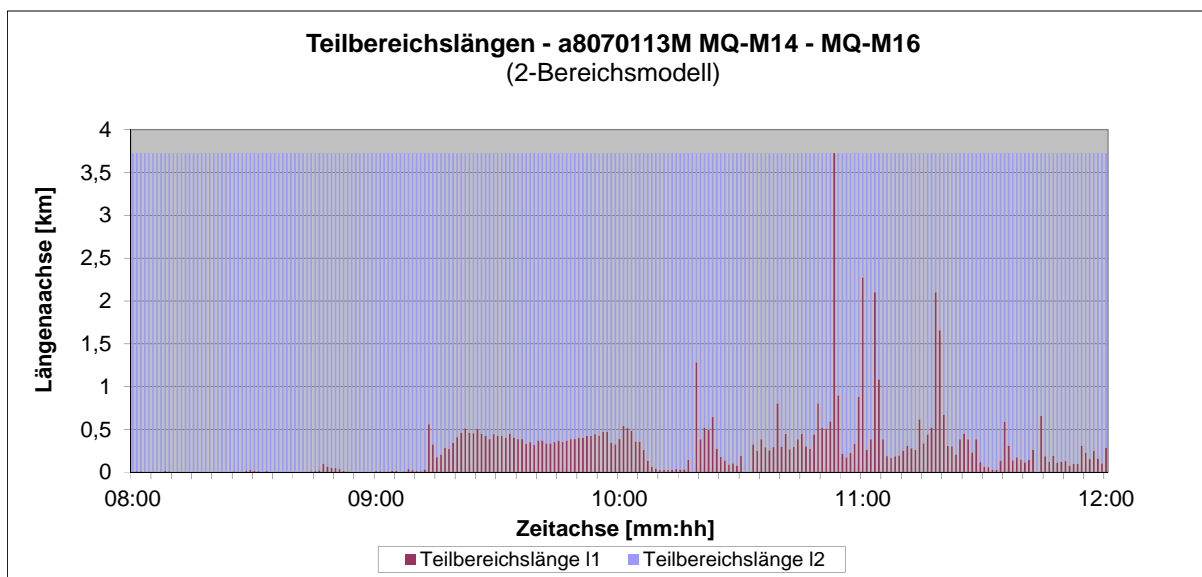


Abbildung 10-19: Teilbereichslängen ($v_{frei} = 130 \text{ km/h}$) – Beispiel 2.3

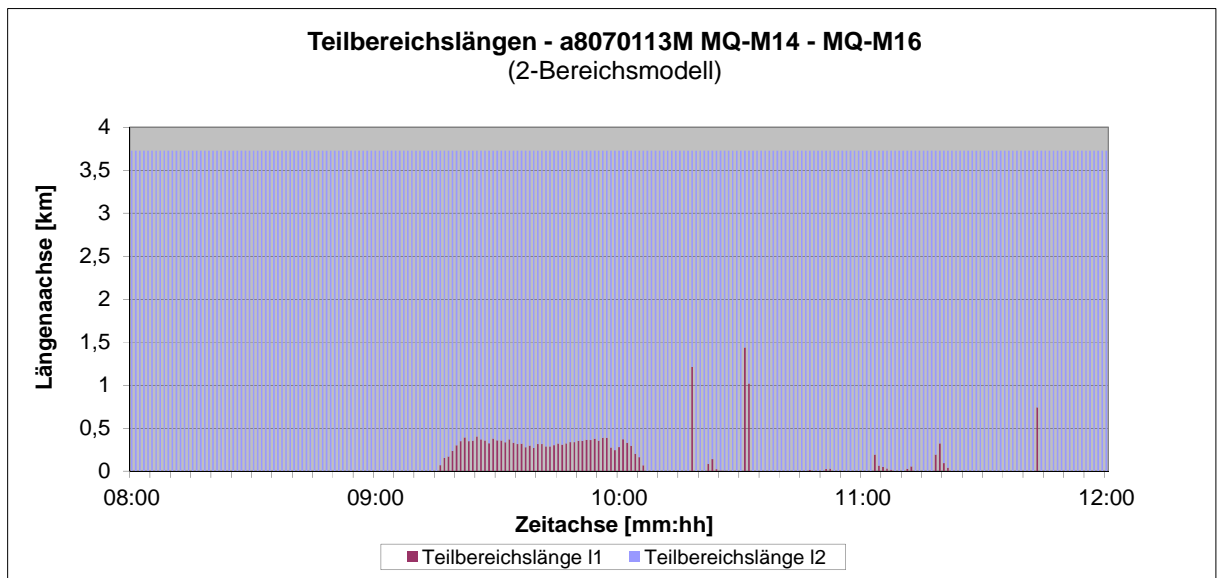


Abbildung 10-20: Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 100 \text{ km/h}$) – Beispiel 2.3

Die für das Beispiel 2.3 berechneten und in Abbildung 10-19 dargestellten Staulängen zeigen einen Anstieg der Staulängen ab dem Zeitpunkt, an dem sich der Störfall im Betrachtungsabschnitt bildet. Im weiteren Verlauf verbleiben die berechneten Staulängen auf einem ähnlichen Niveau. Erst zum Ende des Störfalls ist eine Abnahme der berechneten Staulängen zu beobachten.

Der Verlauf der berechneten Staulängen deckt sich weitgehend mit dem aufgrund der Störfallanalyse (vgl. Kapitel 5.3.3) erwarteten Verlauf der Staulängen. Der Anstieg der berechneten Staulängen zu Beginn des Störfalls spiegelt sich in den Messwerten im Anstieg der Verkehrsdichteganglinie und dem Einbruch der lokalen Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt sowie der Reisegeschwindigkeit wider. Ähnlich verhält es sich bei der Auflösung des Störfalls. Die zu beobachtende Abnahme der berechneten Staulängen geht mit einem Abfallen der Verkehrsdichteganglinie und einem schnellen Anstieg der lokalen Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt, gefolgt von einem Anstieg der Reisegeschwindigkeit, einher (vgl. Abbildung 10-17 und Abbildung 10-18).

Auffällig bei der Betrachtung der berechneten Staulängen im Beispiel 2.3 (vgl. Abbildung 10-19) ist, dass nach dem eigentlichen Betrachtungszeitraum, im scheinbar freien Verkehrszustand, teilweise sehr stark springende Staulängen angezeigt werden. Dies hängt vermutlich damit zusammen, dass nach dem Betrachtungszeitraum niedrigere zulässige Höchstgeschwindigkeiten geschaltet sind und somit die zugrunde gelegte Dreiecksfunktion an die neue Randbedingung (Veränderung der Freifahrtgeschwindigkeit) angepasst werden müsste (vgl. Kapitel 9.9). Mit angepasster Dreiecksfunktion sind nur noch vereinzelt (große) Staulängen zu beobachten (vgl. Abbildung 10-20). Es wird angenommen, dass diese auf Verkehrsdichten zurückzuführen sind, die auf relativ hohem Niveau stark schwanken (vgl. Abbildung 10-17 bzw. Abbildung 10-18).

In Beispiel 2.3 liegt zu keinem Zeitpunkt eine vollständige Überstauung des ersten und /oder des zweiten Teilabschnitts vor. Zu den Zeitpunkten, an denen der Eingangsquerschnitt

überstaut ist, fließt an den anderen beiden Querschnitten der Verkehr. Deshalb ist eine Messung der tatsächlichen Staulänge im Betrachtungszeitraum nicht möglich.

