

Anhang zu:

**Simulation des
hochautomatisierten
Fahrens auf Autobahnen
mit kollektiver
Streckenbeeinflussung**

von

Torben Hilgers
Anja Krabbe
Andrea Haug

Heusch/Boesefeldt GmbH
Aachen

Jan Grimm

Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme
Dresden

Steffen Kutter
Conny Tempelhahn

Institut für Automobiltechnik
TU Dresden

Christoph Schwietering
Johannes Füg

Schwietering Ingenieure GmbH
Aachen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 362

bast

Anhang

Anhang 1: Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodelle

Anhang 2: Bewertungsgrößen

Anhang 3: Zusammenhänge Fahrsituation/Empirisches Verhalten

Anhang 4: Einfluss Simulationsparameter auf Abstandsverhalten

Anhang 5: Funktionen Abstandsverhaltensparameter

Anhang 6: Parameter der Modelle automatisierter Fahrzeuge

Anhang 7: Weitere Kalibrierungsergebnisse

Anhang 8: Verkehrszusammenstellung A57 20.3.2017

Anhang 1: Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodelle

Fahrzeugfolgemodelle - Safety-Distance-Modelle:

Gipps (AIMSUN)		Safety-Distance-/ Collision-Avoidance-Modelle
beschrieben in:		
<ul style="list-style-type: none"> [Gip81] (Ursprüngliches Modell) [TSS14] (aktuelle Umsetzung in AIMSUN inkl. Parameter) 		
Wesentliche Charakteristika:		
<ul style="list-style-type: none"> kollisionsfreies Modell Modell so gestaltet, dass Parameter mit offensichtlichen Charakteristiken des Fahrers und des Fahrzeugs übereinstimmen; Modell verwendet fahrer-/fahrzeugbezogene Performance-Grenzen [Det11] Berechnung sicherer Geschwindigkeit: sicheres Anhalten, falls vorausfahrendes Fahrzeug mit max. Verzögerung zum Stehen kommt Unterschätzt die FFE die max. Verzögerung des Vorausfahrers, kann sie eine noch stärkere als die Wunschverzögerung wählen → Kollisionsfreiheit auch in diesem Falle gewährleistet 		
Parameter	empfohlene Werte/ Standard-Werte	Bemerkungen
max. Beschleunigung	Pkw/Lkw [Gei17]: Mittelwert: 3 / 1 m/s ² Std.-Abw.: 0,2 / 0,5 m/s ² Min/Max: 2,6..3,4 / 0,6..1,8 m/s ²	
max. Verzögerung	Pkw/Lkw [Gei17]: Mittelwert: 6 / 5 m/s ² Std.-Abw. 0,5 m/s ² Min/Max: 5..7 / 4..6 m/s ²	
Wunschverzögerung im Normalfall	Pkw/Lkw [Gei17]: Mittelwert: 4 / 3,5 m/s ² Std.-Abw.: 0,25 / 1 m/s ² Min/Max: 3,5..4,5 / 2,5..4,8 m/s ²	
Wunschgeschwindigkeit	Pkw/Lkw [Gei17]: Mittelwert: 130 / 80 km/h Std.-Abw.: 50 / 5 km/h Min/Max: 100..200 / 70..85 km/h	beeinflusst stabilen Bereich (fließender Verkehr) im Fundamentaldiagramm bzw. Verhalten langsamer Fzge. (z.B. Lkw)
Faktor Befolgung von Geschwindigkeitsbegrenzungen	[Gei17]: Mittelwert: 1; Std.-Abw. (nur Pkw): 0,2	beeinflusst stabilen Bereich (fließender Verkehr) im Fundamentaldiagramm
Mindestabstand zum Vorausfahrenden bei Stillstand	Pkw/Lkw [Gei17]: Mittelwert: 1 / 1,5 m Std.-Abw.: 0,3 / 0,5 m Min/Max: 0,5..1,5 / 1..2,5 m	
Mindest-Zeitlücke	Pkw/Lkw [Gei17]: Mittelwert: 1,4 / 1,1s Std.-Abw.: 0,7 / 0,5s Min/Max: 0,8..1,7 / 0,5..3,1s	
Sensitivity Factor	[Gei17]: 1 > 1: konservative Abstandswahl; < 1: risikobereite Abstandswahl	beeinflusst Risikobereitschaft im Fahrzeugfolgeverhalten
Reaktionszeit des Fahrers	0,9s [Gei17]	beeinflusst Kapazität und Zeitlücken; stets Vielfaches der Sim.-Schrittweite
Reaktionszeit des Fahrers bei Stillstand	1,35s [Gei17]	beeinflusst Stauzustand im Fundamentaldiagramm und Stauwellengeschw.

Krauß (SUMO)		Safety-Distance-/ Collision-Avoidance-Modelle	
beschrieben in:			
<ul style="list-style-type: none"> • [Kra98] (Ursprüngliches Modell) • [DLR18b] (aktuelle Umsetzung in SUMO inkl. Parameter) 			
Wesentliche Charakteristika:			
<ul style="list-style-type: none"> • Grundsätzlich kollisionsfrei (wenngleich Kollisionen unter bestimmten Umständen möglich) • Berechnung sicherer Geschwindigkeit ähnlich wie im Modell nach Gipps (s.o.) • Begrenzung von Geschwindigkeit und Beschleunigungen • Berücksichtigt Unvollkommenheit des Fahrers durch zufällige Störeinflüsse auf die Längsführung 			
Parameter		empfohlene Werte/ Standard-Werte	Bemerkungen
accel	max. Beschleunigung	3,5 m/s ² (Pkw) 2,5 m/s ² (Lkw) [Gei17]	
decel	Verzögerung, die im Normalfall eingehalten wird	7,0..8,0 m/s ² (Pkw) 5,0 m/s ² (Lkw) [Gei17]	Teile des Kollektivs mit max. 3,0 m/s ³ an Einfahrten
emergencyDecel	max. Verzögerung		
sigma	zufällige Störung; Unvollkommenheit des Fahrers (driver imperfection)	0,5 [Gei17]	Wert im Bereich [0..1]
tau	Reaktionszeit	1s (default); 1,0..1,5s [Gei17]	mindestens die Simulationsschrittweite
minGap	Mindestabstand im Stillstand	2,5m (default); 1,5..3,0m [Gei17]	geringer im Bereich von Einfahrten
vmax	max. Geschwindigkeit	70 m/s (default); 40..70 m/s (Pkw) 30 m/s (Lkw) [Gei17]	
speedFactor	Faktor zur Befolgung von Geschwindigkeitsbeschränkungen	1 (default); 1,0..1,3 (Pkw) 0,8 (Lkw) [Gei17]	
speedDev	Standardabweichung des Befolgungsfaktors	0 (default); 0,1 [Gei17]	

Fahrzeugfolgemodelle - Psycho-physische Modelle:

Wiedemann (v.a. VISSIM, BABSIM) Psycho-physisches/ Action-Point-Modell			
beschrieben in:			
<ul style="list-style-type: none"> • [Wie74] (Ursprüngliches Modell) • [PTV11] (Umsetzung in VISSIM 5.40, inkl. des Modells „Wiedemann 99“ und Parametern) • [Har07] (Umsetzung im Teilmodell „Abstand halten“ in BABSIM inkl. Parameter) • [DLR18b] (Umsetzung in SUMO inkl. Parameter) 			
Wesentliche Charakteristika:			
<ul style="list-style-type: none"> • Grundannahme: Fahrer hat nur unvollständige Information über sein Umfeld (und nimmt diese zeitlich verzögert wahr); handeln kann er nur auf Grundlage dessen, was er wahrnehmen kann • Berücksichtigung einer unvollkommenen Beherrschung des Gaspedals • stochastisches Modell: Wahrnehmungsschwellen und Beschleunigungsgrenzwerte unterliegen geschwindigkeitsabhängigen Normalverteilungen • Unterscheidung zwischen unbeeinflusstem sowie bewusst und unbewusst beeinflusstem Fahren (in Abhängigkeit von Abstand und Geschwindigkeit), dementsprechend vier Fahrzustände: <ul style="list-style-type: none"> ○ unbeeinflusstes (freies) Fahren ○ Annäherung an langsames Fahren (bewusst beeinflusst) ○ Folgen (unbewusst beeinflusst, oszillierender Abstand) ○ Bremsen (Gefahrenabwehr) • Weiterentwicklungen für VISSIM: <ul style="list-style-type: none"> ○ Je Fahrzeugtyp zwei Beschleunigungs- und zwei Verzögerungskurven (max. technisch realisierbar, gewünscht); Funktion in Abhängigkeit von der aktuellen Geschwindigkeit (z.T. unter Einbeziehung der Längsneigung) ○ Bei Lkw Verhältnis Leistung/Gewicht bei Beschleunigung berücksichtigt ○ Wiedemann 74 für innerstädtischen Verkehr und Verflechtungsbereiche; Wiedemann 99 für Autobahnverkehr ohne Verflechtungsbereiche ○ Berücksichtigung Vorausschauweite und vorübergehende Unaufmerksamkeit • Weiterentwicklungen für BABSIM: <ul style="list-style-type: none"> ○ Einbeziehung von Trägheit ○ Einbeziehung zufälligen Trödelns 			
Parameter Implementierung in VISSIM, ursprüngliches Modell nach [Wie74]:		empfohlene Werte/ Standard-Werte	Bemerkungen
ax	Mittlerer Stillstandsabstand	2m [Wie74]	beeinflusst max. erreichbare Verkehrsstärke (Kapazität) [Har07]
bx_add	Additiver Einfluss Sicherheitsabstand	1 [Wie74]	beeinflusst max. erreichbare Verkehrsstärke (Kapazität) [Har07]
bx_mult	Multiplikativer Einfluss Sicherheitsabstand	7 [Wie74]	beeinflusst max. erreichbare Verkehrsstärke (Kapazität) [Har07]

Parameter Implementierung in VISSIM, weiterentwickeltes Modell „Wiedemann 99“:		empfohlene Werte/ Standard-Werte	Bemerkungen
CC0	Stillstandsabstand	1,50 (default); 2,5..3,0 [Gei17]	Beeinflusst Kapazität; Kriterium: z.B. Zeitlücken; größer in Verflechtungsbereichen [Gei17]
CC1	Folgeabstand	1,05s..1,65 [Gei17]	Beeinflusst Kapazität; Kriterium: z.B. Zeitlücken; größer in Verflechtungsbereichen und an Einfahrten [Gei17]
CC2	Längs-Oszillation/ Abstandsdifferenz	4m (default); 4..5m [Gei17]	Beeinflusst Stabilität des Fahrzeugfolgeverhaltens; Kriterium: Zusammenbrüche, Zeitlückenverhalten
CC3	Beginn Verzögerungsvorgang	-8,00 (default); -9,0..-8,0 [Gei17]	
CC4	neg. Geschwindigkeitsdifferenzen während des Folgevorgangs	-0,35 (default); -0,40..0,30 [Gei17]	
CC5	pos. Geschwindigkeitsdifferenzen während des Folgevorgangs	0,35 (default); 0,35..0,40 [Gei17]	
CC6	Oszillation der Geschwindigkeit während des Folgevorgangs	11,44 (default)	
CC7	Beschleunigung während der Oszillation	0,25 (default)	
CC8	Wunschbeschleunigung aus dem Stillstand	3,5m/s ² (default); 2,5m/s ² (Lkw in [Gei17])	bei Lkw niedriger [Gei17]
CC9	Wunschbeschleunigung bei 80 km/h	1,5m/s ² (default); 1,0m/s ² (Lkw in [Gei17])	bei Lkw niedriger [Gei17]
Parameter für Implementierung in VISSIM, ausgewählte Parameter mit Einfluss auf Fahrzeugfolgeverhalten und Geschwindigkeitswahl:		empfohlene Werte/ Standard-Werte	Hinweise zur Kalibrierung
Anzahl Vorderfahrzeuge		2 (default)	in Verflechtungsbereichen größer [Gei17]
Vorausschauweite		250 m (default)	
Häufigkeitsverteilung Wunschgeschwindigkeiten (Stützpunkte Verteilungsfunktion)			freie Geschwindigkeiten aus emp. Beobachtungen ermittelbar [Wie74]; anpassungen für Lkw-Geschwindigkeit erforderlich [Gei17]
Vorübergehende Unaufmerksamkeit, Dauer		0,0 (default und [Gei17])	
Vorübergehende Unaufmerksamkeit, Wahrscheinlichkeit		0,0 (default und [Gei17])	

Parameter Implementierung im Teilmodul „Abstand halten“ in BABSIM [Har07]:		Wertebereich	Voreinstellung	Erfahrungswerte
traegheitAbstandHalten	Bestimmt die Trägheit, mit der Sollzustands (hier: Beschleunigung) aus dem Teilmodell „Abstand halten“ in die Bestimmung des Istzustands einfließt. Je niedriger, desto länger dauert es, bis der Sollzustand erreicht wird. Der Wert 2 bedeutet, dass der Sollzustand unmittelbar erreicht wird.	[0..2]	1,0	1,0 [Har07] 0,5..1,0 [Gei17]
zeitluecke	Faktor, der mit dem Abstand aus dem Fahrzeugfolgemodell multipliziert wird (um höhere Kapazitäten erreichen zu können)	[0..1]	0,6	0,3..0,8 [Har07] 0,4..0,6 [Gei17]
troedelwahrscheinlichkeit	Wahrscheinlichkeit, mit der eine FFE nicht beschleunigt, obwohl dies möglich wäre (Trödeln). Dient der besseren Nachbildung von Verkehrszusammenbrüchen („Stau aus dem Nichts“). 1: kein Trödeln, 0: jederzeit Trödeln	[0..1]	1,0	1,0 [Har07] 0,98..1,0 [Gei17]
troedelzeit	Dauer, mit der die FFE auf ein Beschleunigen verzichtet (in Sekunden)		3,0	3,0 [Har07] 2,0..3,0 [Gei17]

Fritzsche (Paramics)		Psycho-physisches/ Action-Point-Modell	
beschrieben in: [Fri94]			
Wesentliche Charakteristika:			
<ul style="list-style-type: none"> • Einbeziehung von Wahrnehmungsgrenzen (ähnlich wie Modell nach Wiedemann, s.o.) • Unterscheidung von fünf Fahrzuständen anhand Grenzfunktionen auf der Abstands-Geschwindigkeits-Ebene: <ul style="list-style-type: none"> ○ Freies Fahren ○ Folgen I ○ Folgen II ○ Annähern ○ Gefahr • Berücksichtigt Aufmerksamkeit und Aggressivität als Modellparameter [Gei17] • Beschleunigung und Verzögerung bei Steigungen und Gefälle kann Motorleistung individueller Fahrzeuge berücksichtigen („climb model“) 			
Parameter		empfohlene Werte/ Standard-Werte	Bemerkungen
TD	Wunsch-Zeitlücke (Reaktionszeit)	1,8s	
Tr	riskante Zeitlücke	0,5s	
TS	sichere Zeitlücke	1s	
Δb_m	Verzögerungsparameter	0,4 m/s ²	
top speed	max. Geschwindigkeit Fahrzeugklasse	135..170 km/h (Pkw) 95..110 km/h (Lkw) [Gei17]	
crawl speed		ca. 80-110 km/h (Pkw) ca. 65..80 km/h (Lkw) [Gei17]	
perturbation		5,0 [Gei17]	

Fahrstreifenwechselmodelle:

Sparmann	Fahrstreifenwechselmodell
beschrieben in:	
<ul style="list-style-type: none">• [Spa78] (Ursprüngliches Modell)• [Har07] (Umsetzung in früherer Version von BABSIM)	
Wesentliche Charakteristika:	
<ul style="list-style-type: none">• Modell entwickelt für freiwillige Fahrstreifenwechsel auf Autobahnen (d.h. Fahrstreifenwechsel zum Überholen sowie zur Einhaltung des Rechtsfahrgebots)• Modell unterscheidet zwischen folgenden Fahrstreifenwechselklassen (bezogen auf zweistreifige Richtungsfahrbahn):<ul style="list-style-type: none">○ Nach links:<ul style="list-style-type: none">▪ Frei (nur Vorfahrer, kein Fzg. auf Zielfahrstreifen)▪ Lead (Vorfahrer auf eigenem und Zielfahrstreifen)▪ Lag (Vorfahrer auf eigenem, Nachfolger auf Zielfahrstreifen)▪ Gap (Vorfahrer auf eigenem, Lücke zwischen zwei Fahrzeugen auf Zielfahrstreifen)○ Nach rechts:<ul style="list-style-type: none">▪ Frei (kein Folgefahrzeug auf eigenem Fahrstreifen)▪ Beschl (schnelleres Folgefahrzeug auf eigenem Fahrstreifen)• Modell beinhaltet in Anlehnung an [Wie74] Wahrnehmungsschwellen für Geschwindigkeitsdifferenzen, die folgende Interaktionszustände bzgl. Fahrstreifenwechsel abgrenzen:<ul style="list-style-type: none">○ nicht beeinflusst○ potenziell beeinflusst (wird voraussichtlich in den nachfolgenden Zeitschritten in einen beeinflussten Zustand gelangen)○ aktuell beeinflusst• Ursprüngliches Modell später ergänzt um notwendige Fahrstreifenwechsel, u.a. Modell nach Theis (BABSIM) und weiterentwickeltes Modell für VISSIM, s.u.	
Einschränkungen:	
<ul style="list-style-type: none">• bezieht sich auf zweistreifige Autobahnabschnitte (wobei in [Bus84] eine grundsätzliche Übertragbarkeit auf dreistreifige Querschnitte festgestellt wurde [Har07])• ursprüngliches Modell ohne Betrachtung von Zu- und Abfahrten, d.h. notwendige Fahrstreifenwechsel werden nicht abgebildet• keine Beeinflussung der Längsführung/Beschleunigung [Har07]• Kooperation beim Fahrstreifenwechsel im ursprünglichen Modell nicht vorgesehen➔ Modell nur mit erheblichen Weiterentwicklungen (VISSIM) bzw. mit ergänzenden Modellen (Modell nach Theis [The97] in früherer Version von BABSIM) im Einsatz	

