

# **Einfluss von Instationarität auf die Wartezeit an Knotenpunkten mit und ohne Lichtsignalanlage**

Zur Erlangung des akademischen Grades einer

**DOKTOR-INGENIEURIN**

von der Fakultät für  
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften  
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

**DISSERTATION**

von

**Dipl.-Wi.-Ing. Ulrike Leyn**

aus Zittau

Tag der mündlichen Prüfung: 20.12.2016

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Justin Geistefeldt

Karlsruhe 2016



*This document is licensed under the Creative Commons  
Attribution-Share Alike 3.0 DE License (CC BY-SA 3.0 DE):  
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*

# KURZFASSUNG

Für die Bewertung der Verkehrsqualität an plangleichen Knotenpunkten legt das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) die mittlere Wartezeit von Fahrzeugen zugrunde. Sie berechnet sich auf Basis der Kapazität und der Verkehrsstärke in einer Analyseperiode, die meist der Spitzenstunde entspricht. Gerade in diesem Zeitraum schwankt die Verkehrsstärke in kurzen Zeitintervallen häufig in ihrer Höhe. Außerdem kann in einzelnen Intervallen die Verkehrsnachfrage durchaus die Kapazität erreichen oder sogar überschreiten.

Die Verfahren zur Berechnung der Wartezeit berücksichtigen diese Schwankungen, also die Instationarität, der Verkehrsstärke nur teilweise. Für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage enthält die Methodik zur Berechnung der mittleren Wartezeit den Instationaritätsfaktor. Dieser ergibt sich aus der höchstbelasteten Viertelstunde innerhalb der Analyseperiode und geht von einem parabelförmigen Verlauf der Verkehrsstärkeganglinie innerhalb dieser Zeit aus.

Im Rahmen dieser Arbeit wird anhand von Messdaten das Vorkommen unterschiedlicher Formen instationärer Verkehrsstärkeverläufe analysiert. Davon ausgehend wird eine Reihe von Zuflussprofiltypen entworfen, die zur Modellierung instationärer Zuflüsse innerhalb mikroskopischer Verkehrsfluss-Simulationen dienen.

Mittels der Simulationsmodelle wird der Einfluss von Instationarität auf die Wartezeit an Knotenpunkten untersucht. Die Ergebnisse für lichtsignalgeregelte Knotenpunkte zeigen, dass in den meisten Fällen ein instationärer Fahrzeugzufluss zu einer höheren mittleren Wartezeit führt als eine gleichbleibende Belastung über den untersuchten Zeitraum hinweg. Die Wartezeiten fallen für die Simulationsergebnisse im Durchschnitt geringer aus als bei der Berechnung mit dem Verfahren des HBS (2015). Zur genaueren Berücksichtigung der Instationarität in diesem Verfahren wird ein neuer Instationaritätsfaktor auf Basis der Simulationsergebnisse entwickelt und mithilfe empirischer Daten validiert. Dieser Faktor enthält neben dem Verhältnis der Verkehrsstärke der höchstbelasteten Viertel-

stunde zu jener der gesamten Stunde auch die Verteilung der Belastung auf die beiden Stundenhälften sowie den Auslastungsgrad des Betrachtungszeitraums. Wird im Verfahren zur Berechnung der mittleren Wartezeiten nach dem HBS statt des bestehenden der neu entwickelte Instationaritätsfaktor verwendet, so stimmen diese besser mit den Ergebnissen aus der Simulation überein.

Für vorfahrtgeregelte Knotenpunkte kann kein eindeutiger Einfluss von Instationarität der Verkehrsstärke erfasst werden, der für die Bewertung der Verkehrsqualität von Bedeutung ist.

# ABSTRACT

The German Highway Capacity Manual (HBS) uses average delay to assess the level of service for at-grade intersections. The vehicle delay is mainly derived from capacity and traffic volume during an analysis period, which usually corresponds to the peak hour. During this period, traffic flow often shows variations and traffic demand may reach or even exceed capacity.