10.4 Störfallursache im stromaufwärts liegenden Abschnitt

Liegt die Störfallursache für eine Beeinträchtigung des Verkehrsflusses im Betrachtungsabschnitt im stromaufwärts liegenden Abschnitt, so wächst der Stau über den Eingangsquerschnitt in diesen hinein. Der sich einstellende Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt kann dann vereinfachend dem direkt eingeschwungenen 2-Bereichsmodell zugeordnet werden, bei dem der Störfall (anfänglich) am Eingangsquerschnitt manifestiert ist. Der weitere Störfallverlauf kann dazu führen, dass das Störfallende ebenfalls in den Betrachtungsabschnitt hineinwandert und somit der Störfall nicht mehr am Eingangsquerschnitt manifestiert ist.

Als Beispiel wird das bereits in Kapitel 5 vorgestellte Stauphänomen herangezogen, bei dem die Störfallursache stromabwärts in den Betrachtungsabschnitt hineinwandert (Beispiel 3.1).

Beispiel 3.1:

Störfallursache wandert stromabwärts in den Betrachtungsabschnitt

Betrachtungszeitraum:	14:10 – 16:10 Uhr
Messtag:	23.02.2007 (Freitag)
Betrachtungsabschnitt:	MQ-S17 bis MQ-S18
Fahrtrichtung:	Stuttgart
Abschnittslänge:	2,330 km
Anzahl der Fahrstreifen:	2
Bauliche Besonderheiten:	–
Sonstige Besonderheiten:	–
Freifahrtgeschwindigkeit vor dem Störfall (gemessen/zulässig):	teilweise unter 100 / 100 km/h
Anteil „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge:	10,1 %

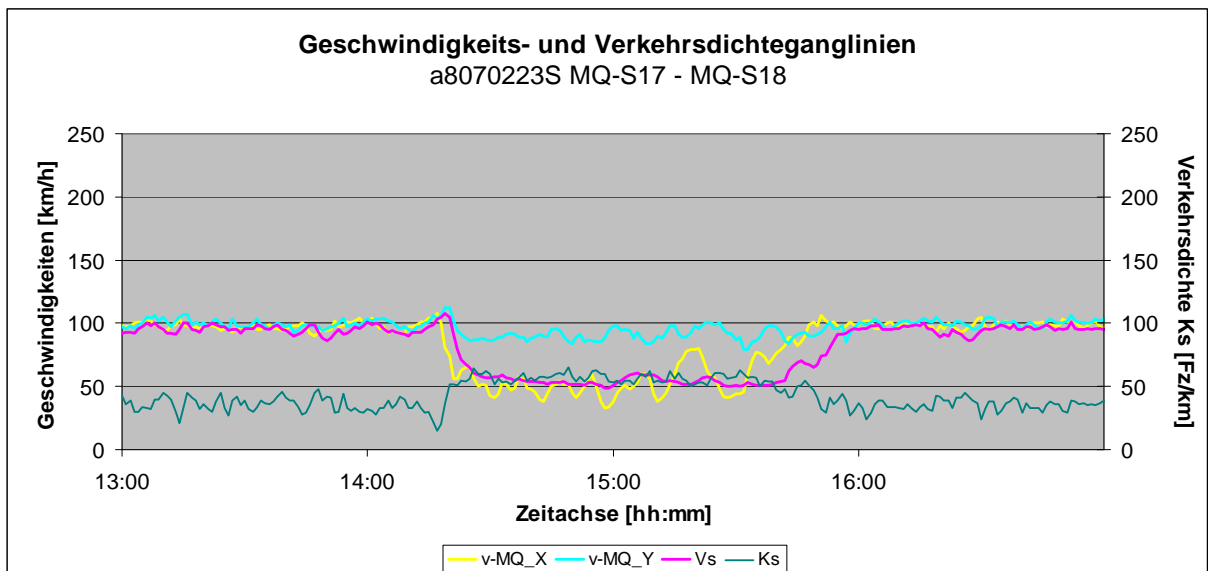


Abbildung 10-21: Geschwindigkeits- und Verkehrsdichteganglinien (Betrachtungsabschnitt) – Beispiel 3.1

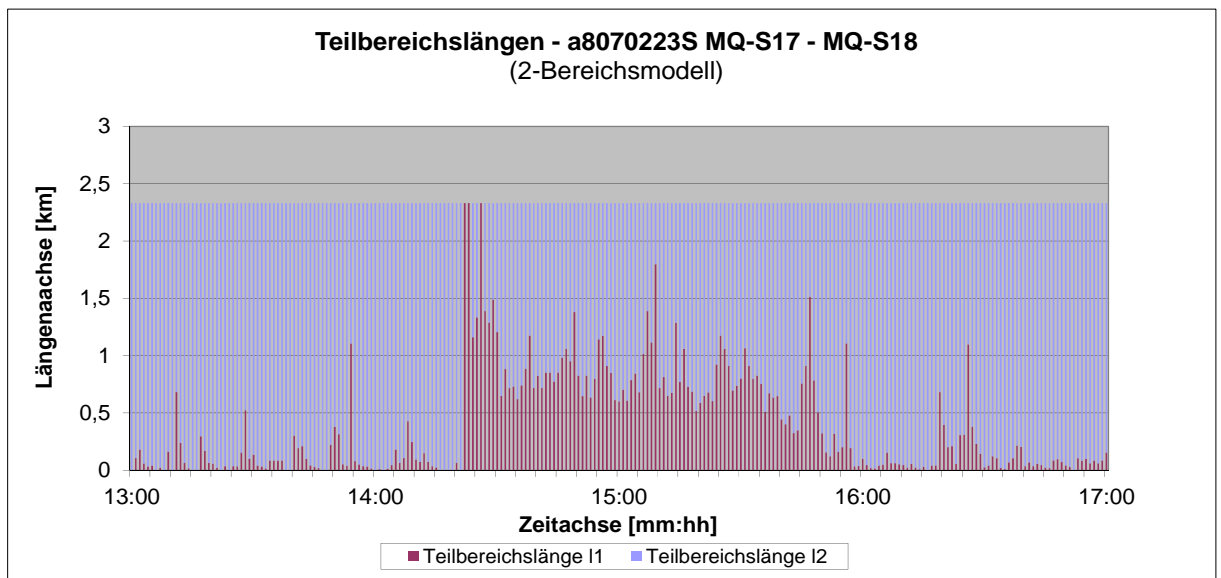


Abbildung 10-22: Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 100 \text{ km/h}$) – Beispiel 3.1