Theis	Fahrstreifenwechselmodell
beschrieben in:	
<ul style="list-style-type: none"> • [The97] [Ehm03] (Ursprüngliches Modell) • [Har07] (Umsetzung in früherer Version von BABSIM) 	
Wesentliche Charakteristika:	
<ul style="list-style-type: none"> • Modell entwickelt zur Modellierung notwendiger Fahrstreifenwechsel auf Autobahnen (basierend auf Modell nach Sparmann, s.o.) • Unterscheidet zwischen Einfahrern, Durchfahrern und Ausfahrern mit jeweils unterschiedlichen Verhaltensweisen: <ul style="list-style-type: none"> ○ notwendiger Fahrstreifenwechsel nach rechts zur Vorbereitung des Ausfahrens (Lückensuche zwischen 1000m und 500m vor Ausfahrt) ○ notwendiger Fahrstreifenwechsel beim Einfahren, ebenso mit Lückensuche ○ Kooperatives Verhalten der Durchfahrenden an einer Einfahrt: • Abläufe bei Lückensuche und -aufweitung: <ul style="list-style-type: none"> ○ Lückenauswahl ○ Geschwindigkeits- und Abstandsanpassung ○ Unterstützung durch Folgefahrzeug auf Zielfahrstreifen • Berücksichtigung einer minimalen Verweildauer auf rechtem Fahrstreifen • Modell erlaubt, kurzzeitig auch kürzere als sonst als sicher geltende Abstände zu akzeptieren, nach Fahrstreifenwechsel wird Beschleunigung angepasst, bis ursprünglicher Wunschabstand wieder erreicht ist • in ursprünglicher Version von BABSIM genutzt und verbessert, um Verhalten von und Beeinträchtigungen durch Einfahrer realistischer abzubilden 	
Einschränkungen:	
<ul style="list-style-type: none"> • Lückenbeschleunigung und Kooperation nur an Anschlussstellen, aber nicht auf freier Strecke berücksichtigt, jedoch bei dichtem Verkehr auch dort beobachtbar [Ehm03] • In ursprünglicher Form unrealistische Beeinträchtigungen durch Einfahrer [Har07], auch sind Einfahrer weniger als in der Realität bemüht, in dieser Situation zum Vorausfahrenden aufzuschließen • Trotz Verbesserungen für BABSIM noch Probleme: <ul style="list-style-type: none"> ○ zweistreifige Anschlussstellentypen können nicht realistisch abgebildet werden, teils Abstürze der Simulationssoftware [Har07] ○ auch einstreifige Anschlussstellen mit unplausiblen Rückstaus am Ende des Beschleunigungstreifens und unplausiblen Manövern beim Einfädeln • Erweiterungen der (für BABSIM) implementierten Entscheidungsregeln aufwändig 	

Gipps (AIMSUN)		Fahrstreifenwechselmodell
beschrieben in:		
<ul style="list-style-type: none"> • [Gip86] (ursprüngliches Modell) • [TSS14] (Umsetzung in AIMSUN inkl. Parameter) 		
Wesentliche Charakteristika:		
<ul style="list-style-type: none"> • Modell mit Berücksichtigung sowohl freiwilliger (Überholen) als auch notwendiger Fahrstreifenwechsel • Unterscheidung von drei Zonen im Vorfeld von Verzweigungspunkten: <ul style="list-style-type: none"> ○ Zone 1: kein Einfluss der Fahrtroute; nur freiwillige Fahrstreifenwechsel ○ Zone 2: mittlerer Einfluss der Fahrtroute; Verwerfen von Fahrstreifenwechseln, die der aktuellen Fahrtroute entgegenstehen; Versuch, auf den zu nutzenden Fahrstreifen zu wechseln ○ Zone 3: hoher Einfluss der Fahrtroute; Fahrstreifenwahl ausschließlich durch Fahrtroute bestimmt; hohe Dringlichkeit des Fahrstreifenwechsels wird berücksichtigt • Freiwillige Fahrstreifenwechsel: <ul style="list-style-type: none"> ○ Wechsel nach links nur, wenn dort mit mindestens einer definierten Geschwindigkeitsdifferenz schneller gefahren werden kann [Det11] ○ Wechsel nach rechts, nur wenn dadurch höchstens mit einer definierten (niedrigeren) Geschwindigkeitsdifferenz langsamer gefahren werden muss • Ablauf des Fahrstreifenwechsels: <ul style="list-style-type: none"> ○ Auswahl Zielfahrstreifen ○ Prüfen auf Realisierbarkeit: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Lückenakzeptanz (prüfen, ob Lücke auf Zielfahrstreifen groß genug) ▪ Lückensuche (wenn in mittlerer Zone: Suche auch nach einer Lücke stromabwärts, Überholen der anderen Fahrzeuge bis zu dieser Lücke) ○ Bestimmung der Dringlichkeit des Fahrstreifenwechsels (3 Zonen) ○ Prüfung der Durchführbarkeit und Umsetzung • Verzögerung der nachfolgenden Fahrzeuge auf Zielfahrstreifen wird zugelassen • In AIMSUN Berücksichtigung unvorsichtigen Fahrstreifenwechselverhaltens möglich (lokal und fahrzeugbezogen); außerdem Berücksichtigung aggressiver Fahrstreifenwechsel 		
Parameter	empfohlene Werte/ Standard-Werte	Bemerkungen
Entfernung Zone 1/2	500..3000m [Gei17]	abhängig vom Ausfahrtstyp; teils unterschiedlich je Fahrbeziehung und Fahrstreifen [Gei17]
Entfernung Zone 2/3	200..1000m [Gei17]	
Variation der Entfernungszonen (%)	40 [Gei17]	
Sichtweite (Hindernisse)	200m (default)	
Fahrstreifenwechsel-Kooperation (Anteil kooperierender Fahrzeuge)	100 % (Fahrstreifenred.), 50..60 % (nach Fahrstr.- Red., an Einfahrten) [Gei17]	
Verzögerung kooperierender Fahrzeuge		
Aggressivität (Akzeptanz kleinerer Lücken)		

Erdmann (SUMO)		Fahrstreifenwechselmodell		
beschrieben in:				
<ul style="list-style-type: none"> • [Erd14] • [DLR18b] 				
Wesentliche Charakteristika:				
<ul style="list-style-type: none"> • Modell zur Berücksichtigung sowohl freiwilliger als auch notwendiger Fahrstreifenwechsel • Durchführung von Fahrstreifenwechselentscheidungen in folgenden Stufen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Bestimmung Wunschfahrstreifen ○ Neuberechnung der sicheren Geschwindigkeit ○ Berechnen Fahrstreifenwechselentscheidung ○ Durchführung Fahrstreifenwechselentscheidung • Berücksichtigung verschiedener Anforderungen (inkl. Route, Wunschgeschwindigkeit, Rechtsfahrgebot) bei der Bestimmung des Wunschfahrstreifens • Berechnung und Berücksichtigung der Dringlichkeit bei notwendigen Fahrstreifenwechseln • Einfluss des Fahrstreifenwechselmodells auch auf die Längsführung • Berücksichtigung kooperativen Verhaltens 				
Parameter		Werte- bereich	empf. Werte	Bemerkungen
lcStrategic	Bestreben, einen strategischen Fahrstreifenwechsel durchzuführen. Je höher der Wert, desto früher ein Fahrstreifenwechsel.	≥ 0	1,0	
lcCooperative	Bereitschaft, einen kooperativen Fahrstreifenwechsel zuzulassen. Je höher der Wert, desto eher findet Kooperation statt.	[0..1]	1,0	
lcSpeedGain	Bestreben, einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen, um die Geschwindigkeit zu erhöhen. Höhere Werte führen zu häufigeren Fahrstreifenwechseln	≥ 0	1,0	
lcKeepRight	Bestreben, das Rechtsfahrgebot einzuhalten. Höhere Werte führen zu früherem Fahrstreifenwechsel.	≥ 0	1,0	
lcLookaheadLeft	Faktor zur Festlegung der strategischen Erfassungsreichweite bei Fahrstreifenwechsel nach links (relativ zu Wechsel nach rechts)	> 0	2,0	
lcSpeedGainRight	Faktor zur Festlegung der Asymmetrie bei der Entscheidung, ob zum Überholen nach rechts oder nach links gewechselt werden soll. Standardmäßig wird eher nach links gewechselt. Der Wert 1,0 bedeutet, dass ein Wechsel nach rechts oder links gleich wahrscheinlich ist (Symmetrie).	> 0	0,1	

beschrieben in:

- [Har07] (Modell inkl. Umsetzung in BABSIM und Parametern)

Wesentliche Charakteristika:

- Fahrverhalten unterteilt in Teilbereiche (Aufgaben, Motivationen) bzgl. Fahrzeugfolge (Abstand halten) und Fahrstreifenwechsel
- Betrachtet sowohl freie Fahrstreifenwechsel (zum Überholen, Rechtsfahrgebot) als auch erzwungene Fahrstreifenwechsel (Route folgen) sowie kooperative Verhaltensweisen
- Einzelabsichten werden zunächst separat ermittelt und schließlich zu einem resultierenden Verhalten zusammengefasst:
 - Abstand halten: erweiteres Modell nach Wiedemann [Wie74], s.o.
 - Überholen: Fahrstreifenwechsel nach links, erweitertes Modell nach Sparmann [Spa78], mit Unterdrückung Überholwunsch vor Erreichen einer Fahrstreifenreduktion sowie Berücksichtigung von Ungeduld/Unzufriedenheit
 - Rechtsfahrgebot: Fahrstreifenwechselwunsch nach rechts nach Sparmann [Spa78], Reaktion auf Fahrstreifeneinzug analog zum Überholen; zusätzlich Beschleunigungsabsicht, um Rechts Überholen zu vermeiden
 - Seitenabstand: Veto gegen Fahrstreifenwechselwunsch, wenn nicht möglich
 - Route folgen: Notwendiger Fahrstreifenwechselwunsch, je nach Dringlichkeit auch Bremsen (Fahrstreifenende) bzw. Anpassung Beschleunigung durch Interaktion mit Vorderfahrzeug auf Zielfahrstreifen
 - Unterstützen (wird durch „Route folgen“ angefordert)
 - Abbremsen zum Vergrößern einer Lücke
 - Akzeptieren kleiner Folgeabstände
 - Fahrstreifenwechsel, um anderen Fahrzeugen das Einfädeln zu erleichtern
- Jedes Modul kann dreierlei Aktionen (oder eine Teilmenge davon) hervorrufen:
 - Fahrzeugbeschleunigung (positiv oder negativ)
 - Fahrstreifenwechsel nach links
 - Fahrstreifenwechsel nach rechts
- Je Modul und relevanter Aktion wird ein Grad der Unterstützung angegeben (-1: Ablehnung bis +1: Unterstützung);
- resultierende Entscheidung für Fahrstreifenwahl als geometrisches Mittel der Einzelbewertung, dadurch Veto bei bereits einer negativen Bewertung
- resultierende Entscheidung Beschleunigung als Minimum (normiert auf [-1,1], wird später mit max. Verzögerung bzw. Beschleunigung multipliziert)
- Entscheidung für eine Aktion dann, wenn resultierende Bewertung einen Schwellenwert übersteigt
- Berücksichtigt Trägheit/Gedächtnis (Istwert einer Absicht wird erst nach einigen Simulationsschritten den Sollwert erreichen, parametrierbar)

Parameter im Teilmodul „Abstand halten“: behandelt Steckbrief Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann (s.o.):		Wertebereich	Voreinstellung	Erfahrungswerte
Parameter im Teilmodul „Rechtsfahrgebot“ [Har07]:		Wertebereich	Voreinstellung	Erfahrungswerte
Traagheit Rechtsfahrgebot	Bestimmt die Trägheit, mit der Sollzustand (hier: Fahrstreifenwechsel) aus dem Teilmodell „Rechtsfahrgebot“ in die Bestimmung des Istzustands einfließt. Je niedriger, desto länger dauert es, bis der Sollzustand erreicht wird. Der Wert 2 bedeutet, dass der Sollzustand unmittelbar erreicht wird.	[0..2]	0,1	0,1; 1,0 in Verflechtungsbereichen [Gei17]
Distanz Fahrstreifensubtraktion	Abstand zu einer Fahrstreifensubtraktion, ab der ein Fahrstreifenwechselwunsch aufgrund Rechtsfahrgebot unterdrückt wird		500m	500m; 1500m Steigungen; teils geringer an Einfahrten [Gei17]
Toleranz Geschwindigkeit	Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs, unterhalb der Rechtsvorbeifahren zugelassen wird		60 km/h	
Toleranz Relativgeschwindigkeit	Differenzgeschwindigkeit zwischen dem eigenen und dem links angrenzenden Fahrstreifen für Rechtsvorbeifahren		5	
Parameter im Teilmodul „Route folgen“ [Har07]:		Wertebereich	Voreinstellung	Erfahrungswerte
Traagheit Route Folgen	Bestimmt die Trägheit, mit der Sollzustand aus dem Teilmodell „Route folgen“ in die Bestimmung des Istzustands einfließt. Je niedriger, desto länger dauert es, bis der Sollzustand erreicht wird. Der Wert 2 bedeutet, dass der Sollzustand unmittelbar erreicht wird.	[0..2]	0,5	0,1..1,0 [Gei17]
Distanz Normierung	bestimmt, ab welcher Entfernung vom Entscheidungspunkt ein Fahrstreifenwechselwunsch entsteht		600m	300..1000m [Gei17]
Interaktionsschwelle links	bestimmt, ab welcher Entfernung zum Verzweigungspunkt die Beeinflussung der Beschleunigung in Abhängigkeit des Vorausfahrenden auf dem Zielfahrstreifen aktiv wird		500m	
Interaktionsschwelle rechts	analog „Interaktionsschwelle rechts“		500m	250..500m [Gei17]
Komfordistanz			1000m	500..1000m [Gei17]
Kritische Zeitlücke links			5,0	

Kritische Zeitlücke rechts			3,0	3,0..8,0 [Gei17]
Unterstützungsschwelle	bestimmt, ab welcher Entfernung vom Entscheidungspunkt Unterstützung durch Fahrzeuge auf dem Zielfahstreifen angefordert wird		500m	250..600m [Gei17]
Parameter im Teilmodul „Seitenabstand“ [Har07]:		Wertebereich	Voreinstellung	Erfahrungswerte
MinTC	kleinste gerade noch zu berücksichtigende Zeitlücke bei der Bewertung der Möglichkeit eines Fahrstreifenwechsels, sowohl in Bezug zu Fahrzeug vorn als auch zu Fahrzeug hinten auf Zielfahstreifen		2,0	
MaxTC	größte Zeitlücke, die noch Einfluss auf die Bewertung der Möglichkeit des Fahrstreifenwechsels hat, sowohl in Bezug zu Fahrzeug vorn als auch zu Fahrzeug hinten auf Zielfahstreifen		4,0	
ToleranzHintenLinks	Maß, mit dem der Interaktionspartner hinten links bei einem Fahrstreifenwechsel beeinträchtigt werden darf (nur für diese Konstellation parametrierbar, sonst fest). Je kleiner, desto geringere Abstände werden toleriert und desto mehr wird Interaktionspartner beeinträchtigt.		2,5	
Parameter im Teilmodul „Überholen“ [Har07]:		Wertebereich	Voreinstellung	Erfahrungswerte
TraagheitUeberholen	Bestimmt die Trägheit, mit der Sollzustand aus dem Teilmodell „Überholen“ in die Bestimmung des Istzustands einfließt. Je niedriger, desto länger dauert es, bis der Sollzustand erreicht wird. Der Wert 2 bedeutet, dass der Sollzustand unmittelbar erreicht wird.	[0..2]	0,5	0,1..1,0 [Gei17]
TraagheitUeberholen Fahrstreifen2		[0..2]	0,1	0,1..0,8 [Gei17]
TraagheitUeberholen Fahrstreifen 3		[0..2]	0,01	0,01..0,1 [Gei17]
Distanz Fahrstreifeneinzug	Abstand zu einer Fahrstreifensubtraktion, ab der ein Fahrstreifenwechselwunsch aufgrund Überholen unterdrückt wird		500m	
Ungeduld	Ungeduld bei Überholentscheidungen von Pkw		20 m/s [Har07]	

Parameter im Teilmodul „Unterstützen“ [Har07]:		Wertebereich	Voreinstellung	Erfahrungswerte
TraegheitUnterstützen		[0..2]	1,0	
MinimalGeschwindigkeit			15	
Maximale Bremsverzögerung			-1,0	

Anhang 2: Bewertungsgrößen

Eine Tabelle mit potenziellen sowie für dieses Vorhaben ausgewählten Bewertungsgrößen, einschließlich einer qualitativen Einschätzung, welche Beeinflussung dieser Größen durch die Wirkungen einer Streckenbeeinflussungsanlage erwartet wird, ist hier einzusehen.