The HBS delay computation methods do not consider these variations in traffic flow equally. For signalized intersections the HBS procedure employs the 'non-stationarity factor'. It is calculated from the ratio of the peak 15-minutes flow rate and the peak hour flow rate assuming a parabolic arrival flow profile.

In this dissertation, empirical data is used to show that traffic volume during the peak hour can be distributed in very different forms. Based on these data, a set of abstract flow patterns is derived to represent non-stationary traffic flow within simulation models.

Microscopic traffic flow simulations are performed to determine the delay caused by the different flow patterns. For signalized intersections, delay is higher for non-stationary than for stationary flow in most cases. Further, the delay resulting from the simulation analysis is smaller on average as compared to the HBS method. Therefore, a correction factor is developed replacing the existing non-stationarity factor to better reflect the volume distribution within the design hour and is validated with empirical data. Beside the ratio of the peak 15-minutes flow rate and the peak hour flow rate, the new factor includes the volume-to-capacity ratio and the position of the highest half-hour volume (first or second half of the hour).

Compared to the existing non-stationarity-factor within the HBS calculation method for signalized intersections, this new factor leads to average delays fitting the simulation results better.

Regarding yield-controlled intersections, no clear impact of non-stationary traffic flow on the resulting level of service is revealed.



# VORWORT

Zuallererst möchte ich meinem Doktorvater Prof. Peter Vortisch danken – nicht nur für die Betreuung und Unterstützung dieser Dissertation, sondern erst recht für optimale Arbeitsbedingungen am Institut, für sein Vertrauen und für seine Mithilfe beim Entdecken neuer Perspektiven.

Meinem Zweitbetreuer Prof. Justin Geistefeldt danke ich sehr für seine konstruktive Kritik und seine Flexibilität hinsichtlich der organisatorischen Rahmenbedingungen.

Für eine gute Zeit am Institut, mit sowohl fachlich interessanten als auch allein der geistigen Erfrischung dienenden Gesprächen, dem regelmäßigen Angebot an Kuchen und der entsprechenden Nachfrage, sowie für Unterstützung unterschiedlichster Art danke ich meinen derzeitigen und früheren Kollegen, vor allem Sebastian Buck, Sascha von Behren und Tim Hilgert.

Großer Dank für kurzfristiges Korrekturlesen (und mitunter amüsante Kommentare), kritische Anmerkungen, teils fachliche Diskussionen und ermunternde Worte gebührt Stephan Rhode, Stefan Giuliani, Ulf-Thore Kröher und im Besonderen Joachim Breitner. Ihnen und allen, die sich ebenso angesprochen fühlen, danke ich außerdem für wahlweise motivationssteigernde Gespräche und Taten oder die während der Endphase dieser Arbeit notwendige und willkommene Ablenkung.

Karlsruhe, im November 2016

Ulrike Leyn



# INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung .....	1
1.1	Motivation .....	1
1.2	Methodik und Aufbau .....	2
2	Hintergrund der aktuell verwendeten Verfahren zur Wartezeitberechnung.....	5
2.1	Die Evolution der Wartezeitberechnung.....	5
2.1.1	Die Kreuzung als Wartesystem .....	5
2.1.2	Koordinatentransformation nach Kimber und Hollis.....	7
2.2	Wartezeit an vorfahrtgeregelten Knotenpunkten.....	9
2.2.1	Stochastischer Ansatz.....	9
2.2.2	Zeitabhängige Lösungen in HCM und HBS.....	10
2.3	Wartezeit an Knotenpunkten mit LSA .....	13
2.3.1	Deterministischer und stochastischer Ansatz .....	13
2.3.2	Zeitabhängige Wartezeitmodelle .....	14
2.3.3	Wartezeitberechnung für Knotenpunkte mit LSA .....	15
3	Instationarität in Theorie und Anwendung .....	21
3.1	Instationarität – Vorkommen und Bedeutung .....	22
3.1.1	Instationarität in der Stochastik.....	22
3.1.2	Instationarität in der Telekommunikationswissenschaft .....	23
3.1.3	Relevanz von Instationarität.....	24
3.2	Instationarität im Verkehr – Definition und Nachweis.....	25
3.3	Instationarität im Verkehrsfluss und ihr Einfluss auf die Wartezeitberechnung .....	26
3.3.1	Auswirkungen von Instationarität und deren Beachtung bei der Berechnung von Wartezeiten .....	26
3.3.2	Berücksichtigung von Instationarität bei der Wartezeitberechnung an Knotenpunkten mit LSA nach HBS .....	29
3.3.3	Behandlung von Instationarität im HCM .....	31
4	Instationarität in der Realität und ihre Modellierung.....	33