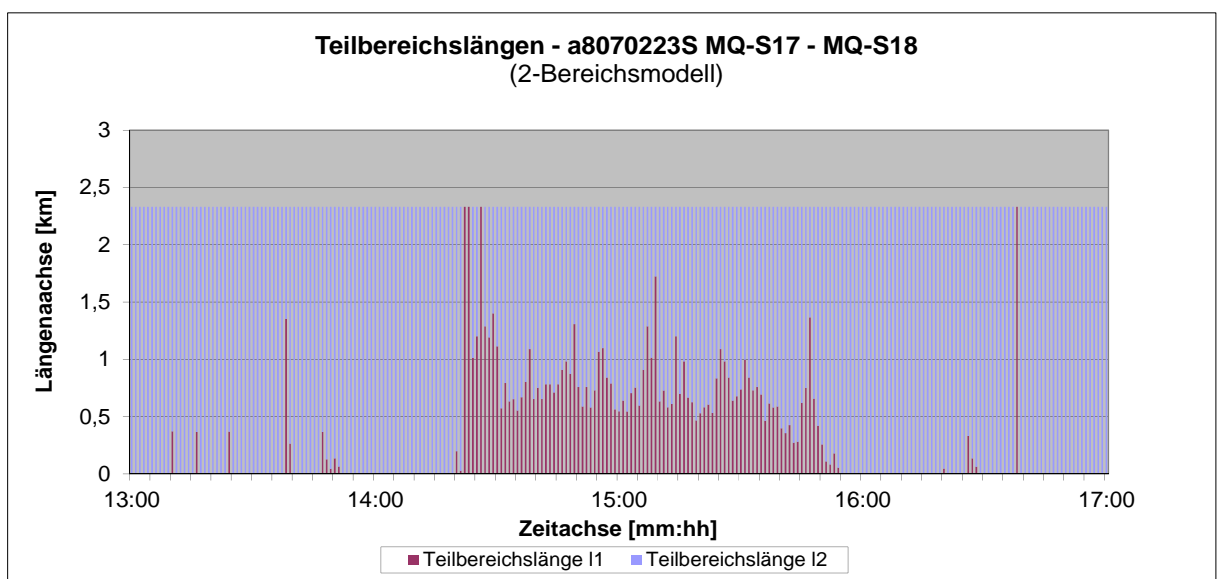


Abbildung 10-23: Teilbereichslängen ($v_{\text{frei}} = 90 \text{ km/h}$) – Beispiel 3.1

Die für das Beispiel 3.1 berechneten und in Abbildung 10-22 dargestellten Staulängen zeigen einen schnellen Anstieg der Staulängen ab dem Zeitpunkt, an dem der Störfall stromabwärts in den Betrachtungsabschnitt hineinwandert. Im weiteren Verlauf verbleiben die berechneten Staulängen schwankend auf einem ähnlichen Niveau. Erst zum Ende des Störfalls ist eine langsamere Abnahme der berechneten Staulängen zu beobachten.

Der Verlauf der berechneten Staulängen deckt sich weitgehend mit dem aufgrund der Störfallanalyse (vgl. Kapitel 5.4.1) erwarteten Verlauf der Staulängen. Der schnelle Anstieg der berechneten Staulängen zu Beginn des Störfalls spiegelt sich in den Messwerten im sprunghaften Anstieg der Verkehrsdichteganglinie und dem schnellen Einbruch der lokalen Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt sowie der Reisegeschwindigkeit wider. Während die Staulängen auf gleichbleibendem Niveau schwanken, schwanken ebenfalls die Verkehrsdichteganglinie sowie die lokale Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt. Ähnlich verhält es sich bei der Auflösung des Störfalls. Die zu beobachtende langsamere Abnahme der berechneten Staulängen geht mit einem langsameren Abfallen der Verkehrsdichteganglinie und einem langsameren Anstieg der lokalen Geschwindigkeit am Eingangsquerschnitt, gefolgt von einem ebenfalls langsameren Anstieg der Reisegeschwindigkeit, einher (vgl. Abbildung 10-21).

Auffällig bei der Betrachtung der berechneten Staulängen im Beispiel 3.1 sind sowohl die starken Schwankungen (teilweise bis zur scheinbaren Überstauung) zu Beginn des Störfalls als auch die vereinzelt vorhandenen Staulängen, die vor und nach dem Betrachtungszeitraum im vermeintlich freien Verkehrszustand zu beobachten sind.

Die starken Schwankungen zu Beginn des Störfalls sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass zu diesem Zeitpunkt die Modellannahme des gleichförmigen Verkehrsflusses nicht der Realität entspricht. Zu diesem Zeitpunkt ist der Störfallanfang nicht ortsfest und wandert in den Betrachtungsabschnitt. Dieses bewirkt, dass anders als bei einem ortsfesten Störfallanfang sich kontinuierlich die Randbedingungen verändern und sich somit keine stabile charakteristische Zeitlücke t_{ch} einstellen kann.

Die vor und nach dem Betrachtungszeitraum berechneten Staulängen sind vermutlich auf eine auf hohem Niveau schwankende Verkehrsdichte sowie auf eine nicht angepasste Dreiecksfunktion zurückzuführen. Teilweise liegen die gemessenen Geschwindigkeiten in diesem Bereich unter 100 km/h. Eine Anpassung der Dreiecksfunktion bewirkt eine Reduktion der Schwankungen der berechneten Staulängen (vgl. Abbildung 10-23).

In Beispiel 3.1 liegt zu keinem Zeitpunkt eine vollständige Überstauung des gesamten Betrachtungsabschnitts vor. Zu den Zeitpunkten, an denen der Eingangsquerschnitt überstaut ist, fließt am Ausgangsquerschnitt der Verkehr. Deshalb ist eine Messung der tatsächlichen Staulänge im Betrachtungszeitraum nicht möglich.

10.5 Betrachtung und Bewertung des „Staulängenberechnungsverfahrens“

Nachfolgend werden die für die einzelnen Anwendungsbeispiele (Kapitel 10.2 bis 10.4) erzielten Ergebnisse zusammengefasst. Dabei wird das vorgestellte Staulängenberech-

nungsverfahren sowohl hinsichtlich seiner generellen Einsatzfähigkeit als auch im Hinblick auf den zu erzielenden Nutzen für die Verkehrssicherheit, die Verkehrsqualität und die Energieeffizienz bewertet.

10.5.1 Generelle Einsatzfähigkeit des Staulängenberechnungsverfahrens

Der Schwerpunkt der Bewertung des Staulängenberechnungsverfahrens hinsichtlich einer generellen Einsatzfähigkeit liegt in den Zeiträumen, in denen ein gestörter Verkehrszustand im jeweiligen Betrachtungsabschnitt herrschte. Ein gestörter Verkehrszustand ist im realen Verkehrsablauf Voraussetzung dafür, dass eine Stauung mit entsprechenden Staulängen entstehen kann.

Neben der Bewertung im gestörten Verkehrszustand finden zusätzlich Betrachtungen im freien Verkehrszustand sowie in den Übergangszuständen statt. Diese zusätzlichen Betrachtungen geben Aufschluss darüber, inwieweit Randbedingungen, z.B. eine klare Abgrenzung des gestörten Verkehrszustandes, für die generelle Einsatzfähigkeit des Verfahrens erforderlich sind.

Gestörter Verkehrszustand

Die Ergebnisse der Anwendungsbeispiele zeigen, dass im gestörten Verkehrszustand mit dem vorgestellten Staulängenberechnungsverfahren unter vielfältigen Randbedingungen gute Ergebnisse erzielt werden können. Dabei sind die erzielten Ergebnisse weitgehend von der tatsächlichen Lage der Störfallursache unabhängig. Sowohl für Störfälle, bei denen die Störfallursache außerhalb des Betrachtungsabschnitts (im stromabwärts bzw. stromaufwärts liegenden Abschnitt) liegt, als auch für Störfälle, bei denen sich die ausschlaggebende Störfallursache im Betrachtungsabschnitt selbst befindet, können plausible Staulängen ermittelt werden.