Bewertungsgröße	definiert oder genutzt in (Beispiele)	ableitbar aus			Wirkdimension				Szenario				Bemerkungen					
		empirischen Daten (Minutenintervall)	empirischen Daten (Einzelfahrzeugdaten)	Ausgabedaten der Simulation	Verkehrssicherheit	Verstärkung Verkehrsfluss	Aufmerksamkeit	Leistungsfähigkeit	Regelbefolgung	Harmonisierung	Stautrichter	Baustelle		Gefahrenwarnung	Lkw-Überholverbot			
Verkehrsfluss & Störungen (makroskopisch)	Störungshäufigkeit		x	x	x													
	Störungslänge		x	x	x													
	Störungsdauer		x	x	x													
	Verkehrsstärkedifferenzen aufeinanderfolgender Zeitintervalle	[Pap06]	x	x	x		x											
	Schwankung Verkehrsstärke (Abweichung von gleitendem Mittelwert)		x	x	x		x			x		x	x	x				
	Geschwindigkeitsdifferenzen aufeinanderfolgender Zeitintervalle		x	x	x		x											
	Schwankung Geschwindigkeit (Abweichung von gleitendem Mittelwert)																	
	Verkehrsdichtedifferenzen aufeinanderfolgender Zeitintervalle		x	x	x		x											
	Schwankung Verkehrsdichte (Abweichung von gleitendem Mittelwert)		x	x	x		x											
	Anzahl signifikanter Geschwindigkeitseinbrüche	[Pis03]	x	x	(x)	x	x			x							Anzahl signifikanter Geschwindigkeitseinbrüche möglicherweise in der Simulation nicht realistisch abbildbar	
	Intensität Geschwindigkeitsabfall bei Zusammenbruch		x	x	x	x						x						
	Zusammenbruchswahrscheinlichkeit		x	x	x					x								
	Zuverlässigkeit	[Fer88]	(x)	x	x					x								
Kapazität (max. empirische Verkehrsstärke)	[Sch03]	x	x	(x)					x		x	x				nur bewertbar, wenn Kapazitätsgrenze hinreichend oft erreicht wird		
kritische Verkehrsdichte		x	x	x					x									
Geschwindigkeitsverhalten	Geschwindigkeitsniveau	[Pis03]	x	x	x	(x)	x			x	x	x	x	x				
	Standardabweichung Geschwindigkeit (einzeln je Fahrstreifen)	[Ste02], [Ste03], [Kol06], [Rie15]	x	x	x	x	x				x	x	x	x				
	Standardabweichung Geschwindigkeit links	[Kap10], [Fer88]	x	x	x	x	x										in [Kap10] nur bei dreistreifigen Querschnitten angewendet	
	Befolungsgrad Geschwindigkeit	[Kap10]	x	x	x					x	x	x	x				nicht Bewertung, aber in Validierung einbeziehen	
	Befolungsindex Geschwindigkeit	[Ste03], [Kap10]	x	x	x					x							in ursprünglicher Quelle bezeichnet als Akzeptanzindex; in [Kap10] bezogen auf äußerst linken Fahrstreifen, Wertebereich [0..1]	
	Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Fahrstreifen	[Pis03], [Kap10]	x	x	x	x	x											
	Geschwindigkeitsdifferenzen aufeinanderfolgender Fahrzeuge	[Kap10]		x	x	x											in [Kap10] bezeichnet als Relativgeschwindigkeit	
Geschwindigkeitsschwankungen im Fahrtverlauf				x	x	x												
Zeit	Fahrtzeit			(x)		x			x								keine Datengrundlage für Kalibrierung und Validierung	
	Verlustzeit			(x)		x											keine Datengrundlage für Kalibrierung und Validierung; Referenzfall zu definieren	
Abstandsverhalten (zeitlich/ räumlich)	Mittlere Nettozeitlücke		x	x	x	x		x		x	x	x	x	x			Zeit- und Weglücken werden in der Simulation tendenziell überschätzt [Bev11]	
	Standardabweichung Nettozeitlücke			x	x	x	x					x	x				Qualitätssicherung der Datengrundlage wichtig; ggf. sehr kleine Lücken ausblender	
	Anteil kritischer Nettozeitlücken			(x)	(x)	x				x							Qualitätssicherung der Datengrundlage wichtig; kritische Zeitlücken lassen sich in der Simulation u.U. nicht realistisch abbilden [Hof13] [Bev11]	
	Mittlerer Nettoabstand		x	x	x	x		x		x							Zeit- und Weglücken werden in der Simulation tendenziell überschätzt [Bev11]	
	Standardabweichung Nettoabstand			x	x	x	x										Qualitätssicherung der Datengrundlage wichtig; ggf. sehr kleine Abstände ausblender	
	Anteil kritischer Nettoabstände			(x)	(x)	x				x							Qualitätssicherung der Datengrundlage wichtig; kritische Abstände lassen sich in der Simulation u.U. nicht realistisch abbilden [Hof13] [Bev11]	
	Mittlere Auffahrzeit (Time to Collision)	[Pha07], [Bev11]		x	x	x		x				x	x	x				
	Anteil kritischer Auffahrzeiten	[Ste02], [Ste03], [Hof13]		(x)	(x)	x												kritische Auffahrzeiten lassen sich in der Simulation u.U. nicht realistisch abbilden [Hof13] [Bev11]
	Time Exposed TTC (TET)	[Hof13]			(x)	x												Zeit, in denen eine Fahrer-Fahrzeug-Einheit kritischen TTC ausgesetzt ist, Einschränkungen bzgl. kritischer Auffahrzeiten gelten auch hier
	Time Integrated TTC (TIT)	[Hof13]			(x)	x												Indikator, der neben Zeit auch Intensität kritischer TTC einbezieht, Einschränkungen bzgl. kritischer Auffahrzeiten gelten auch hier
	Individual Braking Time Risk	[Pha07], [Bev11]		x	x	x					x	x	x	x	x			Kenngroße bzgl. Risiko eines Auffahrunfalls bei plötzlichem Halt des Führungsfahrzeugs
	Compensated Individual Braking Time Risk	[Mag10] [Mou08]		x	x	x					x	x	x	x	x			
	Platoon Braking Time Risk	[Pha07], [Bev11]		x	x	x					x	x	x	x	x			
Compensated Platoon Braking Time Risk	[Mou08]		x	x	x					x	x	x	x	x				Aufsummierte Wahrscheinlichkeit eines Auffahrunfalls bei plötzlichem Halt eines Fahrzeugs im Pulk
Fahrstreifenwahl	Fahrstreifenaufteilung	[Pis03]	x	x	x		x										nur differenziert nach Querschnittstyp (Anzahl Fahrstreifen) interpretierbar	
	Fahrstreifenaufteilung links/mitte	[Kap10]	x	x	x		x										nur bei dreistreifigen Querschnitten definiert	
	Gleichmäßigkeit Fahrstreifenauslastung	(eigene Definition)	x	x	x		x			x							eigener Indikator, unabhängig von Querschnittstyp anwendbar	
	Schwerpunktlage Fahrstreifenauslastung	(eigene Definition)	x	x	x		x			x							eigener Indikator, unabhängig von Querschnittstyp anwendbar	
	Befolungsgrad Lkw-Überholverbot	[Kap10]	(x)	(x)	x					x							Bei Fahrzeugklassifizierung in 2+0 Klassen nicht bestimmbar, da nicht alle Fahrzeuge der Klasse "Lkw-ähnlich" vom Überholverbot betroffen sind	
	Befolungsindex Lkw-Überholverbot	[Kap10]	(x)	(x)	x					x							Bei Fahrzeugklassifizierung in 2+0 Klassen nicht bestimmbar, da nicht alle Fahrzeuge der Klasse "Lkw-ähnlich" vom Überholverbot betroffen sind	
Anzahl Fahrstreifenwechsel				(x)		x											keine Datengrundlage für Kalibrierung und Validierung	
zusammen- gesetzte Indikatoren	Befolungsindex	[Kap10]	x	x	x					x							vereinigt Befolgung sowohl von Geschwindigkeitsbeschränkung als auch von Lkw-Überholverbot	
	Harmonisierungsindex	[Kap10]	x	x	x		x										in [Kap10] nur bei dreistreifigen Querschnitten angewendet; Wertebereich [0..1]; verknüpft Standardabw. Geschwindigkeit links und Fahrstreifenaufteilung links	
	Wirkungsindex	[Kap10]	x	x	x		x			x							verknüpft Befolungsindex und Harmonisierungsindex; nur in Bezug auf Harmonisierungswirkung	

	Bewertungsgröße	Wirkdimension					Erwartete Wirkungen durch SBA (im Vergleich zu einer vergleichbaren Situation ohne SBA)	
		Verkehrssicherheit	Verstetigung Verkehrsfluss	Aufmerksamkeit	Leistungsfähigkeit	Regelbefolgung		
Verkehrsfluss & Störungen (makroskopisch)	Störungshäufigkeit				x		Es wird erwartet, dass durch präventive SBA-Maßnahmen die Störungshäufigkeit, Störungslänge und Störungsdauer verringert werden kann, indem der Verkehr nahe der Kapazitätsgrenze stabil gehalten und Geschwindigkeitseinbrüche vermieden werden können.	
	Störungslänge				x			
	Störungsdauer				x			
	Verkehrsstärkedifferenzen aufeinanderfolgender Zeitintervalle		x				Es wird erwartet, dass bei dichtem, aber noch ungestautem Verkehr die Schwankungen der Verkehrsstärke verringert werden können. Zum Einen werden Geschwindigkeitseinbrüche vermieden oder in ihrer Intensität vermindert, die oft auch mit einem Abfall der Verkehrsstärke verbunden sind. Auch können Pulks entzerrt oder die Pulkbildung vermieden werden, etwa Pulks hinter überholenden Lkw.	
	Schwankung Verkehrsstärke (Abweichung von gleitendem Mittelwert)		x					
	Geschwindigkeitsdifferenzen aufeinanderfolgender Zeitintervalle		x				vgl. Standardabweichung Geschwindigkeit (s.u.)	
	Schwankung Geschwindigkeit (Abweichung von gleitendem Mittelwert)		x					
	Verkehrsdichtedifferenzen aufeinanderfolgender Zeitintervalle		x				Es wird erwartet, dass sowohl durch Geschwindigkeitsbeschränkungen bei Gefahrenwarnung als auch durch präventive SBA-Maßnahmen die Häufigkeit von signifikanten Geschwindigkeitsabfällen verringert werden kann. Bei präventiven Schaltungen im dichten Verkehr wird davon ausgegangen, dass durch die Harmonisierung des Verkehrsflusses die Häufigkeit und Auswirkung von Fahrstreifenwechseln und abrupten Bremsmanövern abnimmt, so dass etwaige Geschwindigkeitseinbrüche vermieden werden können.	
	Schwankung Verkehrsdichte (Abweichung von gleitendem Mittelwert)		x					
	Anzahl signifikanter Geschwindigkeitseinbrüche	x	x		x			
	Intensität Geschwindigkeitsabfall bei Zusammenbruch	x					vgl. Anzahl signifikanter Geschwindigkeitseinbrüche	
	Zusammenbruchswahrscheinlichkeit				x			
	Zuverlässigkeit					x	Es wird erwartet, dass unter Umständen die max. empirische Verkehrsstärke eines Streckenabschnitts durch präventive Schaltungen einer SBA (zul. Höchstgeschwindigkeit, Lkw-Überholverbote) leicht erhöht werden kann. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei hohen Verkehrsstärken nahe der Kapazitätsgrenze Zusammenbrüche vermieden werden. Hierbei ist anzumerken, dass diese Wirkung in vielen Untersuchungen nicht bestätigt werden konnte, und dass eine SBA nicht primär auf die Erhöhung der Streckenkapazität abzielt.	
Kapazität (max. empirische Verkehrsstärke)				x				
kritische Verkehrsdichte				x				
Geschwindigkeitsverhalten	Geschwindigkeitsniveau	(x)	x		x		Es wird erwartet, dass in Gefahrensituationen durch eine Gefahrenwarnung der SBA (i.d.R. in Verbindung mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit) die mittlere Geschwindigkeit verringert werden kann. Hierdurch kann vermieden werden, dass Verkehrsteilnehmer bei Erreichen der Gefahrenstelle (z.B. Stauende) mit plötzlichen und abrupten Manövern reagieren müssen. Auf der anderen Seite wird erwartet, dass das Geschwindigkeitsniveau bei dichtem Verkehr durch präventive SBA-Maßnahmen (Geschwindigkeitsbeschränkungen, Lkw-Überholverbote) signifikant angehoben werden kann. Dies wird erreicht durch die Stabilisierung des Verkehrs an der Kapazitätsgrenze und somit durch die Vermeidung von Geschwindigkeitseinbrüchen.	
	Standardabweichung Geschwindigkeit (einzeln je Fahrstreifen)	x	x				Es wird erwartet, dass durch eine Geschwindigkeitsbeschränkung der SBA die Steuerung der individuellen Geschwindigkeiten verringert werden kann. Insbesondere wird die Häufigkeit extrem hoher Geschwindigkeiten verringert. Bei präventiven SBA-Maßnahmen können außerdem langsamere Verkehrsteilnehmer veranlasst werden, ihre Fahrgeschwindigkeit nach oben anzupassen. Dies trägt zur Verstetigung des Verkehrsflusses bei. Eine verringerte Streuung der Fahrgeschwindigkeiten kann auch als Indiz für einen sichereren Verkehrsablauf gesehen werden.	
	Standardabweichung Geschwindigkeit links	x	x				Die Befolgung einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit ist stark abhängig von der wahrgenommenen bzw. wahrnehmbaren Fahrsituation. Es wird vermutet, dass durch gleichzeitige Anzeige einer (plausiblen) Gefahrenwarnung die Befolgung verbessert werden kann.	
	Befolungsgrad Geschwindigkeit					x		
	Befolgungsindex Geschwindigkeit					x	Es wird erwartet, dass durch eine Geschwindigkeitsbeschränkung der SBA Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen einzelnen Fahrstreifen verringert werden können (sofern die zulässige Höchstgeschwindigkeit für alle Fahrstreifen gleich ist). Eine Angleichung der Geschwindigkeiten würde sich bei dichtem Verkehr ohnehin einstellen, jedoch wird erwartet, dass dies durch entsprechende Maßnahmen früher geschieht und dass insbesondere auch bei schwachem und mäßigem Verkehr sehr starke Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Fahrstreifen vermieden werden können. Dies erleichtert Fahrstreifenwechsel, was insbesondere in Verflechtungsbereichen zur Verstetigung des Verkehrsflusses beiträgt. Gleichzeitig wird angenommen, dass die Häufigkeit aggressiver und gefährlicher Fahrstreifenwechsel ab- und die Kooperationsbereitschaft beim Fahrstreifenwechsel zunimmt.	
	Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Fahrstreifen	x	x					
	Geschwindigkeitsdifferenzen aufeinanderfolgender Fahrzeuge	x						vgl. Standardabweichung Geschwindigkeit
	Geschwindigkeitsschwankungen im Fahrtverlauf	x	x				vgl. Standardabweichung Geschwindigkeit. Es ist anzumerken, dass Geschwindigkeitsschwankungen im Fahrtverlauf zwar in der Simulation bestimmt, aber nicht mit Hilfe der Verkehrsdaten kalibriert und validiert werden können.	
Zeit	Fahrtzeit		x		x		Es wird ein ähnlicher Effekt wie für das Geschwindigkeitsniveau erwartet: bei Gefahrenwarnung wird die Fahrtzeit (geringfügig) erhöht. Bei dichtem Verkehr können durch präventive SBA-Maßnahmen Geschwindigkeitseinbrüche vermieden und somit die Fahrtzeit und eventuelle Verlustzeiten verringert werden.	
	Verlustzeit		x					
eiten (zeitlich/ räumlich)	Mittlere Nettozeitlücke	x		x	x		Es wird erwartet, dass der Einfluss einer SBA-Maßnahme auf die mittlere Zeitlücke (oder auch den mittleren Abstand) nur gering ist und je nach Situation unterschiedlich ausgeprägt sein kann. Bei Gefahrenwarnung (und ausreichender Akzeptanz durch die Verkehrsteilnehmer) wird vermutet, dass im Zuge einer vorausschauenden, aufmerksamen Fahrweise größere Abstände gewählt werden. Durch die Harmonisierung des Verkehrsflusses können u.U. Pulks entzerrt oder Zusammenbrüche vermieden und damit ebenfalls die mittlere Zeit- oder Weglücke angehoben werden. Auf der anderen Seite kann eine Verstetigung des Verkehrs und damit ein gleichmäßigerer Geschwindigkeitsverlauf ohne Stauwellen auch dazu beitragen, dass Verkehrsteilnehmer geringere Abstände wählen. Einflüsse der SBA-Steuerung auf die mittlere Zeitlücke sind jedoch interessant für die Kalibrierung des Abstandsverhaltens in der Simulation und sollten daher untersucht werden.	
	Standardabweichung Nettozeitlücke	x	x				Es wird erwartet, dass durch den Einfluss einer SBA die Streuung der Zeitlücken verringert werden kann, unabhängig davon, ob ein positiver oder negativer Effekt auf die mittlere Nettozeitlücke gegeben ist.	
	Anteil kritischer Nettozeitlücken	x				x	Es wird erwartet, dass durch den Einfluss einer SBA der Anteil kritischer Zeitlücken und Abstände reduziert werden kann. Dies lässt sich vor allem durch eine Harmonisierung des Verkehrsflusses und eine Vermeidung von Geschwindigkeitseinbrüchen nahe der Kapazitätsgrenze begründen. Hierbei ist anzumerken, dass die Einstufung einer Zeitlücke als kritisch nicht auf Grundlage eines pauschalen Grenzwertes, sondern in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit erfolgen sollte. Außerdem ist zu beachten, dass a) die Nachbildung sehr kleiner Zeitlücken in den auf Kollisionsfreiheit ausgelegten Fahrzeugfolgmodellen nicht realistisch möglich ist und dass b) sehr kleine Zeitlücken in den Einzelfahrzeugdaten häufig auch auf Erfassungsfehler zurückzuführen sind.	
	Mittlerer Nettoabstand	x		x	x			vgl. mittlere Nettozeitlücke
	Standardabweichung Nettoabstand	x	x					vgl. Standardabweichung Nettozeitlücke
	Anteil kritischer Nettoabstände	x				x		vgl. Anteil kritischer Nettozeitlücken

	Bewertungsgröße	Wirkdimension					Erwartete Wirkungen durch SBA (im Vergleich zu einer vergleichbaren Situation ohne SBA)
		Verkehrssicherheit	Verstetigung Verkehrsfluss	Aufmerksamkeit	Leistungsfähigkeit	Regelbefolgung	
Abstandsverhältnisse	Mittlere Auffahrzeit (Time to Collision)	x		x			Es wird erwartet, dass durch den Einfluss einer SBA die mittlere Auffahrzeit steigt, da Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen reduziert werden (vgl. Standardabweichung Geschwindigkeit). Bei Gefahrenwarnungen wird durch den Geschwindigkeitstrichter die Annäherung an einen Gefahrenbereich homogener, so dass die in die TTC einfließende Geschwindigkeitsdifferenz bei Annäherung an ein vorausfahrendes, langsames Fahrzeug geringer ausfällt. Durch die präventive Harmonisierung des Verkehrsflusses werden Situationen mit Annäherung an ein langsames vorausfahrendes Fahrzeug einerseits seltener, andererseits ebenfalls durch eine geringere Geschwindigkeitsdifferenz gekennzeichnet sein.
	Anteil kritischer Auffahrzeiten	x					Es wird erwartet, dass durch den Einfluss einer SBA der Anteil kritischer Auffahrzeiten sinkt (vgl. Mittlere Auffahrzeit).
	Time Exposed TTC (TET)	x					
	Time Integrated TTC (TIT)	x					
	(Compensated) Individual Braking Time Risk	x					Die Individual Braking Time Risk wird beeinflusst durch die eigene Fahrgeschwindigkeit und den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. Da die Auswirkung einer SBA-Steuerung auf die Geschwindigkeits- und Abstandwahl sehr unterschiedlich sein kann, wird auch der Einfluss der SBA auf das IBTR (und das darauf aufbauende PBTR) unterschiedlich sein. Es wird vermutet, dass bei Geschwindigkeitsbeschränkungen mit Gefahrenwarnung, die eine Verringerung der mittleren Geschwindigkeit und eine Erhöhung der Aufmerksamkeit zur Folge haben, das IBTR verringert werden kann. Auch durch das Entzerren von dichten Fahrzeugpuls könnte das IBTR sinken. Bei dichtem Verkehr könnte durch Verstetigung des Verkehrsflusses und die dadurch höheren Geschwindigkeiten bei gleichzeitig verringerten Abständen die IBTR auch erhöht werden.
(Compensated) Platoon Braking Time Risk	x						
Fahrstreifenwahl	Fahrstreifenaufteilung		x				Es wird angenommen, dass durch eine Geschwindigkeitsbeschränkung der SBA insbesondere bei dichtem Verkehr eine gleichmäßigere Fahrstreifenaufteilung und insbesondere eine bessere Ausnutzung des oder der rechten Fahrstreifen erreicht werden kann. Dies beruht auf der Annahme, dass Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Fahrstreifen durch die SBA-Maßnahme verringert werden können.
	Fahrstreifenaufteilung links/mitte		x				
	Gleichmäßigkeit Fahrstreifenauslastung		x				
	Schwerpunktlage Fahrstreifenauslastung		x				
	Befolgungsgrad Lkw-Überholverbot					x	Es wird angenommen, dass die Befolgung eines Lkw-Überholverbotes sehr stark von nicht erfassbaren, teils individuellen Faktoren abhängt. Ein hoher Lkw-Anteil bei Vorhandensein ausreichender Lücken auf dem (ersten) Überholfahrstreifen kann zu Missachtungen des Lkw-Überholverbots beitragen. Auch bei dichtem Verkehr mit ähnlichen Geschwindigkeiten zwischen den Fahrstreifen (und zwischen Pkw und Lkw) könnten Verstöße häufiger vorkommen. Zu beachten ist, dass die Befolgung eines Lkw-Überholverbots aus der typischerweise vorliegenden Kurzzeit-Datenerfassung mit 2+0 Fahrzeugklassen nicht genau ermittelt werden kann, da einige der Klasse "Lkw-ähnlich" zugeordnete Fahrzeuge nicht von einem Lkw-Überholverbot betroffen sind.
Befolgungsindex Lkw-Überholverbot					x		
Anzahl Fahrstreifenwechsel		x					Es wird angenommen, dass durch eine Geschwindigkeitsbeschränkung der SBA die Häufigkeit von Fahrstreifenwechseln, insbesondere solchen zum Einleiten eines Überholmanövers, deutlich reduziert werden kann. Dies beruht auf der Annahme, dass die Geschwindigkeiten zwischen den Fahrstreifen sowie Geschwindigkeitsstreuung und -differenzen innerhalb eines Fahrstreifens durch die SBA-Maßnahme abnimmt. Im Falle einer besseren Ausnutzung des Hauptfahrstreifens können jedoch auch zusätzliche Fahrstreifenwechsel zur Einhaltung des Rechtsfahrgebots und anschließend zum Überholen hinzukommen. Es ist zu beachten, dass die Häufigkeit von Fahrstreifenwechseln zwar in der Simulation bestimmt, aber nicht mit Hilfe der Verkehrsdaten kalibriert und validiert werden kann.
zusammengesetzte Indikatoren	Befolgungsindex					x	
	Harmonisierungsindex		x				
	Wirkungsindex		x			x	