4.1	Entwicklung von Zuflussprofiltypen auf der Basis von Realdaten.....	33
4.2	Die Zuflussprofiltypen.....	37
4.3	Vorkommen instationärer Zuflussprofile in der Realität .....	40
4.3.1	Methodik zur Erkennung der Zuflussprofiltypen .....	40
4.3.2	Häufigkeit der Zuflussprofiltypen in den Spitzenstunden .....	42
5	Instationarität an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage .....	47
5.1	Simulationsmodell und Kalibrierung.....	47
5.1.1	Modellierung in VISSIM und Simulationsszenarios.....	47
5.1.2	Kalibrierung des VISSIM-Modells .....	50
5.2	Auswertung der Simulationsergebnisse .....	52
5.3	Ein neuer Faktor zur Modellierung der Instationarität .....	57
5.4	Identifikation des optimalen Faktors mithilfe der Realdaten .....	61
5.5	Ergebnisse bei der Anwendung des neuen Instationaritätsfaktors .....	64
5.6	Diskussion des neuen Instationaritätsfaktors und weitere Einflussfaktoren	70
5.7	Aktuelle Forschung zum peak hourly factor .....	77
5.8	Zusammenfassung .....	79
6	Instationarität an vorfahrtgeregelten Knotenpunkten.....	83
6.1	Simulationsmodell und Kalibrierung.....	83
6.1.1	Aufbau und Kalibrierung des VISSIM-Modells .....	83
6.1.2	Modellierung der Instationarität.....	87
6.2	Auswertung der Simulationsergebnisse .....	89
6.2.1	Instationarität im Hauptstrom .....	89
6.2.2	Instationärer Zufluss im Nebenstrom bei konstantem Zufluss im Hauptstrom .....	92
6.2.3	Instationarität im Hauptstrom und im Nebenstrom.....	96
6.3	Zusammenfassung .....	101
7	Schlussfolgerungen.....	103
	Literatur .....	105
	Abbildungsverzeichnis.....	109
	Tabellenverzeichnis .....	113
	Anhang.....	115

# ABKÜRZUNGEN

FS	Fahstreifen
Fz	Fahrzeug(e)
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
HCM	Highway Capacity Manual
IF	Instationaritätsfaktor
Kfz	Kraftfahrzeug(e)
LOS	level of service
LSA	Lichtsignalanlage
NKS	Nachkommastelle
PHF	peak hourly factor
PZS	Pegelzählstelle
QSV	Qualitätsstufe(n) des Verkehrsablaufs
RMSPE	root mean square percentage error



# 1 EINLEITUNG

Die Kapazität von Verkehrsanlagen ist ein zentraler Aspekt der Qualität eines Verkehrssystems. Das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) hat in Deutschland die Funktion einer Richtlinie und beinhaltet Verfahren zur Bewertung der Qualität verschiedener Arten von Verkehrsanlagen. Zu ihrer Beschreibung dienen dabei die Qualitätsstufen des Verkehrsablauf (QSV) nach dem Vorbild der levels of service (LOS) des US-amerikanischen Highway Capacity Manual (HCM). (vgl. HBS, 2015 und HCM, 2010)