Maßgebend für die Qualität der berechneten Staulängen im gestörten Verkehrszustand sind:

- ein eingeschwungener Verkehrszustand im Betrachtungsabschnitt (horizontaler Phasensprung, Verkehrsstärke ist in allen Teilabschnitten gleich groß)
- ein gleichförmiger freier bzw. gestörter Verkehrsablauf in den Teilabschnitten
- eine stabile charakteristische Zeitlücke t_{ch}
- die Wahl der Eingangsparameter für die zugrunde gelegte Dreiecksfunktion

Freier Verkehrszustand

Auch im freien Verkehrszustand liefert das Staulängenberechnungsverfahren für die Anwendungsbeispiele plausible Ergebnisse. Erwartungsgemäß ergeben sich im freien Verkehrszustand zumeist keine Staulängen. In den Fällen, in denen über das Verfahren Staulängen berechnet werden, kann gezeigt werden, dass sich der reale Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt signifikant von den zugrunde gelegten Modellannahmen unterscheidet.

Übergangszustand

Selbst in den Übergangszuständen, in denen die zugrunde gelegten Modellannahmen in weiten Teilen nur sehr eingeschränkt (beispielsweise nur für sehr kurze Betrachtungsintervalle) mit dem realen Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt übereinstimmen, können mit dem Verfahren häufig noch plausible Ergebnisse erzielt werden.

Die Betrachtung der für die verschiedenen Verkehrszustände erzielten Ergebnisse des Staulängenberechnungsverfahrens lässt Rückschlüsse auf eine gewisse „Robustheit“ des Verfahrens im Hinblick auf Abweichungen zwischen den realen und den modellhaft angenommen Verkehrsabläufen zu. Auch wenn die Modellannahmen nicht vollständig mit den realen Verkehrsabläufen übereinstimmen, liefert das Verfahren noch plausible Ergebnisse.

Bei einer Bewertung der generellen Einsatzfähigkeit des Staulängenberechnungsverfahrens ist zu beachten, dass über das vorgestellte Verfahren nur die Gesamtstaulänge im Betrachtungsabschnitt berechnet werden kann. Befinden sich im Betrachtungsabschnitt mehrere unabhängige Stauungen, so kann über die Staulängen der einzelnen Stauungen keine Aussage gemacht werden (unabhängig davon, dass in diesem Fall auch die zugrunde gelegte Modellannahme, dass nur eine Störfallursache den Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt beeinflusst, nicht zutrifft).

Aussagen über die genaue Lage des Staus (Stauanfang bzw. –ende) im Betrachtungsabschnitt sind mit dem vorgestellten Verfahren nur dann möglich, wenn der Verkehrsablauf einem eingeschwungenen 2-Bereichsmodell entspricht bzw. wenn der Betrachtungsabschnitt komplett überstaut ist (1-Bereichsmodell). Für alle anderen Verkehrsabläufe ist eine Bestimmung der genauen Lage des Staus nicht möglich. Indirekte Rückschlüsse lassen sich jedoch durch einen Vergleich zwischen der berechneten Staulänge und der Länge des Betrachtungsabschnitts unter Einbeziehung der lokalen Geschwindigkeiten am Ein- bzw. Ausgangsquerschnitt ziehen.

Eine Überprüfung der Richtigkeit der über das Staulängenverfahren berechneten Staulängen kann anhand von zwei Anwendungsbeispielen (Beispiel 1.3 und 2.2) erbracht werden. In diesen Fällen ist ein Teil- bzw. der gesamte Betrachtungsabschnitt (nahezu) vollständig überstaut. Die berechneten Staulängen entsprechen zu diesen Zeitpunkten (weitgehend) den realen Längen der überstauten Abschnitte. Daraus lässt sich schließen, dass über das vorgestellte Staulängenberechnungsverfahren stimmige Staulängen berechnet werden können. Gestützt wird diese Annahme zusätzlich durch die plausiblen Staulängenverläufe in den übrigen Anwendungsbeispielen. Die berechneten Staulängenverläufe lassen sich auch dort anhand der zur Verfügung stehenden lokalen und streckenbezogenen Messwerte nachvollziehen.

Aufgrund der guten Ergebnisse, die für das verkehrlich weitgefächerte Feld der Anwendungsbeispiele erzielt werden können, wird die generelle Einsatzfähigkeit des Staulängenberechnungsverfahrens als gut beurteilt.

10.5.2 Bewertung des Staulängenberechnungsverfahrens

Im Folgenden wird das Staulängenberechnungsverfahren hinsichtlich seines Einflusses und potentiellen Nutzens zur Steigerung der Verkehrssicherheit, der Verkehrsqualität und der Energieeffizienz bewertet.

Verkehrssicherheit

Die erzielten Ergebnisse der angeführten Anwendungsbeispiele zeigen, dass das Staulängenberechnungsverfahren hohes Potential aufweist, die Verkehrssicherheit auf Autobahnen zu steigern. Unabhängig von der jeweiligen Lage der Störfallursache können mit dem Verfahren für alle Anwendungsbeispiele zumeist plausible Staulängen berechnet werden.

Zwar ermöglicht das Verfahren keine generelle Bestimmung der Lage des Stauanfangs bzw. -endes, dennoch lassen sich bereits auf der Grundlage der berechneten Staulänge im Betrachtungsabschnitt wertvolle Erkenntnisse zur Steigerung der Verkehrssicherheit ableiten. Dabei ist der Nutzen des Staulängenberechnungsverfahrens hinsichtlich eines Einflusses auf die Verkehrssicherheit unabhängig von der zur Warnung eingesetzten Technologie (z.B. Wechselverkehrszeichen, Warnungen direkt im Fahrzeug).

Kann der reale Verkehrsablauf dem Verkehrsablauf des direkt eingeschwungenen 2-Bereichsmodells zugeordnet werden, so kann die Lage des Stauende bzw. des Stauanfangs im Betrachtungsabschnitt bestimmt werden. In diesem Fall ist der Nutzen des Staulängenberechnungsverfahrens hinsichtlich einer Steigerung der Verkehrssicherheit besonders hoch. Speziell an Stauenden ist auf der Autobahn eine Häufung von schweren Unfällen zu beobachten. Kann die Lage des Stauendes zuverlässig bestimmt werden, so ist eine detaillierte Warnung, inklusive voraussichtlichem Abstand zum Stauende, für den dem Stauende zufließenden Verkehr möglich. Detaillierte und zuverlässige Informationen haben zur Folge, dass sich ein höherer Befolgungsgrad bei den (möglicherweise) zusätzlich geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten einstellt. Werden die für den Geschwindigkeitstrichter geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten befolgt, so verringert sich das Risiko von Auffahrunfällen an Stauenden, wodurch sich die Verkehrssicherheit erhöht.

Kann aufgrund des realen Verkehrsflusses im Betrachtungsabschnitt weder Stauende noch Stauanfang direkt bestimmt werden, so können dennoch aus der berechneten Gesamtstaulänge und deren zeitlicher Entwicklung sicherheitsrelevante Schlüsse gezogen werden. Aus der Differenz der Betrachtungsabschnittslänge sowie der Staulänge ergibt sich die maximal mögliche Distanz zum Stauende. Auch diese Information kann dazu beitragen, die Akzeptanz von geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten und Stauwarnungen zu steigern.

Verkehrsqualität

Das Staulängenberechnungsverfahren hat keinen direkten Einfluss auf eine Steigerung der objektiven Verkehrsqualität für das gerade in den Betrachtungsabschnitt einfahrende Fahrzeug (Fahrzeugkollektiv). Im Bereich der objektiven Verkehrsqualität für die nachfolgenden Fahrzeuge (Fahrzeugkollektive) kann es jedoch zur Steuerung von Verkehrsbeeinflussungsstrategien beitragen.