Anhang 3: Zusammenhänge Fahrsituation/Empirisches Verhalten

Verwendete Szenarien:

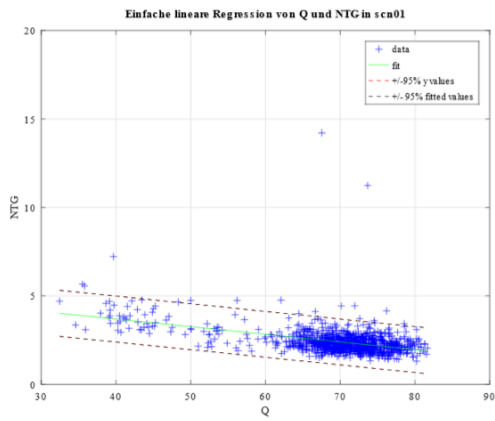
Bezeichnung	Querschnittstyp	Zul. Höchstgeschw. Anzeigequerschnitt stromaufwärts	Zul. Höchstgeschw. Anzeigequerschnitt lokal	Warnungen Anzeigequerschnitt lokal
Scn01	3-streifig	100 km/h	100 km/h	keine
Scn02	2-streifig	100 km/h	100 km/h	keine
Scn03	3-streifig	100 km/h	80 km/h	keine
Scn04	2-streifig	100 km/h	80 km/h	keine
Scn05	3-streifig	80 km/h	80 km/h	keine
Scn06	2-streifig	80 km/h	80 km/h	keine
Scn07	3-streifig	130 km/h	130 km/h	keine
Scn08	2-streifig	130 km/h	130 km/h	keine
Scn09	3-streifig	100 km/h	60 km/h	Stauwarnung
Scn10	2-streifig	100 km/h	60 km/h	Stauwarnung
Scn11	3-streifig	passiv	passiv	keine
Scn12	2-streifig	passiv	passiv	keine
Scn15	3-streifig	80 km/h	100 km/h	keine
Scn16	2-streifig	80 km/h	100 km/h	keine

Beispiel 1: Zusammenhang Verkehrsstärke (Q) → Nettozeitlücke (NTG)

- Signifikanter Zusammenhang mit negativer Korrelation
- Zusammenhang ähnlich ausgeprägt über verschiedene Szenarien, jedoch in einzelnen Szenarien auch geprägt durch starke Streuung
- Bei restriktiver Schaltung teils nur wenige Datenpunkte im Bereich niedriger Verkehrsstärken (insb. Scn05/Scn06, zul. Höchstgeschw. 80 km/h), dennoch Zusammenhang erkennbar
- Szenarien betreffen verschiedene Verkehrsstärkekassen, z.B. passive Anzeige: nur niedrige Verkehrsstärken, dagegen bei Anzeige einer zul. Höchstgeschwindigkeit höhere Verkehrsstärken (Verkehrsstärke ist Aktivierungskriterium) → situationsdifferenzierte Modellierung der Zusammenhänge im Gaußschen Bayesschen Netz gerechtfertigt
- Im Szenario passiv: Normalverteilung Residuen um Regressionsgerade nicht gegeben; Einfluss Wertebeschränkung (keine negativen Werte)

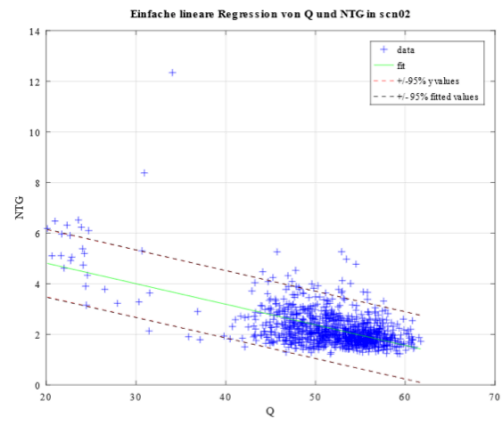
Fazit: Zusammenhang wurde in Modell belassen, da für die meisten Szenarien (außer passiv) plausibel und stabil (jedoch kein Einfluss auf Simulationsparameter)

Scn01:



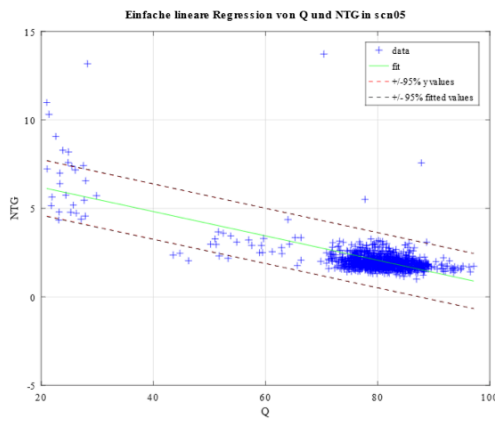
Korrelationskoeffizient: -0,5944

Scn02:



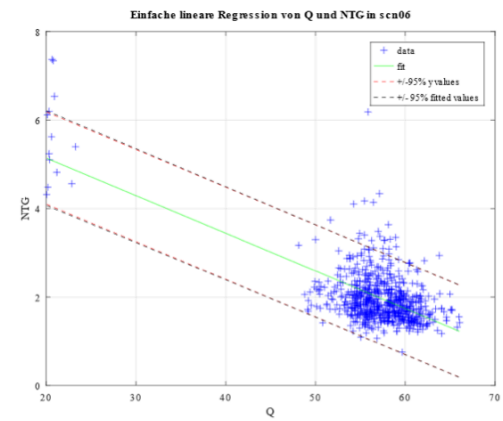
Korrelationskoeffizient: -0,6241

Scn05:



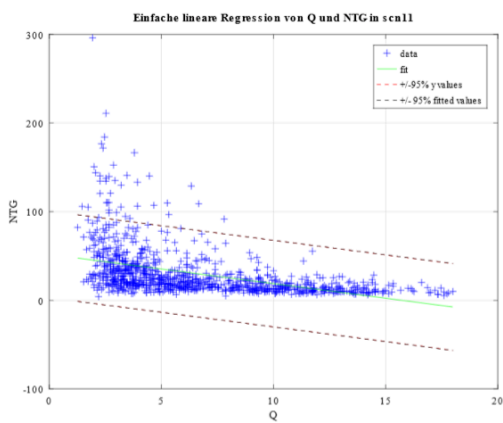
Korrelationskoeffizient: -0,7558

Scn06:



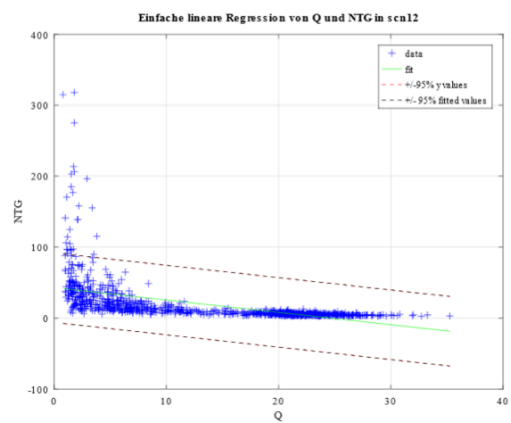
Korrelationskoeffizient: -0,6822

Scn11:



Korrelationskoeffizient: -0,4377

Scn12:



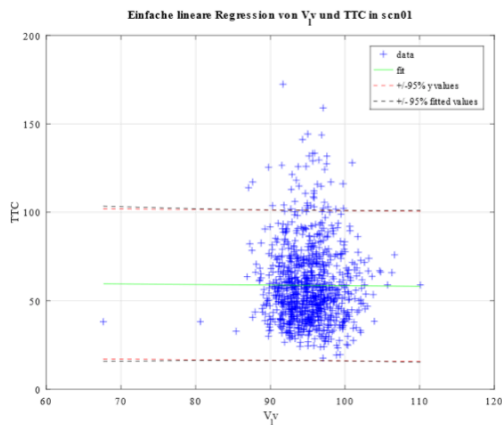
Korrelationskoeffizient: -0,5270

Beispiel 2: Zusammenhang Geschwindigkeitsniveau (V_{lv}) → Auffahrzeit (TTC)

- kein signifikanter Zusammenhang, Korrelationskoeffizient nahe 0 in den meisten Szenarien
- Korrelationskoeffizient unterscheidet sich erheblich zwischen Szenarien (inkl. Vorzeichen)
- Sehr starke Streuung innerhalb eines Szenarios

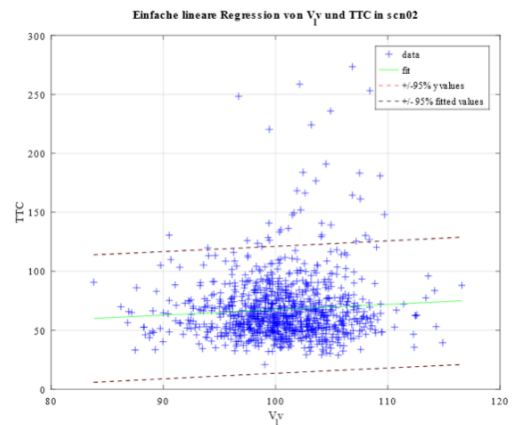
Fazit: Zusammenhang aus Modell entfernt; Knoten TTC wird im Modell nicht mehr berücksichtigt (Eignung als Bewertungsgröße jedoch davon unabhängig)

Scn01:



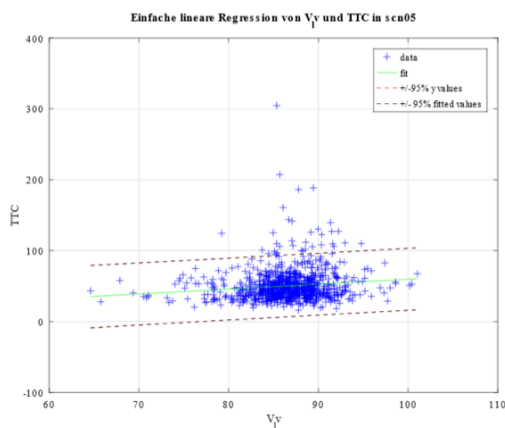
Korrelationskoeffizient: 0,0277

Scn02:



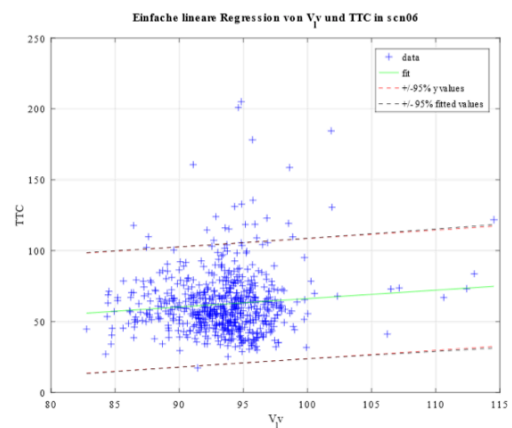
Korrelationskoeffizient: 0,0919

Scn05:



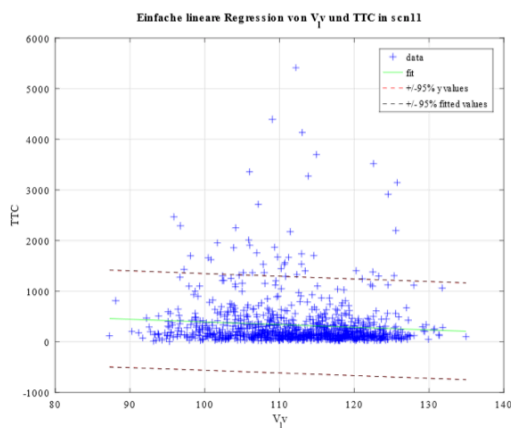
Korrelationskoeffizient: 0,1432

Scn06:



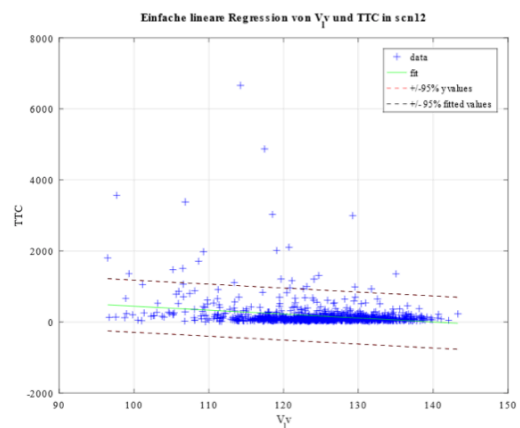
Korrelationskoeffizient: 0,0985

Scn11:



Korrelationskoeffizient: -0,1671

Scn12:



Korrelationskoeffizient: -0,1778

Anhang 4: Einfluss Simulationsparameter auf Abstandsverhalten

Im Zuge der Überprüfung und Revision der Netztopologie im Verhaltensmodell für konventionelle (d.h. nicht-automatisierte) Fahrzeuge wurde untersucht, ob bestimmte Simulationsparameter einen Einfluss auf das empirisch erfasste Abstandsverhalten (inkl. des damit verbundenen Risikos) haben. Dazu wurden die Parameter

Wunschbeschleunigung (Pkw),

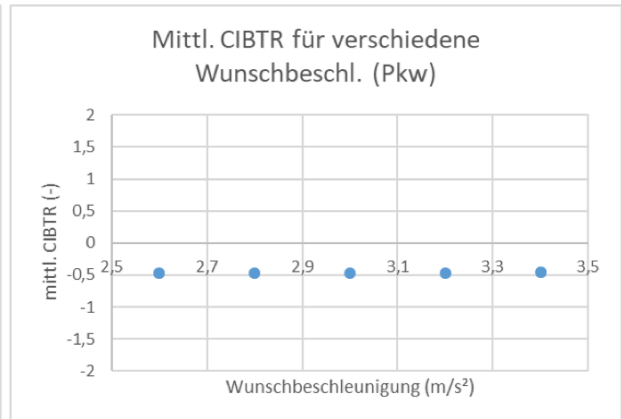
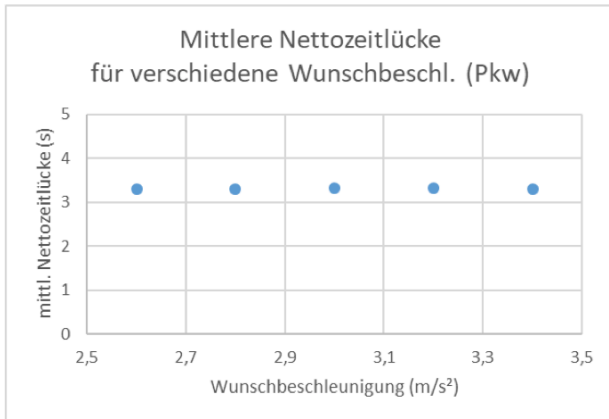
- normale Wunschverzögerung (Pkw),
- Mindest-Zeitlücke (Pkw und Lkw) sowie
- Sensitivity Factor

variiert und der Einfluss auf die mittleren Nettozeitlücken sowie das Compensated Individual Braking Time Risk (CIBTR) untersucht (jeweils für 2-streifige und 3-streifige Querschnitte). Dabei wurden nur Zeiträume einbezogen, in denen die Verkehrsstärke im jeweiligen Fahrstreifen zwischen 15 und 20 Kfz/min betrug. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Untersuchung wiedergegeben. Die Vorgehensweise ist in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschrieben.

Soweit nicht im Rahmen der Untersuchung wie angegeben variiert, wurden die Parameter der kalibrierten Referenzstrecke A92 genutzt. Es wurden nur Mittelwerte variiert, Standardabweichungen sowie Minimum- und Maximumwerte der Verteilungen wurden nicht angepasst. Eine Ausnahme bildet der Parameter Sensitivity Factor: Hier wird standardmäßig keine Streuung um den Standardwert zugelassen; in den untersuchten Varianten wurde jedoch abweichend eine geringe Standardabweichung von 0,05 angesetzt.