## 1.1 Motivation

Für die Bestimmung der QSV bzw. des LOS an plangleichen Knotenpunkten ist in HBS (2015) und HCM (2010) die mittlere Wartezeit der Fahrzeuge das maßgebende Kriterium. Diese wird für Kraftfahrzeuge auf Basis der Kapazität und der Verkehrsstärke je Fahrstreifen innerhalb einer Analyseperiode berechnet. Von besonderem Interesse ist die Bestimmung der Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs für den Zeitraum der Spitzenstunde, da gerade bei entsprechend hohen Belastungen ein Funktionieren des Knotenpunkts gewährleistet sein soll.

Die Verkehrsstärke, die sich dabei in ihrer Höhe häufig nahe der Kapazität bewegt oder diese kurzzeitig sogar überschreitet, weist häufig keinen konstanten Verlauf über die Stunde auf, sondern schwankt in ihrer Höhe über die zeitlichen Teilintervalle hinweg.

Die Methoden zur Wartezeitberechnung in HBS (2015) und HCM (2010) sind im Kern von Modellen der Warteschlangentheorie abgeleitet. Innerhalb dieser theoretischen Berechnungsverfahren wird jedoch ein stationärer, das heißt gleichbleibender, Ankunftsprozess mit einem Auslastungsgrad kleiner eins vorausgesetzt. Um dennoch diese Art von Modellen auf die in der Realität auftretenden Zuflüsse anzuwenden, werden Näherungslösungen verwendet. Die Insta-

tionarität, das heißt die Veränderung der Verkehrsstärke im Verlauf des betrachteten Zeitraums und ein mögliches zeitweises Überschreiten der Kapazität, wird dabei nur teilweise beachtet.

Das Berechnungsverfahren für die mittlere Wartezeit an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage des HBS (2015) beinhaltet einen Faktor zur Berücksichtigung instationären Zuflusses. Dieser berechnet sich über das höchstbelastete 15-Minuten-Intervall und basiert auf der Annahme eines parabelförmigen Verlaufs der Ganglinie innerhalb der Spitzenstunde.

Empirische Daten zeigen im Rahmen dieser Arbeit jedoch, dass in der Realität die Verkehrsstärke innerhalb der Spitzenstunde in den meisten Fällen nicht konstant ist und auch selten ein parabelförmiges Profil zeigt. Aufgrund dessen untersucht diese Arbeit den Einfluss von Instationarität auf die Wartezeit an Knotenpunkten, dargestellt durch verschiedene mögliche Formen für den Verlauf der Verkehrsstärke. Für signalgeregelte Knotenpunkte wird als Ergebnis der Instationaritätsfaktor neu entwickelt, um unterschiedliche Charakteristika der Instationarität detaillierter berücksichtigen zu können.

## 1.2 Methodik und Aufbau

Eine Modellierung durch mikroskopische Verkehrsfluss-Simulation und Zuflussprofiltypen, entworfen auf der Basis empirischer Daten, stellt die verwendete Umgebung für die Analyse dar. Der Vorteil dieser laborartigen Rahmenbedingungen ist die Möglichkeit zur systematischen Untersuchung der Auswirkungen von Instationarität, da andere Einflüsse auf die Wartezeit vermieden werden können.

Für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage wird ein Festzeitsignalprogramm eingesetzt. Es ist davon auszugehen, dass bei verkehrabhängiger Steuerung die Instationarität eine geringere Auswirkung auf die Wartezeit besitzt, da bereits von sich verändernden Zuflüssen ausgegangen wird. Nach HBS (2015) ist zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer solchen Steuerung außerdem die Bewertung eines adäquaten Festzeitprogramms vorgesehen.

Zur Modellierung vorfahrt geregelter Knotenpunkte dient eine Einmündung in eine einstreifige Strecke. Beide Arten von Knotenpunkten werden im innerstädtischen Kontext betrachtet, wobei sich die Berechnungsverfahren des HBS (2015) für Landstraßen grundsätzlich nicht davon unterscheiden.