Im Hinblick auf die subjektive Verkehrsqualität kann es, ähnlich dem Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren (vgl. Kapitel 8.5.3), die Verkehrssicherheit und den Fahrkomfort im Annäherungsbereich zum Stauende erhöhen. Somit ist der Nutzen des Staulängenberechnungsverfahrens im Hinblick auf eine Steigerung der Verkehrsqualität als durchaus hoch zu bewerten.

Energieeffizienz

Ähnlich dem Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren hat auch das Staulängenberechnungsverfahren keinen Einfluss auf fahrzeugabhängige Faktoren, die die Energieeffizienz beeinflussen.

Im Bereich der vom Fahrer beeinflussbaren Faktoren liefert das Staulängenberechnungsverfahren jedoch ebenfalls wertvolle zusätzliche Informationen. Insbesondere tritt dann eine Steigerung der Energieeffizienz auf, wenn aufgrund der zusätzlichen Informationen über den Störfall im Allgemeinen und über die Lage des Störfalls im Speziellen das Fahrverhalten angepasst wird. Eine Anpassung des Fahrverhaltens hin zu einem defensiveren (mehr Sicherheitsabstand, weniger unnötige positive und/oder negative Beschleunigungsvorgänge) und homogeneren Fahrverhalten (Einhaltung der geschalteten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten) führt neben einer Steigerung der Verkehrssicherheit und der Verkehrsqualität zu einer Steigerung der Energieeffizienz (vgl. Kapitel 8.5.3).

10.6 Zusammenfassung „Staulängenberechnung – Überprüfung“

Im vorangegangenen Kapitel wird der in Kapitel 0 vorgestellte theoretische Ansatz zur Staulängenberechnung anhand von empirischen Erhebungen nachgewiesen und diskutiert. Es kann gezeigt werden, dass mit dem vorgestellten Staulängenberechnungsverfahren unter vielfältigen Randbedingungen und weitgehend unabhängig von der Lage der ausschlaggebenden Störfallursache (zumeist) plausible Staulängen während eines gestörten Verkehrszustands im Betrachtungsabschnitt berechnet werden können. Dass die berechneten Staulängen dabei mit den realen Staulängen im Betrachtungsabschnitt übereinstimmen, kann anhand des Störfallverlaufs von zwei Anwendungsbeispielen nachgewiesen werden. Die Qualität der berechneten Staulängen hängt dabei sowohl von der Gültigkeit der getroffenen Modellannahmen als auch von der Wahl der Eingangsparameter für die zugrunde gelegte Dreiecksfunktion ab.

Selbst während des freien Verkehrszustands sowie in Übergangszuständen liefert das Staulängenberechnungsverfahren zumeist plausible Ergebnisse. Da die zugrunde gelegten Modellannahmen in diesen Verkehrszuständen nicht (immer) gewährleistet sind, lässt sich daraus auf eine gewisse „Robustheit“ des Verfahrens im Hinblick auf Abweichungen zwischen den realen und den modellhaft angenommenen vereinfachten Verkehrsabläufen schließen. Die generelle Einsatzfähigkeit des Staulängenberechnungsverfahrens wird zusammenfassend als gut eingestuft.

Der Einfluss des Staulängenberechnungsverfahrens hinsichtlich einer potentiellen Steigerung der Verkehrssicherheit, der Verkehrsqualität und der Energieeffizienz wird ebenfalls als gut bewertet. Zu allen drei Bereichen können die erzielten Ergebnisse direkt bzw. indirekt einen

signifikanten Beitrag leisten. Besonders hervorzuheben ist dabei der Einfluss des Staulängenberechnungsverfahrens auf eine mögliche Steigerung hinsichtlich der Verkehrssicherheit. Wird eine Stauung im Betrachtungsabschnitt schnell und zuverlässig erkannt und stehen darüber hinaus auch noch Informationen über die Lage bzw. die Länge der Stauung zur Verfügung, so können die in den Betrachtungsabschnitt einfahrenden Fahrzeuge frühzeitig, gezielt und umfassend gewarnt werden.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Das Ziel von Verkehrsbeeinflussungsstrategien ist es, eine Steigerung der Verkehrssicherheit, der Verkehrsqualität oder der Energieeffizienz zu bewirken. Maßgebliche Voraussetzung für die Auswahl und Entwicklung wirksamer Strategien ist die Verfügbarkeit von aktuellen, zuverlässigen und aussagekräftigen Verkehrslageinformationen.

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelten Verfahren, sowohl zur kurzfristigen Prognose von Reisezeiten bzw. Reisegeschwindigkeiten als auch zur Prognose von Staulängen, liefern einen Beitrag zur Verbesserung der Verkehrslageinformationen auf Autobahnen. So können auf der Grundlage der vorgestellten Verfahren beispielsweise den Fahrern von Fahrzeugen aktuelle, zuverlässige und aussagekräftige Verkehrsinformationen für die vor ihnen liegende Strecke (ca. 2 bis 4 km Länge) zur Verfügung gestellt werden.

Die entwickelten Verfahren sind der Gruppe der rückgekoppelten, kurzfristigen Prognoseverfahren zuzuordnen. Ein Vorteil von rückgekoppelten Verfahren besteht darin, dass eine Fehlerfortpflanzung verfahrensbedingt nahezu ausgeschlossen ist. Die prognostizierten Werte beruhen dabei immer auf gemessenen Eingangswerten der zur Verfügung stehenden Datenbasis. Der Gültigkeitsbereich der prognostizierten Werte entspricht dem Prognosehorizont. Danach werden die prognostizierten Werte durch die dann verfügbaren Messwerte ersetzt. Hierdurch entsteht die Rückkopplung. Mögliche fehlerhafte Prognosewerte werden somit längstens für die Dauer des zugrunde gelegten Prognoseintervalls eingesetzt.

Die in der Datenbasis zur Verfügung stehenden gemessenen Verkehrsgrößen, die als Eingangsgrößen für die entwickelten Prognoseverfahren benutzt werden, beruhen auf einem „Fahrzeuge wiedererkennenden“ Messverfahren mit dem Sensor Induktionsschleife. Im vorliegenden Fall können mit diesem Verfahren sowohl lokale als auch streckenbezogene Verkehrsgrößen gemessen werden. Das Verfahren ist den kontinuierlichen, anonymen Messverfahren zuzuordnen. Es arbeitet ohne Fahrzeug identifizierende Merkmale auf der Basis von Korrelationsmesstechnik. Generell kann aber für die vorgestellten Prognoseverfahren jede Datenbasis eingesetzt werden, die entsprechende lokale und streckenbezogene Daten bereitstellt. Dabei ist es unerheblich, ob die entsprechenden Daten gemessen oder modelliert werden.

Der Vorteil der in dieser Arbeit gewählten Kombination aus rückgekoppelten Prognoseverfahren in Verbindung mit gemessenen lokalen und streckenbezogenen Eingangsgrößen ist der, dass die Anzahl potentieller Fehlerquellen zur Prognose von Verkehrsgrößen auf ein Minimum, nämlich einen Mess- und einen Prognosefehler reduziert wird.