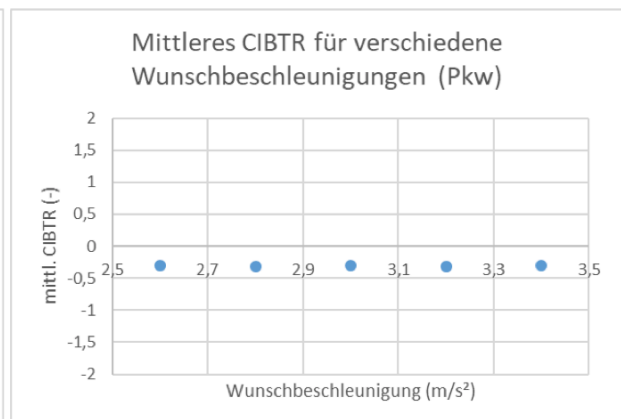
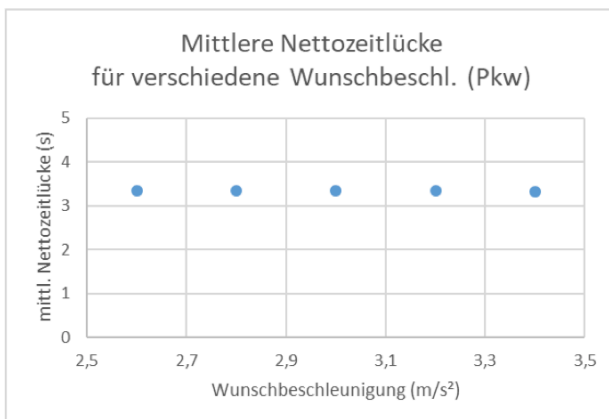
Wunschbeschleunigung Pkw, dreistreifige Querschnitte:

Wunschbeschl. Pkw Mittel (m/s ²)	Mittlere Nettozeitlücke (s)	CIBTR	Anzahl Einzelfahrzeuge
2,6	3,2948	-0,4688	13.242
2,8	3,3063	-0,4706	12.899
3,0	3,3179	-0,4744	13.137
3,2	3,3243	-0,4758	12.719
3,4	3,3061	-0,4556	13.235



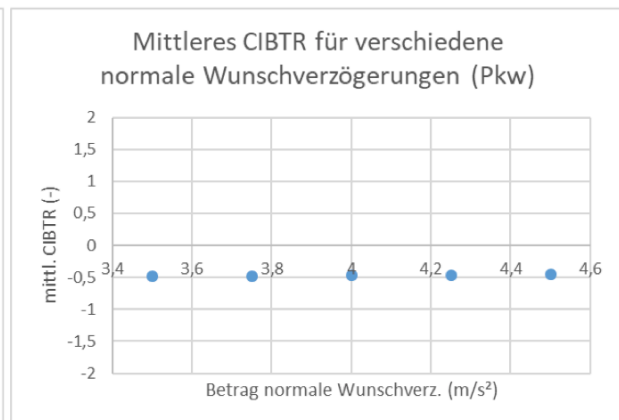
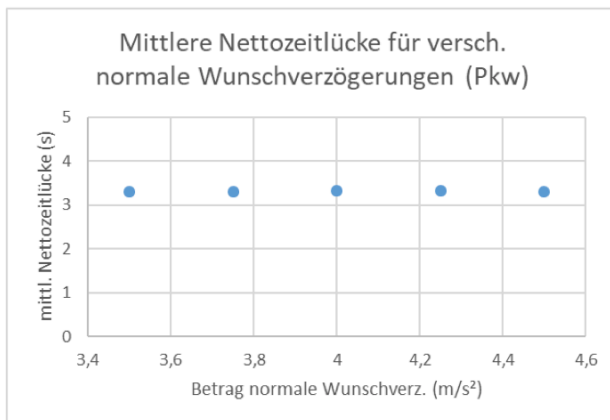
Wunschbeschleunigung Pkw, zweistreifige Querschnitte:

Wunschbeschl. Pkw Mittel (m/s ²)	Mittlere Nettozeitlücke (s)	CIBTR	Anzahl Einzelfahrzeuge
2,6	3,3522	-0,3014	7.146
2,8	3,3479	-0,3134	6.414
3,0	3,3584	-0,3050	6.865
3,2	3,3431	-0,3093	6.830
3,4	3,3303	-0,3028	6.605



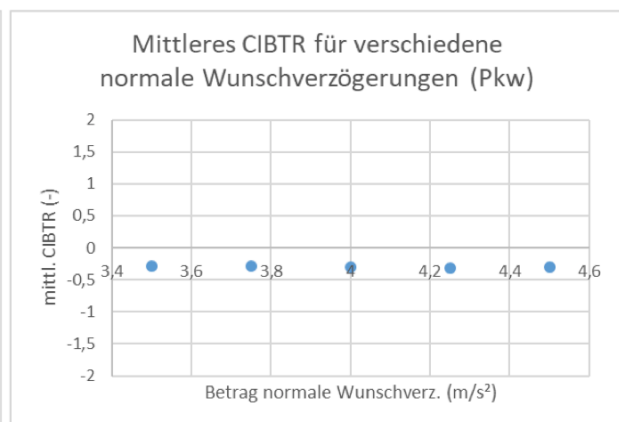
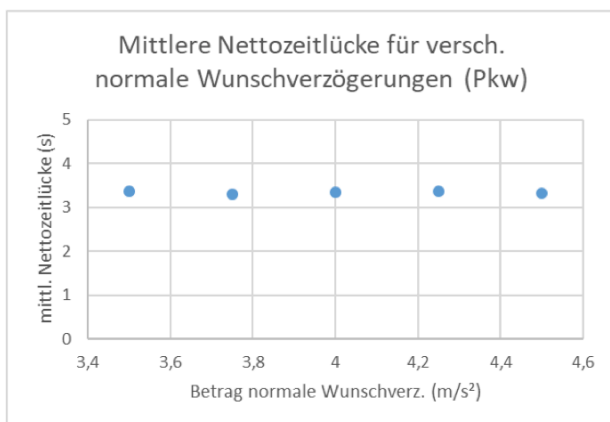
Normale Wunschverzögerung Pkw, dreistreifige Querschnitte:

Normale Wunschverzögerung Pkw Mittel (m/s ²)	Mittlere Nettozeitlücke (s)	CIBTR	Anzahl Einzelfahrzeuge
-3,50	3,2962	-0,4786	13.241
-3,75	3,3098	-0,4775	12.866
-4,00	3,3179	-0,4744	13.137
-4,25	3,3262	-0,4721	13.131
-4,50	3,2956	-0,4589	13.757



Normale Wunschverzögerung Pkw, zweistreifige Querschnitte:

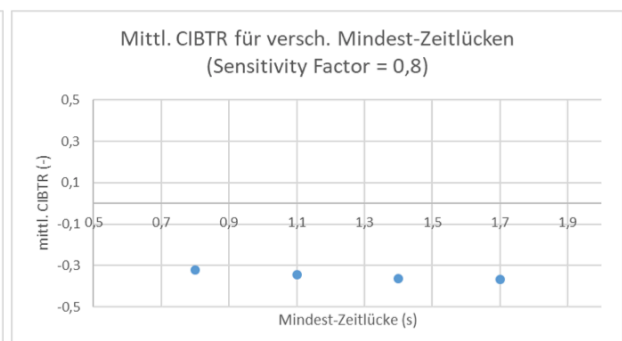
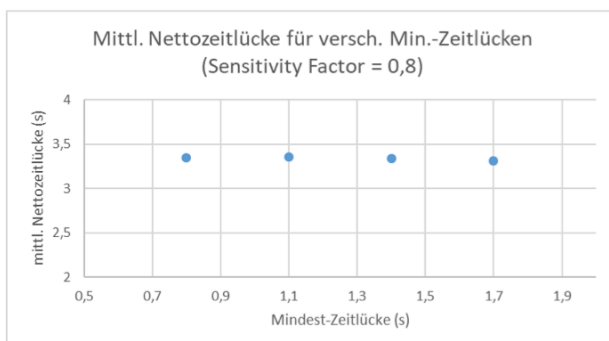
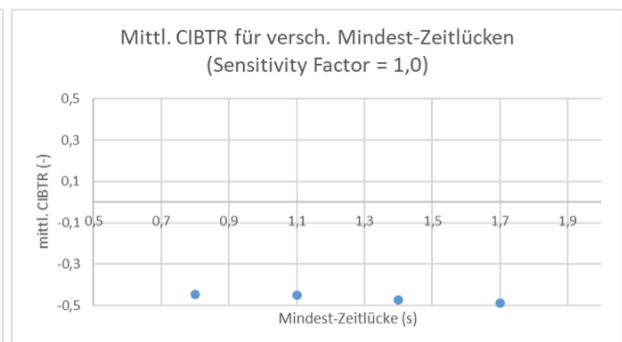
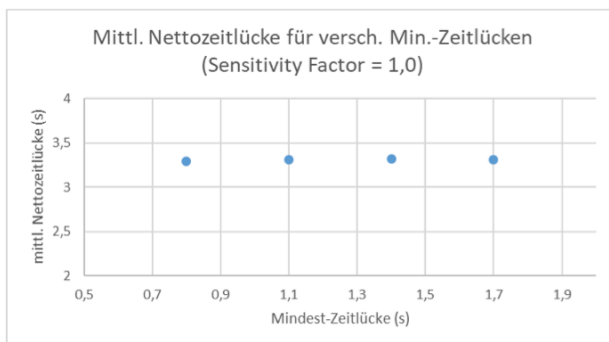
Normale Wunschverzögerung Pkw Mittel (m/s ²)	Mittlere Nettozeitlücke (s)	CIBTR	Anzahl Einzelfahrzeuge
-3,50	3,3598	-0,2804	7.226
-3,75	3,3142	-0,2892	6.763
-4,00	3,3584	-0,3050	6.865
-4,25	3,3656	-0,3145	7.413
-4,50	3,3323	-0,3089	7.111



Mindest-Zeitlücke Pkw, dreistreifige Querschnitte:

Die Untersuchung wurde zunächst unter Beibehaltung des Standard-Wertes des Sensitivity-Factor von 1,0 (ohne Streuung) durchgeführt. Da sich zeigte, dass mit einem niedrigeren Sensitivity Factor eine bessere Anpassung insbesondere der Kenngröße CIBTR an die empirischen Daten erreichen lässt, wurde die Untersuchung noch einmal mit Sensitivity Factor 0,8 (Standard-Abweichung 0,05; Min. 0,7; Max. 1,0) durchgeführt.

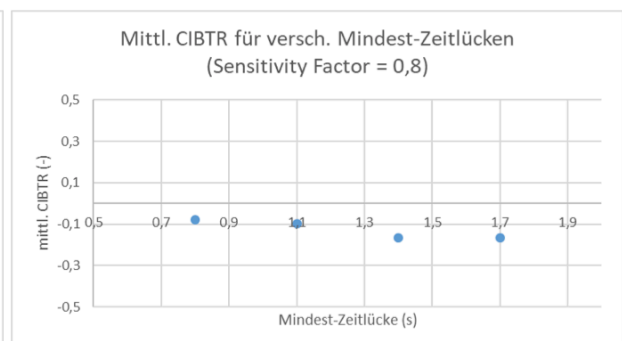
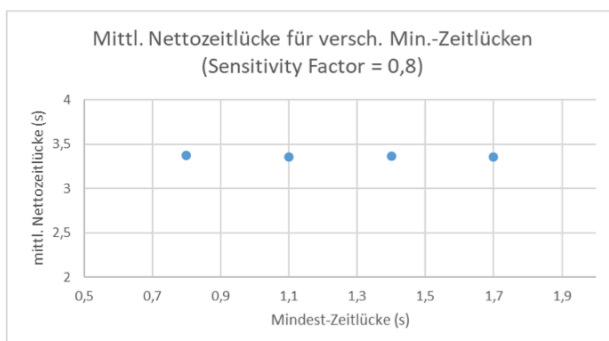
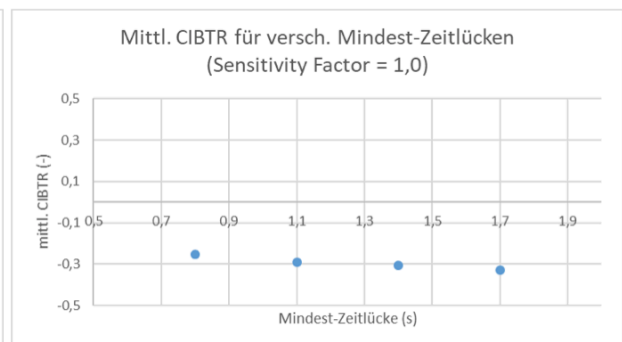
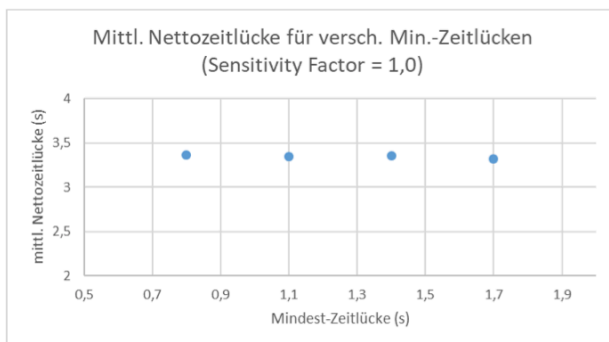
Mindest-Zeitlücke Pkw Mittel (s)	Sensitivity Factor	Mittlere Nettozeitlücke (s)	CIBTR	Anzahl Einzelfahrzeuge
0,8	1,0	3,2943	-0,4459	13.087
1,1	1,0	3,3116	-0,4513	12.658
1,4	1,0	3,3179	-0,4744	13.137
1,7	1,0	3,3096	-0,4873	13.014
0,8	0,8	3,3453	-0,3205	12.786
1,1	0,8	3,3522	-0,3434	12.533
1,4	0,8	3,3369	-0,3644	13.084
1,7	0,8	3,3085	-0,3663	13.187



Mindest-Zeitlücke Pkw, zweistreifige Querschnitte:

Die Untersuchung wurde zunächst unter Beibehaltung des Standard-Wertes des Sensitivity-Factor von 1,0 (ohne Streuung) durchgeführt. Da sich zeigte, dass mit einem niedrigeren Sensitivity Factor eine bessere Anpassung insbesondere der Kenngröße CIBTR an die empirischen Daten erreichen lässt, wurde die Untersuchung noch einmal mit Sensitivity Factor 0,8 (Standard-Abweichung 0,05; Min. 0,7; Max. 1,0) durchgeführt.

Mindest-Zeitlücke Pkw Mittel (s)	Sensitivity Factor	Mittlere Nettozeitlücke (s)	CIBTR	Anzahl Einzelfahrzeuge
0,8	1,0	3,3606	-0,2537	6.865
1,1	1,0	3,3466	-0,2900	6.909
1,4	1,0	3,3584	-0,3050	6.865
1,7	1,0	3,3227	-0,3282	7.002
0,8	0,8	3,3719	-0,0780	7.959
1,1	0,8	3,3552	-0,0967	7.355
1,4	0,8	3,3605	-0,1670	7.113
1,7	0,8	3,3530	-0,1671	7.282

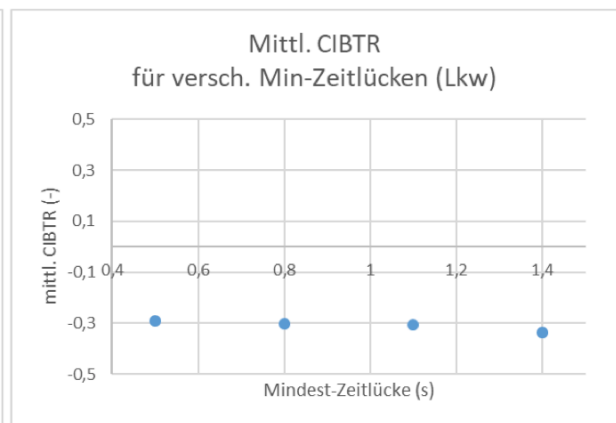
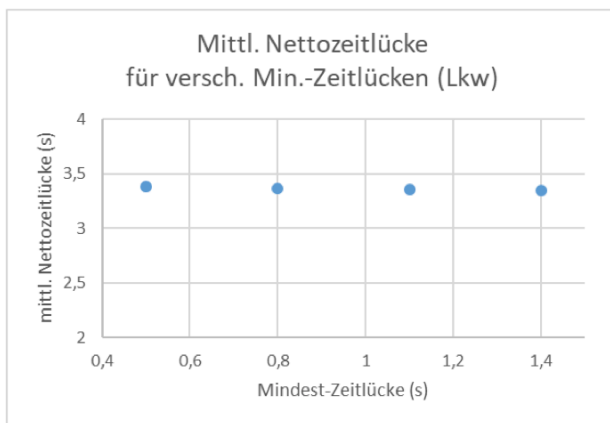


Mindest-Zeitlücke Lkw, dreistreifige Querschnitte:

Der Einfluss der Lkw-Mindestzeitlücke wurde zunächst für zweistreifige Querschnitte untersucht. Da dabei kein Einfluss auf die beiden betrachteten empirischen Verkehrskenngrößen festgestellt werden konnte (s.u.), wurde auf eine Untersuchung für dreistreifige Querschnitte verzichtet.

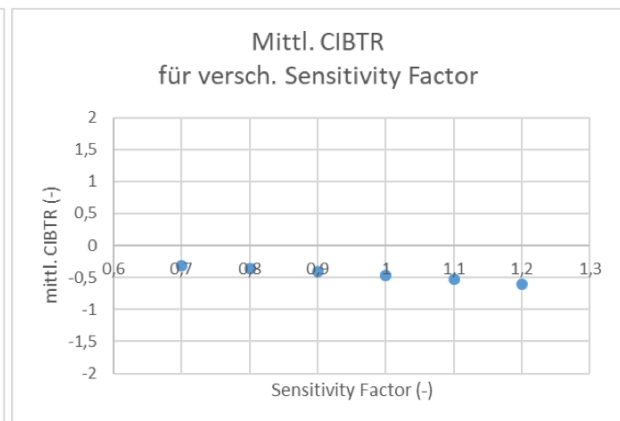
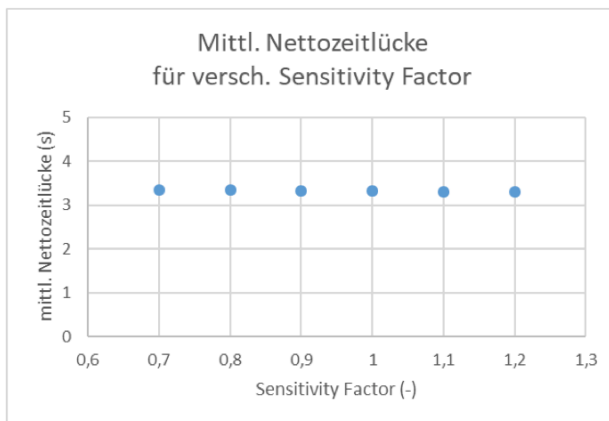
Mindest-Zeitlücke Lkw, zweistreifige Querschnitte:

Mindest-Zeitlücke Lkw Mittel (s)	Mittlere Nettozeitlücke (s)	CIBTR	Anzahl Einzelfahrzeuge
0,5	3,3800	-0,2902	7.239
0,8	3,3674	-0,3020	7.378
1,1	3,3584	-0,3050	6.865
1,4	3,3499	-0,3368	7.072



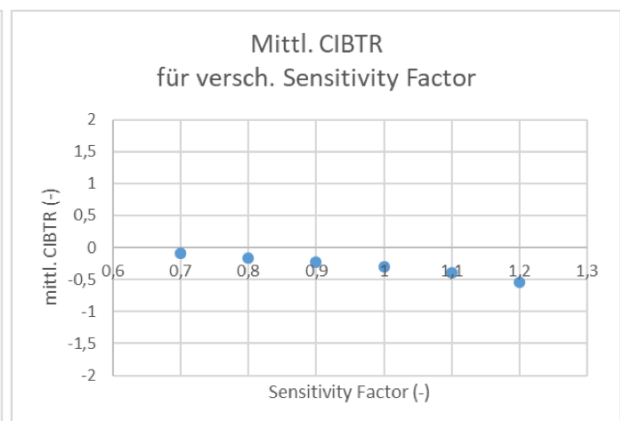
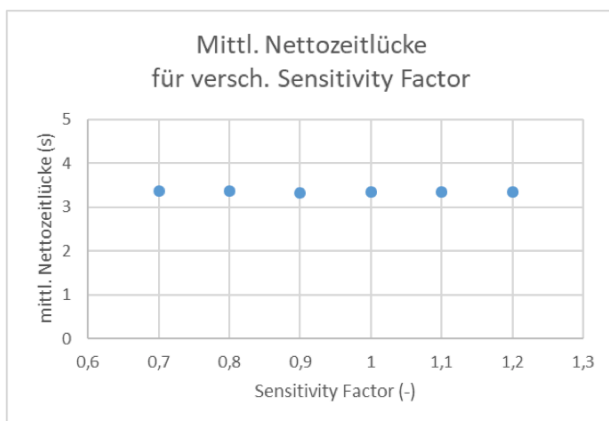
Sensitivity Factor, dreistreifige Querschnitte:

Sensitivity Factor Mittelwert	Sensitivity F. Std.-Abw.	Sensitivity F. Min./Max.	Mittlere Nettozeitlücke (s)	CIBTR	Anzahl Einzelfahrzeuge
0,7	0,05	0,6 / 1,0	3,3395	-0,3214	13.445
0,8	0,05	0,7 / 1,0	3,3369	-0,3644	13.084
0,9	0,05	0,8 / 1,0	3,3238	-0,4124	12.719
1,0	0,00	1,0 / 1,0	3,3179	-0,4744	13.137
1,1	0,05	1,0 / 1,2	3,3120	-0,5302	12.934
1,2	0,05	1,0 / 1,3	3,3082	-0,6066	12.405



Sensitivity Factor, zweistreifige Querschnitte:

Sensitivity Factor Mittelwert	Sensitivity F. Std.-Abw.	Sensitivity F. Min./Max.	Mittlere Nettozeitlücke (s)	CIBTR	Anzahl Einzelfahrzeuge
0,7	0,05	0,6 / 1,0	3,3621	-0,0860	7.243
0,8	0,05	0,7 / 1,0	3,3605	-0,1670	7.113
0,9	0,05	0,8 / 1,0	3,3261	-0,2234	6.681
1,0	0,00	1,0 / 1,0	3,3584	-0,3050	6.865
1,1	0,05	1,0 / 1,2	3,3450	-0,3946	6.832
1,2	0,05	1,0 / 1,3	3,3388	-0,5448	6.650



Anhang 5: Funktionen Abstandsverhaltensparameter

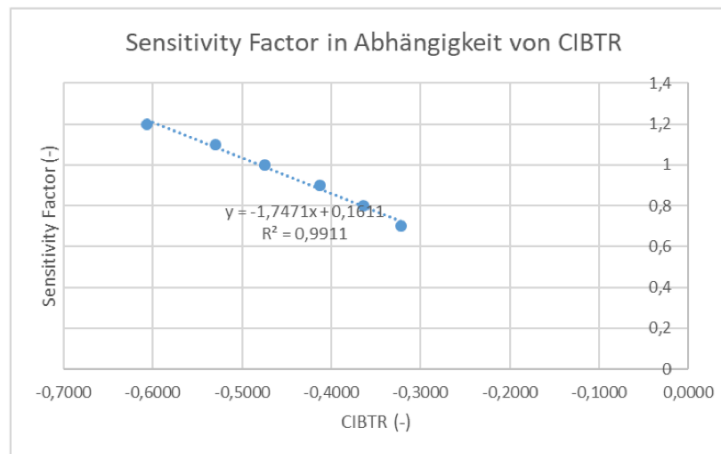
Für das Verhaltensmodell für konventionelle (d.h. nicht-automatisierte) Fahrzeuge waren Funktionen der Simulationsparameter

- Sensitivity Factor und
- Mindest-Zeitlücke (jeweils für Pkw und Lkw)

in Abhängigkeit vom empirischen Verhaltensparameter Compensated Individual Braking Time Risk (CIBTR) festzulegen. Nachfolgend werden die im Modell verwendeten Funktionen auf Grundlage von Simulationen unter Variation der betreffenden Parameter hergeleitet. Die Vorgehensweise ist in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschrieben.