Grundlage der entwickelten Prognoseverfahren ist eine detaillierte Analyse der herrschenden Verkehrsabläufe im Betrachtungsabschnitt. Der Fokus dieser Prognoseverfahren liegt speziell im Bereich der gestörten Verkehrszustände. Für diese Verkehrszustände wird der Verkehrsablauf detailliert sowohl auf Betrachtungs- als auch auf Teilabschnittsebene analysiert.

Auf Betrachtungsabschnittsebene stellt der Betrachtungsabschnitt selbst, also der gesamte Bereich zwischen Ein- und Ausgangsquerschnitt, die kleinste betrachtete Einheit dar. Bei der

Betrachtung der Lage der ausschlaggebenden Störfallursache kann nur danach unterschieden werden, ob diese sich stromabwärts vor bzw. hinter oder aber direkt im Betrachtungsabschnitt selbst befindet. Alle getroffenen verkehrlichen Aussagen beziehen sich ebenfalls auf den gesamten Betrachtungsabschnitt.

Zur detaillierteren Untersuchung des Verkehrsablaufs innerhalb des Betrachtungsabschnitts wird dieser in Teilabschnitte mit unterschiedlichen Verkehrszuständen unterteilt. Bei der Betrachtung auf Teilabschnittsebene bilden diese Teilabschnitte die kleinste betrachtete Einheit. Unter der getroffenen Annahme, dass nur Störfälle mit maximal einer Störfallursache vorliegen, können sich ein bis drei Teilabschnitte innerhalb des Betrachtungsabschnitts bilden. Eine Analyse des Verkehrsablaufs auf Teilabschnittsebene erlaubt genauere Aussagen über die Lage der ausschlaggebenden Störfallursachen sowie eines möglichen Stauendes innerhalb des Betrachtungsabschnitts. Alle getroffenen verkehrlichen Aussagen, z.B. ob ein eingeschwungener Verkehrszustand oder aber ein Übergangszustand vorliegt, können hierbei sowohl für den Betrachtungsabschnitt als auch für die einzelnen Teilabschnitte gemacht werden.

Die aus der zur Verfügung stehenden Datenbasis ausgesuchten Störfälle, die zur Überprüfung der Prognoseverfahren herangezogen werden, basieren auf den durchgeführten Störfallanalysen. Nahezu alle identifizierten Störfallsituationen können mit entsprechenden realen Beispielen aus der umfangreichen Datenbasis abgebildet werden. Zur besseren Übersicht sind die gemessenen bzw. angezeigten Verkehrsgrößen als Gangliniendiagramme dargestellt, die eine detaillierte und zeitlich aufgelöste Analyse der Verkehrsabläufe während der ausgesuchten Störfälle ermöglichen.

Als neuartiger und wesentlicher Indikator für eine (Rück-)Stauung an einem Störfallquerschnitt wird in der vorliegenden Arbeit die charakteristische Zeitlücke t_{ch} hergeleitet. Bildet sich ein Rückstau stromabwärts vor dem Störfallquerschnitt, so stellt sich sowohl im Rückstaubereich selbst als auch in dem Bereich mit freiem Verkehrszustand stromabwärts hinter dem Störfallquerschnitt ein gleichförmiger (homogener und stationärer) Verkehrsfluss ein. Dieser kann über die charakteristische Zeitlücke t_{ch} beschrieben werden. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die charakteristische Zeitlücke t_{ch} nach Möglichkeit im freien Verkehrszustand stromabwärts hinter dem Störfallquerschnitt erhoben werden sollte, da sie dort besonders robust nachweisbar ist. Es zeigt sich, dass die charakteristische Zeitlücke t_{ch} über eine Strecke von mindestens ca. 2 km stromabwärts hinter der Störfallursache nachgewiesen werden kann. Darauf aufbauend wird in dieser Arbeit die eingesetzte charakteristische Zeitlücke t_{ch} am Ausgangsquerschnitt erhoben.

Generell stellt sich heraus, dass die charakteristische Zeitlücke t_{ch} sehr konstant ist, solange die Annahme, dass der aktuelle Verkehrsfluss die verringerte Kapazität am Störfallquerschnitt übersteigt, erfüllt ist (Stauung im Betrachtungsabschnitt). Vereinfachend kann die Entstehung der charakteristischen Zeitlücke anhand einer Trichteranalogie dargestellt werden.

Das entwickelte neuartige Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren basiert auf dieser charakteristischen Zeitlücke t_{ch} . In Abhängigkeit davon sowie der Anzahl der im Betrachtungsabschnitt befindlichen Fahrzeuge können mit dem entwickelten Basisverfahren für den „gestörten Verkehrsablauf mit Stauung“ auf Autobahnen Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognosen erstellt werden. Das Basisverfahren ist mit weiteren Prognose-

verfahren leicht koppelbar. In der Arbeit wird das Basisverfahren exemplarisch mit einem Extrapolationsprognoseverfahren kombiniert, welches für die Prognosen innerhalb der „sonstigen Verkehrsabläufe“ eingesetzt wird. Hierdurch entsteht ein optimiertes Prognoseverfahren für alle stationären Verkehrszustände. Grundlage für die erfolgreiche Kopplung verschiedener Verfahren ist eine präzise Abgrenzung der jeweiligen Einsatzgebiete, die hier anhand von definierten Indikatoren mit dazugehörigen Schwellwerten durchgeführt wird.

Zur Überprüfung der entwickelten Prognoseverfahren werden die vorgenannten ausgesuchten Störfallsituationen eingesetzt. Dabei zeigt sich, dass die Prognoseverfahren robust sind und zumeist zuverlässig gute Prognoseergebnisse liefern, teilweise mit einem Prognosegewinn von mehreren Minuten. Somit kann das Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognoseverfahren wesentlich zu einer Steigerung der Verkehrssicherheit, der Verkehrsqualität und der Energieeffizienz beitragen.

Das entwickelte, neuartige Staulängenberechnungsverfahren beruht auf einer Verknüpfung von gemittelten lokalen und streckenbezogenen Verkehrsgrößen.

Ergebnis des Staulängenberechnungsverfahrens ist die für das gerade in den Betrachtungsabschnitt einführende Fahrzeug (Fahrzeugkollektiv) relevante Staulänge. In Abhängigkeit von der vorherrschenden Störfallsituation kann darüber hinaus in einigen Fällen zusätzlich die Lage des Störfalls (Störfallanfangs- bzw. –ende) im Betrachtungsabschnitt bestimmt werden.

Die resultierenden dynamischen Ergebnisse haben eine zeitlich begrenzte Gültigkeit, die dem Betrachtungsintervall (hier eine Minute) entspricht.

Die Funktionsweise des vorgestellten Staulängenberechnungsverfahrens wird ebenfalls anhand der ausgesuchten Störfallsituationen überprüft. Dabei zeigt sich, dass das Staulängenberechnungsverfahren ebenfalls robust ist und unter vielfältigen Randbedingungen zuverlässig plausible Staulängen berechnet werden können. Die Qualität der Ergebnisse hängt dabei sowohl von der Gültigkeit der getroffenen Modellannahmen als auch von der Wahl der Eingangsparameter ab. Somit kann das Staulängenberechnungsverfahren ebenfalls wesentlich zu einer Steigerung der Verkehrssicherheit, der Verkehrsqualität und der Energieeffizienz beitragen.

Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit wird aus der zur Verfügung stehenden umfangreichen Datengrundlage eine Vielzahl potentieller realer Störfallsituationen systematisch ausgesucht, die zur Überprüfung der entwickelten Verfahren herangezogen werden. Die vorgestellten Verfahren zur Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose sowie zur Staulängenberechnung stellen sich im Rahmen dieser offline Überprüfungen als robust und zuverlässig heraus. Eine Dynamisierung der Verfahren sowie eine online Überprüfung unter realen Arbeitsbedingungen, z.B. durch den (testweisen) Einbau in eine Streckenbeeinflussungsanlage, finden nicht statt. Als Basis für mögliche Weiterentwicklungen der Verfahren sowie zur Vervollständigung der Überprüfungsmethodik wäre dieses perspektivisch wünschenswert.

Für die Reisezeit- bzw. Reisegeschwindigkeitsprognose im „sonstigen Verkehrsablauf“ wird ein „einfaches“ Extrapolationsverfahren eingesetzt. Ob bzw. inwieweit der Einsatz von komplexeren Prognoseverfahren hierbei zu besseren Ergebnissen führt, wird nicht untersucht,

da diese Verkehrsabläufe nicht im Fokus der Arbeit liegen. Bei weitergehenden Untersuchungen hinsichtlich einer Kopplung des Basisprognoseverfahrens mit anderen Prognoseverfahren für den „sonstigen Verkehrsablauf“ wäre neben dem Einsatz eines komplexeren Prognoseverfahrens ebenfalls der Einsatz von verschiedenen Verfahren, z.B. eines für den freien Verkehrsablauf und eines für die Übergangszustände, zu erwägen. Durch eine Unterteilung des „sonstigen Verkehrsablaufs“ in mehrere verschiedene Verkehrsabläufe könnten so die für jeden einzelnen Verkehrsablauf angesetzten Prognoseverfahren angepasst und optimiert werden.

Bei der Analyse der Anwendungsbeispiele für das Staulängenberechnungsverfahren zeigt sich, dass die Qualität der Ergebnisse direkt von der Gültigkeit der zugrunde gelegten Modellannahmen abhängt. Ein wesentlicher Faktor sind dabei die zusätzlich zu den Messwerten für die Modelle benötigten Eingangsgrößen sowie das eingesetzte Verkehrsmodell. Perspektivisch wäre eine Weiterentwicklung des Verfahrens hin zu einer dynamischen Anpassung der Eingangsgrößen an den realen Verkehrsablauf im Betrachtungsabschnitt, z.B. der angesetzten Freifahrtgeschwindigkeit und der mittleren Fahrzeuglänge, zu prüfen.

Im Staulängenberechnungsverfahren wird vereinfachend die Dreiecksfunktion in der q - k -Relation als Verkehrsmodell eingesetzt. Diese führte zu plausiblen Ergebnissen. Ob bzw. inwieweit mit anderen, komplexeren Verkehrsmodellen bessere Ergebnisse erzielt werden können, wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter untersucht. Im Zuge einer Optimierung des vorgestellten Staulängenberechnungsverfahrens sollte dies diskutiert werden.

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

$A_{\text{Pkw/Lkw}}$	%-Anteil der Pkw bzw. Lkw-ähnlichen Fahrzeuge am Fahrzeugkollektiv
EZ	Eingeschwungener Zustand
FCD	Floating Car Data
$\dots I_{\text{frei}}$	Verkehrsgrößen im freien Verkehrsablauf
$\dots I_{\text{gestört}}$	Verkehrsgrößen im gestörten Verkehrsablauf
$\dots I_{\text{sonstige}}$	Verkehrsgrößen im nicht gestörten Verkehrsablauf (frei, teilgebunden etc.)
$K_{\text{max}}/k_{\text{max}}$	maximale Verkehrsdichte
K_{mom}	momentane (streckenbezogene) Verkehrsdichte
k_{MQ}	„lokale“ Verkehrsdichte am Messquerschnitt
K_S	streckenbezogene Verkehrsdichte
L	Betrachtungsabschnittslänge
l	Länge des einzelnen Teilabschnitts
$l_{0,\text{Pkw} / \text{Lkw}}$	mittlere Netto-Fahrzeuglänge der Pkw bzw. Lkw
MQ-M14	Definierter Messquerschnitt der Datenbasis in Fahrtrichtung München (hier exemplarisch der 14te)
MQ-S13	Definierter Messquerschnitt der Datenbasis in Fahrtrichtung Stuttgart (hier exemplarisch der 13te)
MQ_x	Eingangsquerschnitt des Betrachtungsabschnitts
MQ_{xy}	Hilfs- bzw. Stützquerschnitt im Betrachtungsabschnitt (falls vorhanden zumeist mittig angeordnet)
MQ_y	Ausgangsquerschnitt des Betrachtungsabschnitts
N	Anzahl der Fahrzeuge im gesamten Betrachtungsabschnitt
$n_{1/2}$	Anzahl der Fahrzeuge im Teilabschnitt 1 bzw. 2
q-k Relation	Fundamentaldiagramm in der Verkehrsstärke-Verkehrsdichte Relation
q_{Kap}	lokale Verkehrsstärke an der Kapazitätsgrenze
q_{MQ}	lokale Verkehrsstärke am Messquerschnitt
Q_S	„streckenbezogene“ Verkehrsstärke
QSV	Qualitätsstufen des Verkehrsablauf (von A bis F) nach HBS 2001
$t_{1/2}$	bestimmte Zeitpunkte
t_{brutto}	Bruttozeitlücke zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen
t_{ch}	charakteristische Zeitlücke

$t_{ch,m}$	über m Aggregationsintervalle gemittelte charakteristische Zeitlücke
t_r	Reaktionszeit
T_s	Benötigte gesamte Reisezeit zur Durchfahrt des Betrachtungsabschnitts
$T_{s,pr}$	prognostizierte mittlere Reisezeit
ÜZ	Übergangszustand
v_f	Freifahrtgeschwindigkeit
V_{mom}	momentane (streckenbezogene) Geschwindigkeit
v_{MQ}	lokale Geschwindigkeit am Messquerschnitt
V_s	streckenbezogene Reisegeschwindigkeit
x-t-Diagramm	Weg-Zeit-Diagramm
„20 km/h“	Weist in den Diagrammen darauf hin, dass zu dem Zeitpunkt in der Datenbasis keine zulässige Höchstgeschwindigkeit, sondern das Zeichen „Stau“ an den Schilderbrücken geschaltet war.
„130 km/h“	Weist in den Diagrammen darauf hin, dass zu dem Zeitpunkt in der Datenbasis keine Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit an den Schilderbrücken geschaltet war.

Generelle Anmerkung:

Soweit möglich werden lokale Verkehrsgrößen mit Kleinbuchstaben bezeichnet, streckenbezogene Verkehrsgrößen sind durch Großbuchstaben gekennzeichnet.