Sensitivity Factor (sf), dreistreifige Querschnitte:

CIBTR	sensitivity factor (sf)
-0,3214	0,7
-0,3644	0,8
-0,4124	0,9
-0,4744	1,0
-0,5302	1,1
-0,6066	1,2



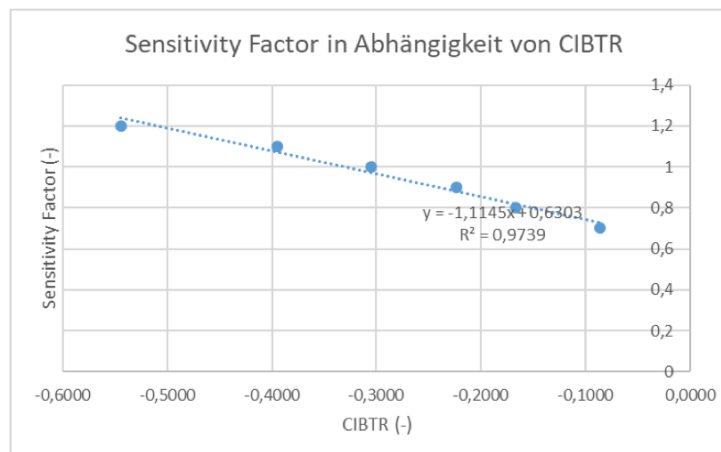
Regressionsfunktion: $sf = 0,1611 - 1,7471 \cdot CIBTR$

Wertebereichsgrenzen Mittelwerte: $0,8 \leq sf \leq 1,0$

Wertebereichsgrenzen Einzelwerte: $0,7 \leq sf \leq 1,0$

Sensitivity Factor, zweistreifige Querschnitte:

CIBTR	sensitivity factor (sf)
-0,0860	0,7
-0,1670	0,8
-0,2234	0,9
-0,3050	1,0
-0,3946	1,1
-0,5448	1,2



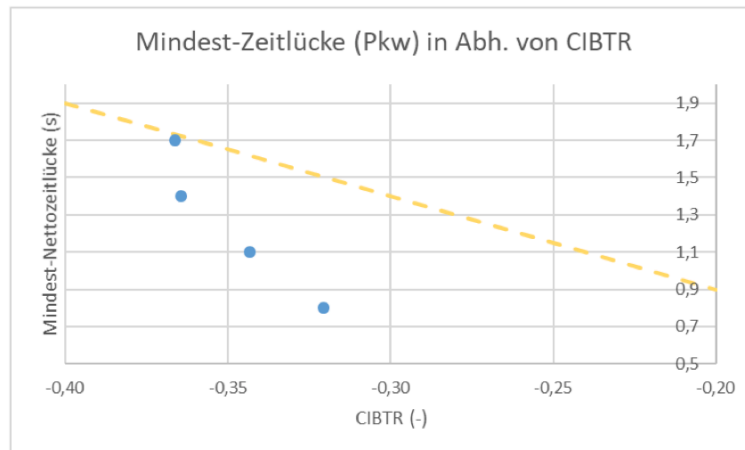
Regressionsfunktion: $sf = 0,6303 - 1,1145 \cdot CIBTR$

Wertebereichsgrenzen Mittelwerte: $0,8 \leq sf \leq 1,0$

Wertebereichsgrenzen Einzelwerte: $0,7 \leq sf \leq 1,0$

Mindest-Zeitlücke Pkw ($\Delta t_{\min, Pkw}$), dreistreifige Querschnitte:

CIBTR	Mindest-Zeitlücke
-0,3205	0,8
-0,3434	1,1
-0,3644	1,4
-0,3663	1,7



Ermittelte Regressionsfunktion: $\Delta t_{\min, Pkw, Mittel} = -4,7535 - 17,2190 \cdot CIBTR$

Aufgrund der sehr hohen Steigung dieser Regressionsfunktion und einer damit verbundenen zu hohen Sensitivität dieses Parameters gegenüber schon geringen Änderungen empirisch erfasster CIBTR wurde ein abweichender funktionaler Zusammenhang festgelegt. Dieser soll insbesondere bei höheren CIBTR (im negativen Bereich gegen 0 tendierend) noch plausible Werte für die Mindest-Zeitlücke liefern. Außerdem sollte der Zusammenhang sich nicht unverhältnismäßig stark vom Zusammenhang für zweistreifige Querschnitte unterscheiden. Der gewählte Zusammenhang orientiert sich an der für zweistreifige Querschnitte identifizierten Funktion und berücksichtigt dabei, dass CIBTR im dreistreifigen Bereich bei im Verhältnis zur Fahrstreifenzahl ähnlichen Verkehrsstärken etwas geringer ausfallen als im zweistreifigen Bereich.

Die Untersuchung wurde mit Sensitivity Factor 0,8 (anstelle des Standardwertes 1,0) durchgeführt.

Verwendete Funktion (orangefarbene Linie): $\Delta t_{\min, Pkw, Mittel} = -0,1 - 5 \cdot CIBTR$

Wertebereichsgrenzen Mittelwerte: $1,10s \leq \Delta t_{\min, Pkw, Mittel} \leq 1,55s$

Standardabweichung: 0,7s

Wertebereichsgrenzen Einzelwerte: $0,8s \leq \Delta t_{\min, Pkw, ind} \leq 1,7s$

Mindest-Zeitlücke Lkw ($\Delta t_{\min, Lkw}$), dreistreifige Querschnitte:

Die Variation der Lkw-Mindestzeitlücke (unter Beibehaltung der Standard-Pkw-Mindestzeitlücke) ergab keinen signifikanten Einfluss auf die Kenngröße CIBTR. Da jedoch ein kausaler Zusammenhang zwischen Mindestzeitlücke und CIBTR auch für Lkw unterstellt wird, soll dennoch ein funktionaler Zusammenhang festgelegt werden. Die mittlere Lkw-Mindestzeitlücke liegt um 0,3 unterhalb der Pkw-Mindestzeitlücke. Aus diesem Grund wurde eine Funktion mit gleicher Steigung und um 0,3 verringerter Nullstelle als für die Funktion der Pkw-Mindestzeitlücke gewählt:

Verwendete Funktion: $\Delta t_{\min, Lkw, Mittel} = -0,4 - 5 \cdot CIBTR$

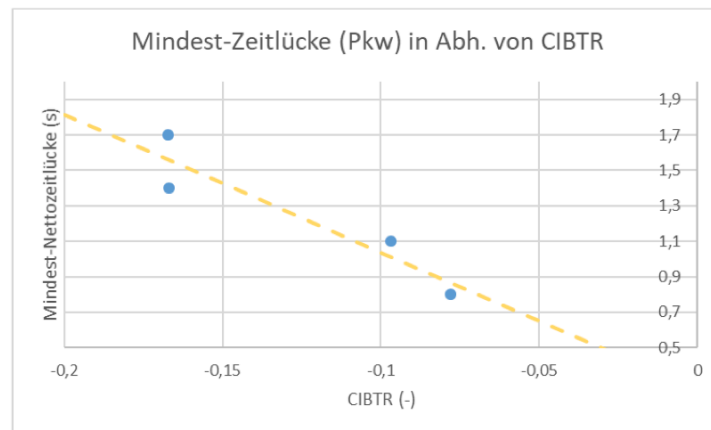
Wertebereichsgrenzen Mittelwerte: $0,9s \leq \Delta t_{\min, Lkw, Mittel} \leq 1,3s$

Standardabweichung: 0,5s

Wertebereichsgrenzen Einzelwerte: $0,5s \leq \Delta t_{\min, Lkw, ind} \leq 3,1s$

Mindest-Zeitlücke Pkw ($\Delta t_{\min, Pkw}$), zweistreifige Querschnitte:

CIBTR	Mindest-Zeitlücke
-0,0780	0,8
-0,0967	1,1
-0,1670	1,4
-0,1671	1,7



Ermittelte Regressionsfunktion: $\Delta t_{\min, Pkw, Mittel} = 0,2635 - 7,7552 \cdot CIBTR$

Ähnlich wie bei der Untersuchung für den dreistreifigen Querschnitt (siehe oben) hat die durch Regression ermittelte Funktion einen steilen Anstieg, wenngleich dieser etwas geringer ist als für dreistreifige Querschnitte. Auffällig ist, dass ein großer Sprung zwischen einer Mindest-Zeitlücke von 1,1 und 1,4 auftritt; bei niedrigeren oder höheren Mindestzeitlücken ändert sich die Kenngröße CIBTR dagegen kaum. Der Zusammenhang ist demnach möglicherweise nichtlinearer Art; im Rahmen dieses Vorhabens konnte dies nicht eingehender untersucht werden. Für den Einsatz im Gaußschen Bayesschen Netz muss dennoch ein linearer Zusammenhang gefunden werden, der dem in dieser Untersuchung identifizierten Zusammenhang so gut wie möglich entspricht.

Die Untersuchung wurde mit Sensitivity Factor 0,8 (anstelle des Standardwertes 1,0) durchgeführt.

Verwendete Funktion (orangefarbene Linie): $\Delta t_{\min, Pkw, Mittel} = -0,2 - 5 \cdot CIBTR$

Wertebereichsgrenzen Mittelwerte: $1,10s \leq \Delta t_{\min, Pkw, Mittel} \leq 1,55s$

Standardabweichung: 0,7s

Wertebereichsgrenzen Einzelwerte: $0,8s \leq \Delta t_{\min, Pkw, ind} \leq 1,7s$

Mindest-Zeitlücke Lkw ($\Delta t_{\min, Lkw}$), zweistreifige Querschnitte:

Analog zur Vorgehensweise für dreistreifige Querschnitte wurde für die Lkw-Mindestzeitlücke eine Funktion mit gleicher Steigung und um 0,3 verringerter Nullstelle als für die Funktion der Pkw-Mindestzeitlücke gewählt:

Verwendete Funktion: $\Delta t_{\min, Lkw, Mittel} = -0,5 - 5 \cdot CIBTR$

Wertebereichsgrenzen Mittelwerte: $0,9s \leq \Delta t_{\min, Lkw, Mittel} \leq 1,3s$

Standardabweichung: 0,5s

Wertebereichsgrenzen Einzelwerte: $0,5s \leq \Delta t_{\min, Lkw, ind} \leq 3,1s$

Anhang 6: Parameter der Modelle automatisierter Fahrzeuge

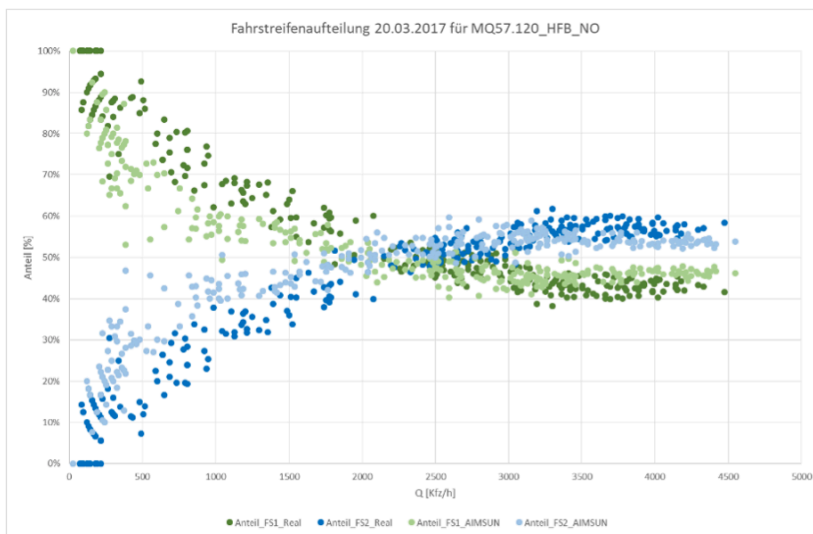
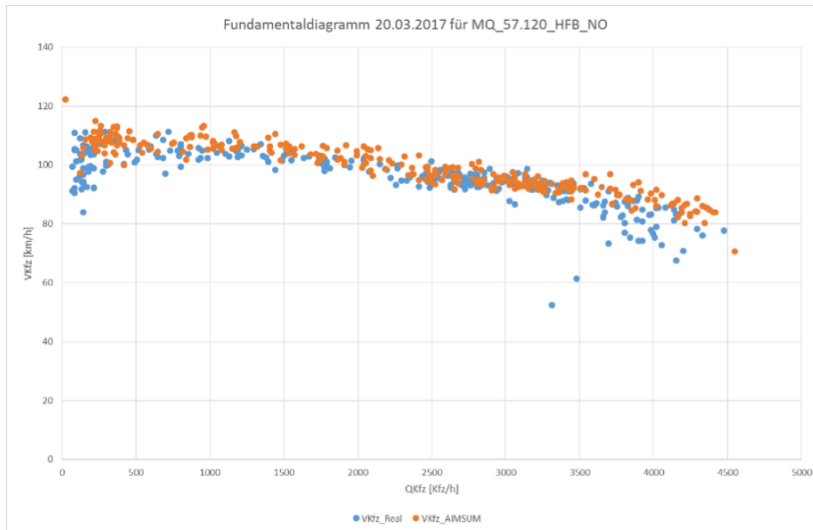
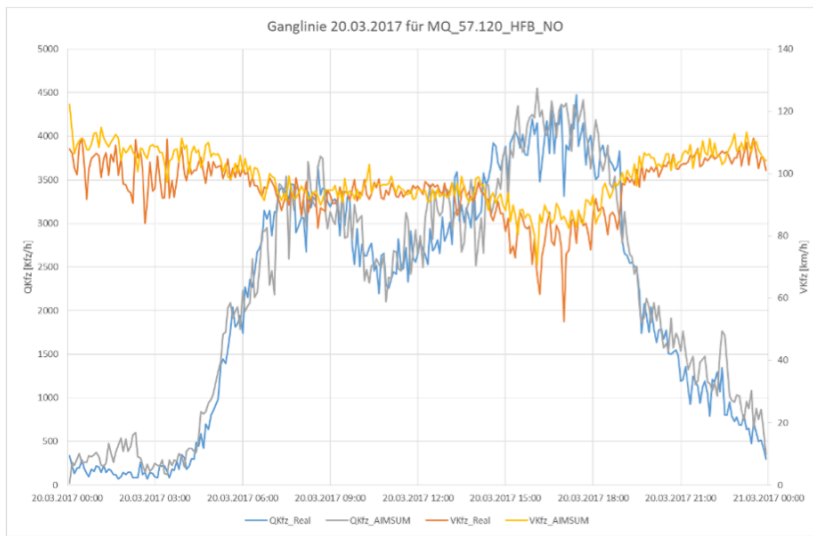
Eine Tabelle mit den Parametern für automatisierte Fahrzeuge in den drei Ausprägungen konservativ, aus Betreibersicht wünschenswert und progressiv ist hier einzusehen.

Geschwindigkeitswahl (Wunschgeschwindigkeit/ Fahrstrategie)						
Aufgabe		konservatives Modell	wünschenswertes Modell	progressives Modell	menschl. Fahrverh.	Bemerkungen
	Obergrenze Wunschgeschwindigkeit	130 km/h soll nicht überschritten werden (u.a. aufgrund der Haltesichtweite i.V.m. der Reichweite der Fahrzeugsensorik)			Geschwindigkeiten auch > 130 km/h zulässig	
	Wunschgeschwindigkeit (AIMSUN-Param.: Max. Desired Speed) ... Obergrenze	130 km/h (Lkw: 85 km/h bzw. 100 km/h)			gemäß empirischer Datengrundlage	gemäß Festlegung im Rahmen der Betreuerkreissitzungen
	Einhaltung zul. Höchstgeschwindigkeit	keine Überschreitung zulässig (Ausnahme: plötzliche zeitliche Schaltzustandswechsel)			Überschreitung zulässig	
	Befolgungsgrad zul. Höchstgeschw. (AIMSUN-Param.: Speed Acceptance) ... Obergrenze	1			gemäß empirischer Datengrundlage	gemäß Festlegung im Rahmen der Betreuerkreissitzungen
	Anpassung an niedrigere zul. Höchstgeschwindigkeit im Streckenverlauf	frühzeitig/allmählich, keine räuml. Toleranz		spät/abrupt, keine räuml. Toleranz	räuml. Toleranz	
	Verzögerung im Normalfall (AIMSUN-Param: Normal Deceleration)	siehe unter "Fahrzeugfolgeverhalten/ operationelle Fahrentscheidungen" -> "Wunschverzögerung"				
	Anpassung an höhere zul. Höchstgeschwindigkeit im Strecken- oder Zeitverlauf	allmählich	zügig wenn verkehrl. Verträglich, sonst allmählich	zügig	gemäß Grundkalibrierung	
	Beschleunigung (AIMSUN-Param: Max. Acceleration)	siehe unter "Fahrzeugfolgeverhalten/ operationelle Fahrentscheidungen" -> "Wunschbeschleunigung"				
	Anpassung Wunschgeschwindigkeit an Geschwindigkeitsniveau	Anpassung (zur Modellierung konservativen Überholverhaltens)	situationsabhängige Anpassung	keine Anpassung	gemäß empirischer Datengrundlage	
	Anpassung in Abhängigkeit von	... Geschwindigkeit auf Ego-Fahrstreifen	... Geschwindigkeit auf linkem angrenzendem Fahrstreifen und Ego-Fahrstreifen sowie Dichte auf linkem angrenzendem Fahrstreifen			
	Wunschgeschwindigkeit (AIMSUN-Param.: Max. Desired Speed) ... Mittelwert	Geschw.-niveau Ego-Fahrstreifen + 5 km/h*	wenn Überholmöglichkeit (li. FS > 10km/h höher; Dichte unter Grenzwert): Geschw.-niveau li. FS + 5 km/h*, sonst Geschw.-niveau Ego-Fahrstreifen + 5 km/h*	130 km/h	Verteilung gemäß empirischer Datengrundlage	* additiver Term wird ggf. angepasst in Abhängigkeit der ersten Ergebnisse von Simulationsläufen mit 100% Durchdringung automatisierter Fahrzeuge
	... Std.-Abw.	0 km/h	0 km/h	0 km/h		
	... Untergrenze	Mittelwert	Mittelwert	130 km/h		
	... dyn. Anpassung während der Simulation?	ja	ja	nein	ja	
	Befolgungsgrad zul. Höchstgeschw. (AIMSUN-Param.: Speed Acceptance) ... Mittelwert	1			Verteilung gemäß empirischer Datengrundlage	
	... Std.-Abw.	0				
... Untergrenze	1					
... dyn. Anpassung während der Simulation?	nein	nein	nein	nein (Wunschgeschw. ausreichend)		

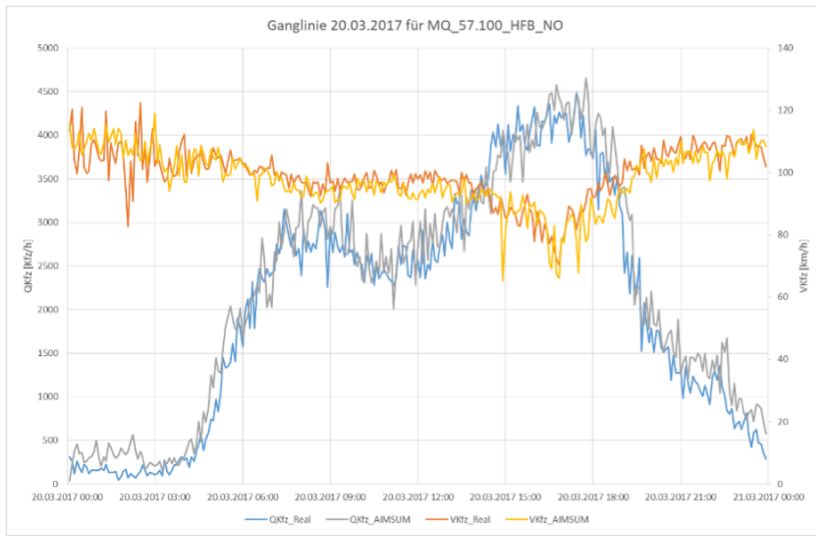
Fahrzeugfolgeverhalten/ operationelle Fahrentscheidungen					
Aufgabe	konservatives Modell	wünschenswertes Modell	progressives Modell	menschl. Fahrverh. (am Beispiel A92)	Bemerkungen
Abstand	mit Spielraum zur Kompensation von Störeinflüssen		gering (an der Grenze der technischen Möglichkeiten)	gemäß empirischer Datengrundlage	
Mindest-Zeitlücke (AIMSUN-Parameter: Gap) ... Mittelwert (in s)	Pkw: 1,8 Lkw: 2,1	Pkw: 1,0 Lkw: 1,2	Pkw: 1,0 Lkw: 1,2	Pkw: 1,1...1,55 (1,4) Lkw: 0,9...1,3 (1,1)	progressives Modell für Pkw in Anlehnung an [VDA17]; Kommunizierende autom. Fzge. (Platooning) nach [VDA17] sogar 0,5s, jedoch Grenze unterhalb der sich Passagier unwohl fühlt nach [Gri15] bei 1,2s
... Std.-Abw. (in s)	0	0	0	Pkw: 0,7 Lkw: 0,5	geringe Streuung der Zeitlücken autom. Fahrzeuge
... Untergrenze (in s)	Mittelw. - 2 * Std.Abw.	Mittelw. - 2 * Std.Abw.	Mittelw. - 2 * Std.Abw.	Pkw: 0,8 Lkw: 0,5	
... Obergrenze (in s)	Mittelw. + 2 * Std.Abw.	Mittelw. + 2 * Std.Abw.	Mittelw. + 2 * Std.Abw.	Pkw: 1,7 Lkw: 3,1	
... dyn. Anpassung während der Simulation?	nein	nein	nein	ja	
Mindestabstand im Stau/ Abstand bei Stillstand	mit Spielraum		gering	gemäß Grundkalibrierung	
Mindestabstand bei Stillstand (Aimsun-Parameter: Clearance) ... Mittelwert (in m)	2,0	2,0	1,5	Pkw: 1,0 Lkw 1,5	konservatives/wünschenswertes Modell: Orientierung an [VDA17] (bei Vernetzung nach [VDA17] 1,5m); progressives Modell: Orientierung an menschlichem Verhalten als Grenzfall
... Std.-Abw. (in m)	0	0	0	Pkw: 0,3 Lkw: 0,5	geringe Streuung der Abstände autom. Fahrzeuge
... Untergrenze (in m)	2,0	2,0	1,5	Pkw: 0,5 Lkw: 1,0	
... Obergrenze (in m)	2,0	2,0	1,5	Pkw: 1,5 Lkw: 2,5	
... dyn. Anpassung während der Simulation?	nein			nein	
Wunschverzögerung	mäßige Verzögerung (außer Gefahrensituation)		starke Verzögerung durch geringen Abstand nicht vermeidbar	gemäß Grundkalibrierung	
Verzögerung im Normalfall (AIMSUN-Param: Normal Deceleration) ... Mittelwert (in m/s ²)	-2,0	-2,0	-3,5	Pkw: -4,0 Lkw: -3,5	Empfehlungswerte aus Zwischenbericht gestützt auf [Sche16] und [Amm13]
... Std.-Abw. (in m/s ²)	0	0	0	Pkw: 0,25 Lkw: 1,0	geringe Streuung Verzögerungsverhalten automatisierter Fahrzeuge
... Untergrenze (in m/s ²)	Mittelw. - 2 * Std.Abw.	Mittelw. - 2 * Std.Abw.	Mittelw. - 2 * Std.Abw.	Pkw: 3,5 Lkw: 2,5	
... Obergrenze (in m/s ²)	Mittelw. + 2 * Std.Abw.	Mittelw. + 2 * Std.Abw.	Mittelw. + 2 * Std.Abw.	Pkw: 4,5 Lkw: 4,8	
... dyn. Anpassung während der Simulation?	nein			nein	
Neigung zu Stop & Go? (AIMSUN-Param. Favors Stop & Go)	nein			nein	
Wunschbeschleunigung	mäßig	mäßig (idealerweise situationsangepasst im Stauabfluss)	stark	gemäß Grundkalibrierung	
Beschleunigung (AIMSUN-Param: Max. Acceleration) ... Mittelwert (in m/s ²)	Pkw: 3,0 Lkw: 1,5	Pkw: 3,0 Lkw: 1,5	Pkw: 3,0 Lkw: 1,5	Pkw: 3,0 Lkw: 1,0	Empfehlungswerte aus Zwischenbericht gestützt auf [Sche16] und [Amm13]
... Std.-Abw. (in m/s ²)	0,1	0,1	0,1	Pkw: 0,2 Lkw: 0,5	geringe Streuung Verzögerungsverhalten automatisierter Fahrzeuge
... Untergrenze (in m/s ²)	Mittelw. - 2 * Std.Abw.	Mittelw. - 2 * Std.Abw.	Mittelw. - 2 * Std.Abw.	Pkw: 2,6 Lkw: 0,6	
... Obergrenze (in m/s ²)	Mittelw. + 2 * Std.Abw.	Mittelw. + 2 * Std.Abw.	Mittelw. + 2 * Std.Abw.	Pkw: 3,4 Lkw: 1,8	
... dyn. Anpassung während der Simulation?	nein			nein	
Neigung zu Stop & Go? (AIMSUN-Param. Favors Stop & Go)	nein			nein	
Reaktion auf Vorfahrer	sofort (Sollabstand sofort wieder herstellen)	gedämpft (Sollabstand allmählich wieder herstellen)	sofort (notwendig durch geringen Abstand)	gemäß Grundkalibrierung, tlw. Anpassung durch Wirkmodell	
Max. Verzögerung (Gefahrenbremsung) (AIMSUN-Param: Max. Deceleration) ... Mittelwert (in m/s ²)	8,0	8,0	8,0	Pkw: 6,0 Lkw: 5,0	8 m/s ² entsprechen der gesetzlich vorgeschriebenen Mindestverzögerung bei einer Gefahrenbremsung.
... Std.-Abw. (in m/s ²)	0	0	0	0,5	Bedeutung des Parameters in AIMSUN: Da das verwendete Fahrzeugfolgemodell ein kollisionsfreies ist, können im Extremfall auch höhere (ggf. unrealistische) Bremsverzögerungen erreicht werden.
... Untergrenze (in m/s ²)	Mittelw. - 2 * Std.Abw.	Mittelw. - 2 * Std.Abw.	Mittelw. - 2 * Std.Abw.	Pkw: 5,0 Lkw: 4,0	
... Obergrenze (in m/s ²)	Mittelw. + 2 * Std.Abw.	Mittelw. + 2 * Std.Abw.	Mittelw. + 2 * Std.Abw.	Pkw: 7,0 Lkw: 6,0	
... dyn. Anpassung während der Simulation?	nein			nein	
Sensitivitätsfaktor bzgl. möglicher Verzögerung Vorfahrender Fzge. (AIMSUN-Param.: Sensitivity Factor) ... Mittelwert	1,2	1,1	1,0	0,8...1,0	Bedeutung des Parameters in AIMSUN: Einschätzung der Verzögerung des Vorfahrenden. Lt. AIMSUN-Dokumentation: - wenn < 1, unterschätzt das Fahrzeug die Verzögerung des Vorfahrenden -> geringere Lücken, aggressiveres Verhalten - wenn > 1, überschätzt das Fahrzeug die Verzögerung des Vorfahrenden -> größere Lücken, vorsichtigeres Verhalten
... Std.-Abw.	0	0	0	0,05	
... Untergrenze	Mittelw.	Mittelw.	Mittelw.	0,7	
... Obergrenze	Mittelw.	Mittelw.	Mittelw.	1,0	
... dyn. Anpassung während der Simulation?	nein			ja	
Reaktionszeit (in s) (AIMSUN-Param: ReactionTime)	0,15	0,15	0,15	0,75	Einschränkung in AIMSUN: Reaktionszeit muss ein Vielfaches der Simulationsschrittweite sein
Reaktionszeit nach Halt (in s) (AIMSUN-Param: Reaction Time at Stop)	1,00	0,15	0,15	1,35	
Reaktion auf Einscherer	kooperativ (Einscheren ermöglichen)		eingeschränkter Spielraum für Kooperation durch geringen Abstand	kooperativ (Einscheren wird ermöglicht oder erzwungen)	
nicht differenziert kalibrierbar	Grundkalibrierung, kooperatives Verhalten örtlich differenzierbar, aber nicht differenzierbar nach Fahrzeugklassen				Unterschiede zwischen Modellen ergeben sich durch unterschiedliche Abstandswahl
geforderte Lücke zu nachfolgendem Fahrzeug auf Zielfahstreifen	groß	groß (idealerweise etwas kleiner bei notwendigen Fahstreifenwechseln)	klein	gemäß Grundkalibrierung	
Mindest-Zeitlücke (AIMSUN-Parameter: Gap)	siehe unter "Abstand"				
Unvorsichtige Fahstreifenwechsel? (AIMSUN-Param: Imprudent Lane Changing)	nein	nein	nein	nein	Imprudent Lane Changing ist Fahrzeugtypdifferenziert festlegbar, jedoch nicht über die API beeinflussbar

Anhang 7: Weitere Kalibrierungsergebnisse

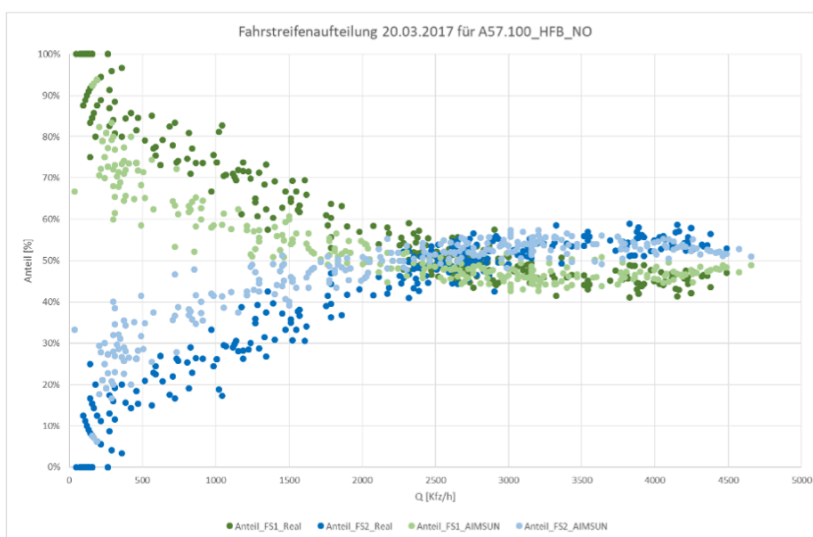
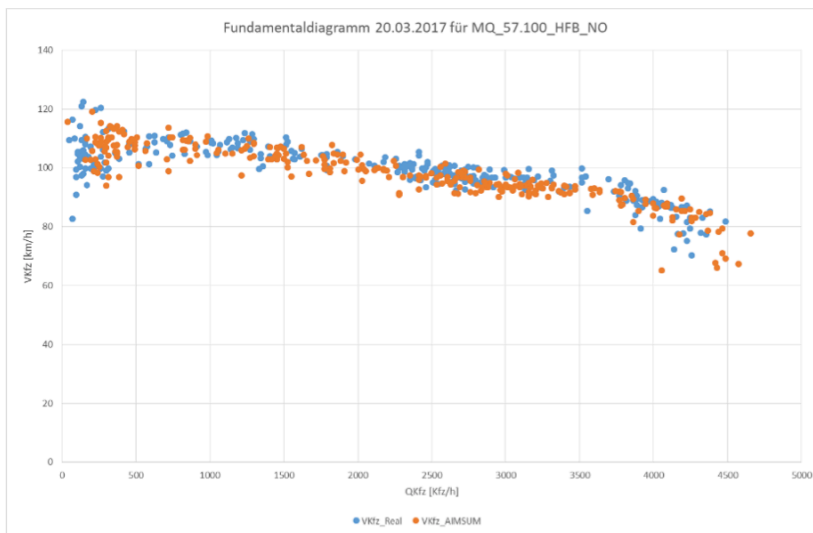
A57 MQ120



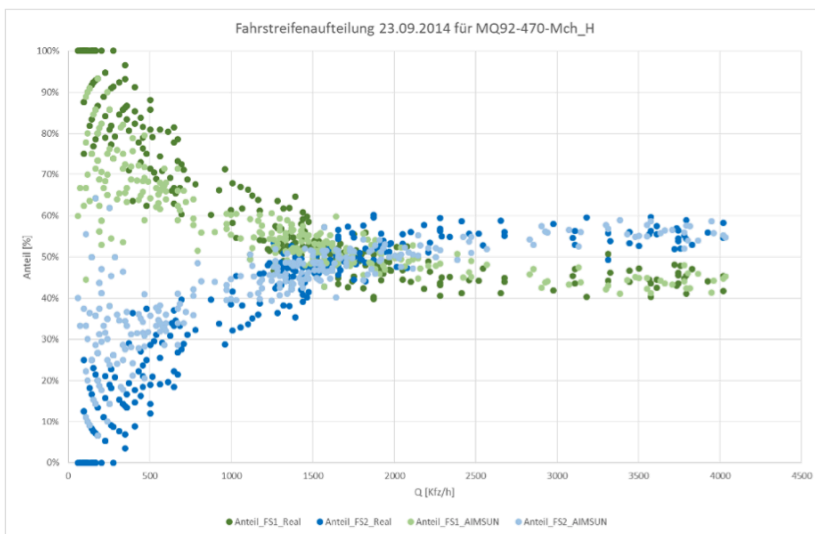
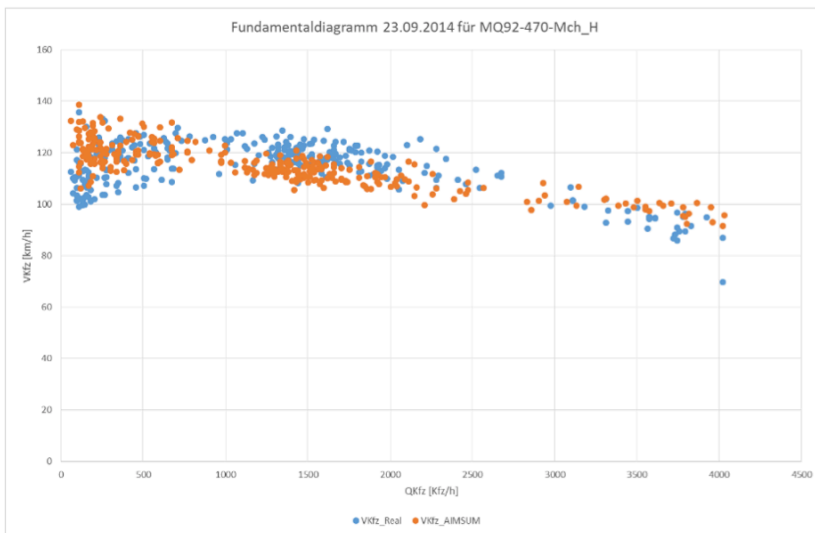
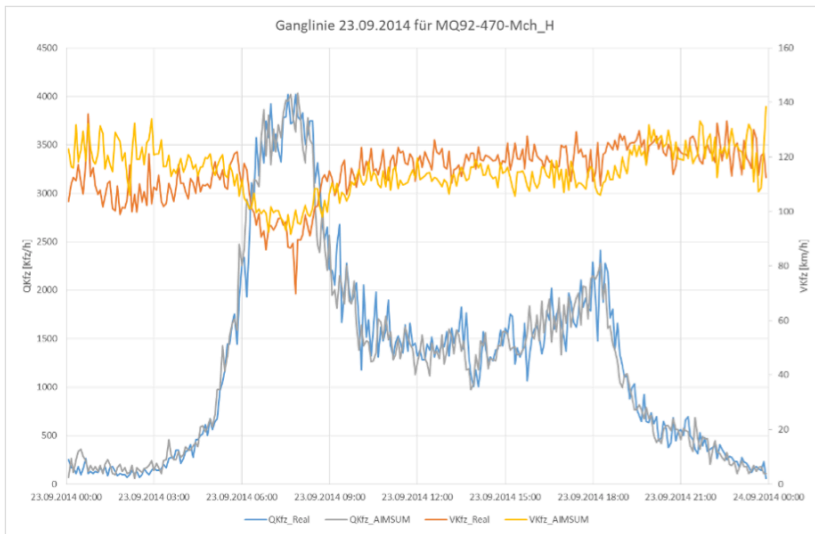
A57 MQ100