Literaturverzeichnis

- [All07] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC) (Hrsg.): *Abstandsmessungen. Neue Auswertemethode für Fälle mit nicht zuverlässig erkennbaren Bremsungen des Vorfahrenden*; München 2007
- [BJ76] Box, G.; Jenkins, G.: *Time Series Analysis, Forecasting and Control*; Holden-Day; San Francisco 1976
- [Böh80] Böhnke, P.: *Beitrag zu einer Systemtheorie von Objektfunktionen. Ein Verfahren zur aktuellen Analyse und Prognose der Verkehrsabläufe innerhalb von Straßenabschnitten aus lokal gemessenen Fahrzeugfolgen*; Doktorarbeit; Fakultät für Elektrotechnik an der RWTH Aachen; RMI- Nachrichtentechnik GmbH (Verlag); Aachen 1980
- [Bri01] Brilon, W.: *Straßenverkehr*; Erschienen in: *Verkehr – Straße, Schiene, Luft*; Mehlhorn, G. (Hrsg.); Ernst & Sohn Verlag; Berlin 2001
- [Bun99] Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.): *Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ 99)*; Bergisch Gladbach 1999
- [Bun03] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): *Telematik im Verkehr: Kollektive Verkehrsbeeinflussungsanlagen auf Bundesfernstraßen – Stand der Entwicklung und Zukunftsperspektiven*; Berlin 2003
- [Bun06] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.); *Leitfaden Verkehrstelematik. Hinweise zur Planung und Nutzung in Kommunen und Kreisen*; Berlin 2006
- [Bun08] Bundesministerium für Umwelt: *Spritsparen lohnt sich – für Geldbörse und Umwelt; Verbrauchertipps des Bundesministeriums*; Stand: September 2008; www.bmu.de/energieeffizienz/foerdermittel_beratung/energiespartipps/doc/2133.php; (letzter Aufruf: März 2011)
- [Bun11] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): *Verkehrssicherheitsprogramm 2011*; Berlin 2011
- [Deu11] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (Hrsg.): *UTRaCar und MoMoCar*; http://www.dlr.de/fs/desktopdefault.aspx/tabid-1237/5441_read-12153/n; (letzter Aufruf: Januar 2012)
- [Erl07] Erlemann, K.: *Objektorientierte mikroskopische Verkehrssimulation*; Doktorarbeit; Fakultät Bauingenieurwesen; Ruhr-Universität Bochum; Bochum 2007
- [FFV01] Fellendorf, M.; Friedrich, M.; Vortisch, P.: *Kopplung makroskopischer und mikroskopischer Verkehrsmodelle – ein Verfahren für die Integration von großräumiger Planung und Detailplanung*; Tagungsband der 18. Verkehrswissenschaftlichen Tage; TU Dresden; Dresden 2001
- [FHS+08] Fucik, Hartl, Schlosser, Wielke (Hrsg.): *Handbuch des Verkehrsunfalls, Teil 2*; Manz-Verlag Wien; Wien 2008
- [For00] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): *Hinweise für neue Verfahren zur Verkehrsbeeinflussung auf Außerortsstraßen*; Ausgabe 2000; Heft 376; Köln 2000

- [For01] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)*; Ausgabe 2001; FGSV-Nr. 299; Köln 2001
- [For03] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): *Hinweise zur Datenvervollständigung und Datenaufbereitung in verkehrstechnischen Anwendungen*; Ausgabe 2003; Heft 382; Köln 2003
- [For05] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): *Hinweise zum Fundamentaldiagramm – Grundlagen und Anwendungen*; Ausgabe 2005; Heft 385; Köln 2005
- [FPS09] Friedrich, M.; Prokop, J.; Schlaich, J.: *Erfassung von Verkehrsdaten mit automatischen Kennzeichenerfassungssystemen*; Erschienen in: *Straßenverkehrstechnik* Jahrgang 53., Heft 12, S.789-795, Kirchbaumverlag; Bonn 2009
- [Hel97] Helbing, D.: *Verkehrsdynamik, Neue physikalische Modellierungskonzepte*; Springer Verlag; Berlin 1997
- [Her01] Herz, R.: *Verkehr im zeitlichen Verlauf*; Erschienen im Buch: *Verkehr – Straße, Schiene, Luft*; Mehlhorn, G. (Hrsg.); Ernst & Sohn Verlag; Berlin 2001
- [HNP+09] Hoyer, R.; Neukirchner, E.-P.; Poppe, H.; Resch, C.: *Fahrerinformations- und Fahrerassistenzsysteme*; Vortragsfolien für das 2. Kooperations- und Innovationsforum zum AKTIV Projekt; 17. März 2009 im Opel Forum; Rüsselsheim 2009
- [Ins08] Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau: *Leitfaden Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen*; Leibniz Universität Hannover (Hrsg.); Hannover 2008
- [Ker00] Kerner, B. S.: *Theory of breakdown Phenomenon at Highway Bottlenecks*; Paper No. 00-1573 Transportation Research Board; 79th Annual Meeting; Washington D.C. 2000
- [Ker04] Kerner, B. S.: *The Physics of Traffic - Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications, and Theory*; Springer Berlin Heidelberg; Berlin 2004
- [Ker09] Kerner, B. S.: *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control – The Long Road to Three-Phase Traffic Theory*; Springer-Verlag; Berlin 2009
- [KRB05] Kühne, R.; Ruhé, M.; Bonert, M.: *Anwendung der luftgestützten Datenerfassung bei Großveranstaltungen*; Vortragszusammenfassung der Veranstaltung: Verkehrswissenschaftliche Tage, Dresden 19. – 20 Sep. 2005; Berlin 2005
- [KSM+05] Kühne, R.; Schäfer, R.-P.; Mieth, P.; Lorkowski, S.; Bei, X.: *Vehicle Probes as Data Collectors for Asian Metropolitan Areas*; Konferenzbeitrag (Paper); 4th Asia Pacific Conference; Xi'an (China) 2005
- [NS92] Nagel, K.; Schreckenberg, M.: *A cellular automaton model for freeway traffic*; *Journal de Physique I*, Vol. 2/12; S. 2221-2229; France 1992
- [Sch08] Schwieger, V.: *Generierung von Verkehrsdaten auf Basis von verfügbaren Mobilfunkdaten innerhalb der GSM-Netzinfrastruktur*; Erschienen in: *Verkehrsmanagement und Verkehrstechnologien, Mobile Zukunft mit intelligenten Verkehrssystemen*; Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie – BMWi (Hrsg.); Berlin 2008

- [Sha84] Shaw, R.: *The Dripping Faucet as a Model Chaotic System*; Erschienen in: The Science Frontier Express Series; Aerial Press; Santa Cruz 1984
- [Sta11] Statistisches Bundesamt (Hrsg.): *Unfallentwicklung auf deutschen Straßen 2010*; Wiesbaden 2011
- [SV03] Schäfer, R.-P.; Vogt, T.: *Der Stadt den Puls gefühlt*; Erschienen in: DLR Nachrichten. Sonderheft Verkehr – DLR macht mobil (106); Seite 16-19; Berlin 2003
- [TKH05] Trieber, M.; Kesting, A.; Helbing, D.: *Verkehr verstehen und beherrschen*; Erschienen in: Für eine neue deutsche Verkehrspolitik; Edition Internationales Verkehrswesen; U. Stopka, W. Pällmann (Hrsg.); Deutscher Verkehrs-Verlag; Hamburg 2005
- [Van06] Van der Ruhren, S.: *Kurzfristprognosen von Verkehrszuständen auf Basis von Verfahren der Mustererkennung und von dynamischen Routensuch- und Umlegungsverfahren*; Doktorarbeit; Lehrstuhl für Stadtbauwesen und Stadtverkehr; RWTH Aachen; Aachen 2006
- [VO05] Vortisch, P.; Ortgiese, M.: *Vom Stau zur Verkehrsinformation – Datenfusion als Teil eines Gesamtprozesses*; Erschienen in: at-Automatisierungstechnik Nr. 53; Seite 306-313; Oldenbourg Verlag; München 2005

ISSN 1866-721X