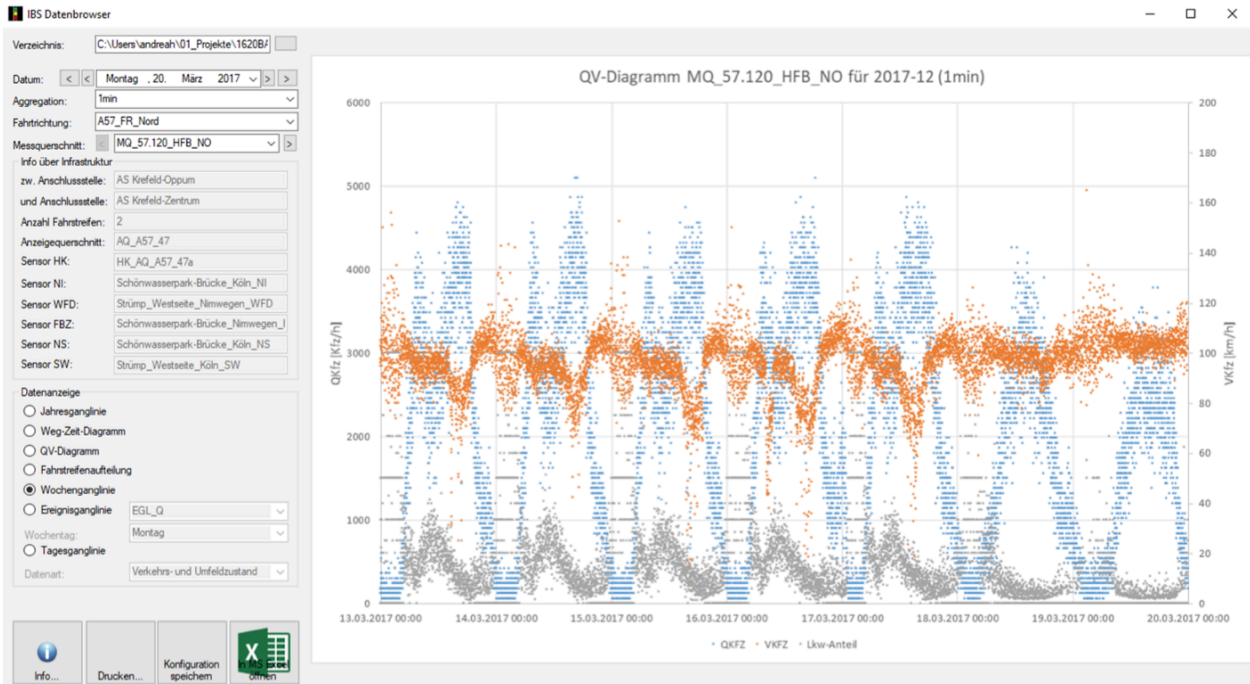
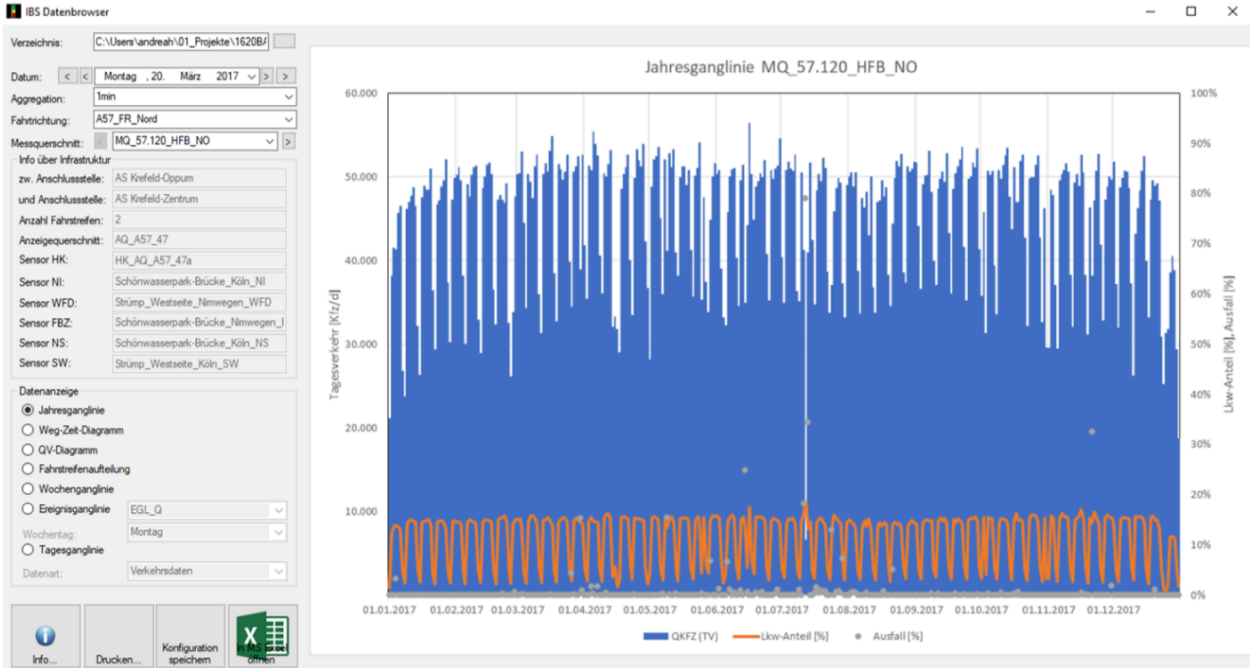
#



A92 MQ 470



Anhang 8: Verkehrszusammenstellung A57 20.3.2017



Verzeichnis: C:\Users\andreah\01_Projekte\1620B\

Datum: < < Montag, 20. März 2017 > >

Aggregation: 1min

Fahrtichtung: A57_FR_Nord

Messquerschnitt: MQ_57.120_HFB_NO

Info über Infrastruktur

zw. Anschlussstelle: AS Krefeld-Opium
und Anschlussstelle: AS Krefeld-Zentrum

Anzahl Fahrstreifen: 2

Anzeigequerschnitt: AQ_A57_47

Sensor HK: HK_AQ_A57_47a

Sensor NI: Schönwasserpark-Brücke_Köln_NI

Sensor WFD: Stümp_Westseite_Nimwegen_WFD

Sensor FBZ: Schönwasserpark-Brücke_Nimwegen_I

Sensor NS: Schönwasserpark-Brücke_Köln_NS

Sensor SW: Stümp_Westseite_Köln_SW

Datenanzeige

Jahresganglinie

Weg-Zeit-Diagramm

QV-Diagramm

Fahrstreifenaufteilung

Wochenganglinie

Ereignisganglinie

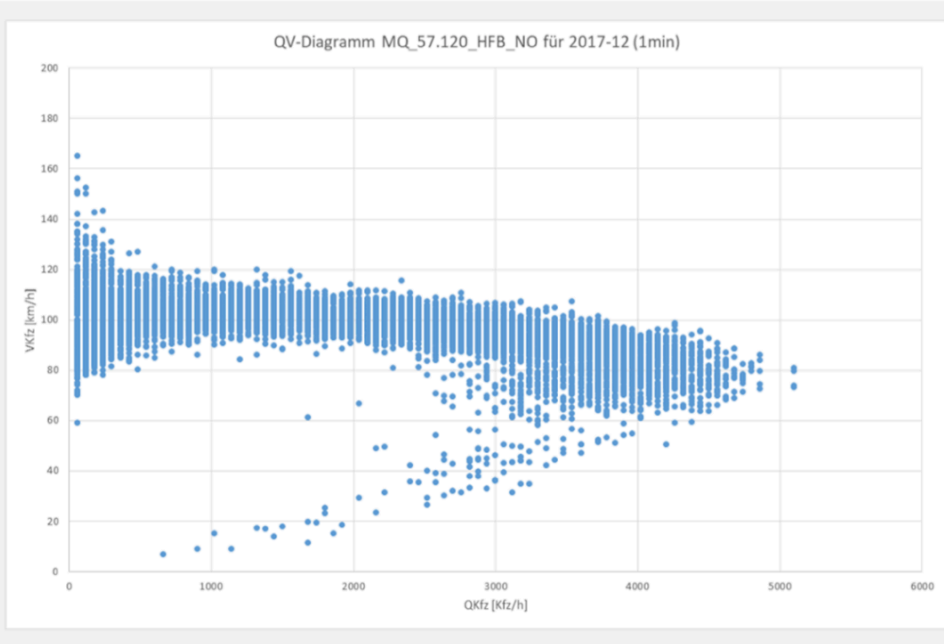
EGL_Q: EGL_Q

Wochentag: Montag

Tagesganglinie

Datenart: Verkehrsdaten

Info... Drucken... Konfiguration speichern Öffnen



Verzeichnis: C:\Users\andreah\01_Projekte\1620B\

Datum: < < Montag, 20. März 2017 > >

Aggregation: 1min

Fahrtichtung: A57_FR_Nord

Messquerschnitt: MQ_57.120_HFB_NO

Info über Infrastruktur

zw. Anschlussstelle: AS Krefeld-Opium
und Anschlussstelle: AS Krefeld-Zentrum

Anzahl Fahrstreifen: 2

Anzeigequerschnitt: AQ_A57_47

Sensor HK: HK_AQ_A57_47a

Sensor NI: Schönwasserpark-Brücke_Köln_NI

Sensor WFD: Stümp_Westseite_Nimwegen_WFD

Sensor FBZ: Schönwasserpark-Brücke_Nimwegen_I

Sensor NS: Schönwasserpark-Brücke_Köln_NS

Sensor SW: Stümp_Westseite_Köln_SW

Datenanzeige

Jahresganglinie

Weg-Zeit-Diagramm

QV-Diagramm

Fahrstreifenaufteilung

Wochenganglinie

Ereignisganglinie

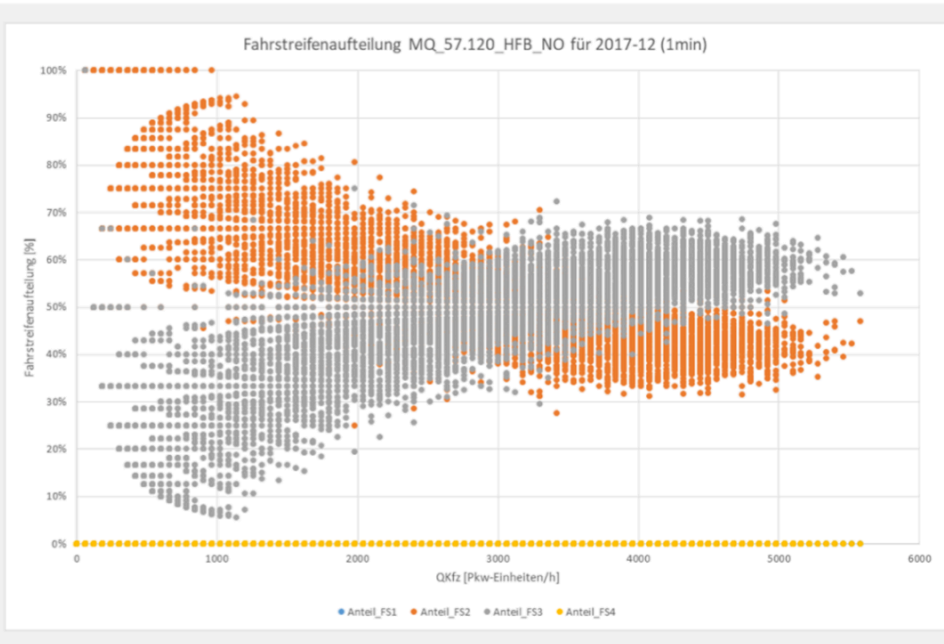
EGL_Q: EGL_Q

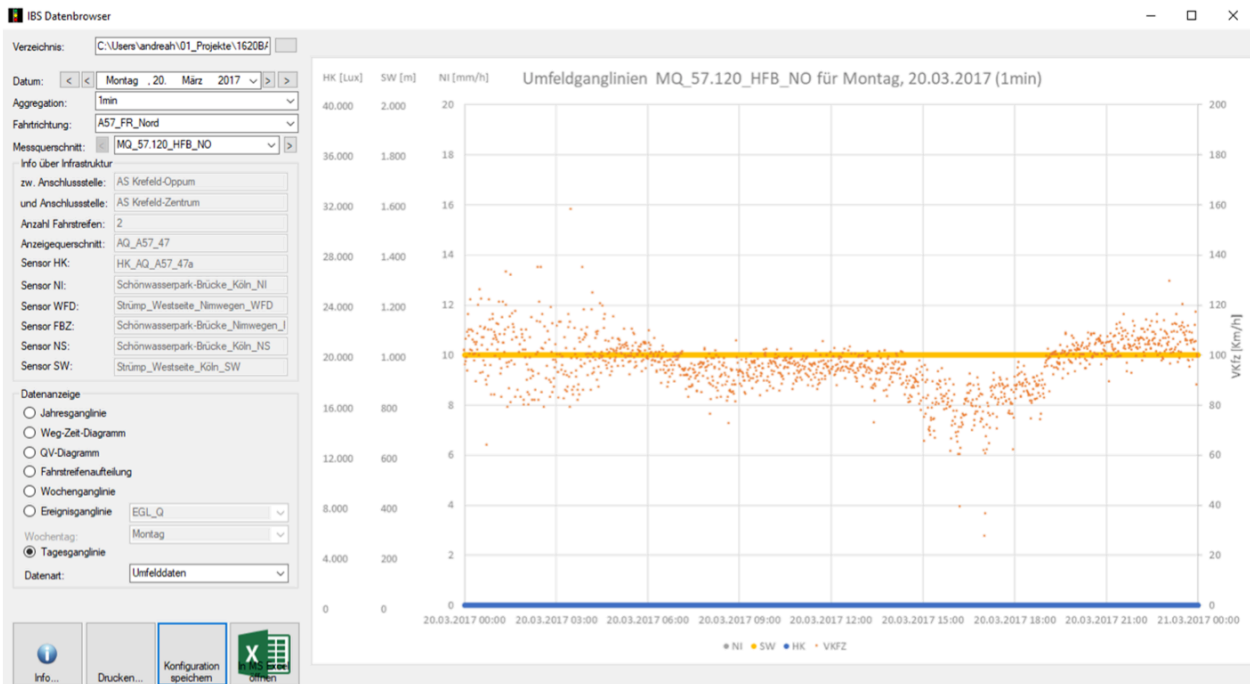
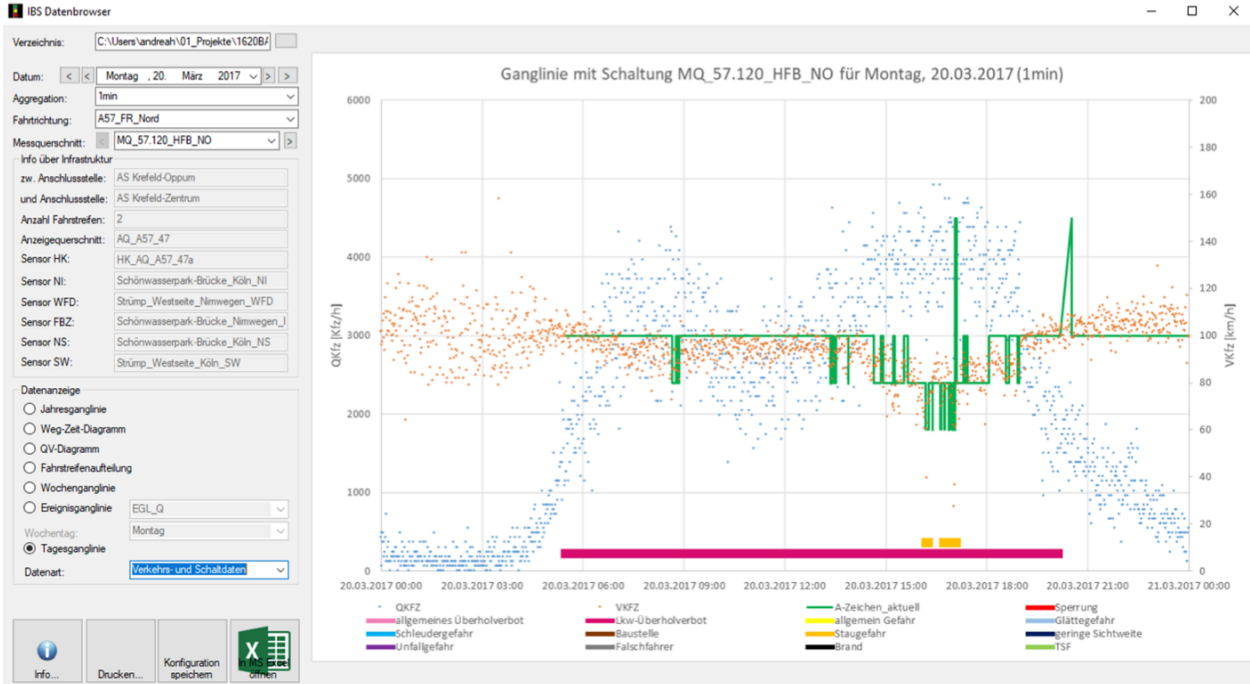
Wochentag: Montag

Tagesganglinie

Datenart: Verkehrsdaten

Info... Drucken... Konfiguration speichern Öffnen





Verzeichnis: C:\Users\andrea\101_Projekte\1620B\

Datum: < < Montag, 20. März 2017 > >

Aggregation: 1min

Fahrtichtung: A57_FR_Nord

Messquerschnitt: MQ_57.120_HFB_NO

Info über Infrastruktur

zw. Anschlussstelle: AS Krefeld-Oppum
 und Anschlussstelle: AS Krefeld-Zentrum

Anzahl Fahrstreifen: 2

Anzeigequerschnitt: AQ_A57_47

Sensor HK: HK_AQ_A57_47a

Sensor NI: Schönwasserpark-Brücke_KGln_NI

Sensor WFD: Stümp_Westseite_Nimwegen_WFD

Sensor FBZ: Schönwasserpark-Brücke_Nimwegen_I

Sensor NS: Schönwasserpark-Brücke_KGln_NS

Sensor SW: Stümp_Westseite_KGln_SW

Datenanzeige

Jahresganglinie
 Weg-Zeit-Diagramm
 QV-Diagramm
 Fahrstreifenaufteilung
 Wochenganglinie
 Ereignisganglinie

Wochentag: Montag

Tagesganglinie

Datenart: Verkehrs- und Umfeldzustand

Info... Drucken... Konfiguration speichern