Der Inhalt dieser Arbeit gliedert sich in zwei Hauptteile.

Kapitel 2 und 3 beschäftigen sich mit der Entstehung und den theoretischen Grundlagen der aktuell in HBS (2015) und HCM (2010) enthaltenen Methodik zur Wartezeitberechnung und ihrer Berücksichtigung instationärer Zuflüsse. Außerdem wird der Beachtung von Instationarität und ihrer Auswirkung in allgemeinerem Zusammenhang nachgegangen.

Im zweiten Teil wird die Entwicklung der für die Untersuchung verwendeten Zuflussprofiltypen in Kapitel 4 erläutert, bevor der Fokus auf ihrer Verwendung innerhalb der Simulationsmodelle in Kapitel 5 und 6 liegt. Kapitel 5 enthält die Modellierung, die Simulationsergebnisse sowie die Entwicklung und Validierung eines neuen Instationaritätsfaktors für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage. Die Untersuchung der Auswirkungen von Instationarität an vorfahrt geregelten Knotenpunkten erfolgt in Kapitel 6.

In Kapitel 7 sind schließlich die wichtigsten Ergebnisse und die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen zusammengefasst.



# **2 HINTERGRUND DER AKTUELL VERWENDETEN VERFAHREN ZUR WARTEZEITBERECHNUNG**

Um Wartezeiten an Knotenpunkten mit und ohne Lichtsignalanlage berechnen zu können, geben das HBS und das HCM Verfahren und Berechnungsmethoden vor, die im Grundsatz auf denselben Ideen beruhen. Deswegen wird im Folgenden zuerst die allgemeine Basis der Methoden zur Wartezeitberechnung vorgestellt, bevor der Fokus auf den Verfahren für die jeweiligen Knotenpunktarten in HBS und HCM liegt. Statt einer ausführlichen Darstellung aller allgemeineren Grundlagen sei prinzipiell auf die entsprechende Literatur und Lehrbücher verwiesen. Daher wird im Folgenden lediglich auf die Punkte im Detail eingegangen, die zum Verständnis der für diese Arbeit relevanten Themen notwendig sind.

## **2.1 Die Evolution der Wartezeitberechnung**

Methoden zur Berechnung von Wartezeiten, ganz gleich ob durch theoretisch simple Warteschlangenmodelle oder Ansätze auf Basis von komplexeren Markov-Ketten, beruhen auf stochastischen Ankunftsprozessen. Um den Aufbau und mögliche Problematiken der Berechnungsmodelle besser verstehen zu können, lohnt sich ein Blick auf deren Entstehungsgeschichte.

### **2.1.1 Die Kreuzung als Wartesystem**

Adams (1936) konnte erstmals nachweisen, dass der Verkehrsablauf, gekennzeichnet durch Fahrzeugankünfte, einer stochastischen Verteilung, genauer einer Poissonverteilung, folgt. Auch die negative Exponentialverteilung der „Intervalle, die zwischen den Ankünften aufeinanderfolgender Fahrzeuge verstreichen“ wird

von ihm festgestellt und beschrieben. Als praktische Anwendung untersucht er verschiedene theoretische Fallbeispiele von Lichtsignalanlagen, z. B. hinsichtlich der korrekten Dauer von Freigabezeiten. Außerdem befasst er sich mit der Frage nach Wartezeiten von Fußgängern, für die die Intervalle zwischen ankommenden Fahrzeugen, also die Zeitlücken, maßgeblich sind.

Genau dieses Beispiel stellt bereits ein einfaches Wartesystem dar. Der untergeordnete Verkehrsstrom (oder die Fußgänger bei Adams) und das Angebot an nutzbaren Zeitlücken im Hauptstrom stehen dabei für zwei der notwendigen kennzeichnenden Größen: die ankommenden, zu bedienenden Elemente sowie die Bedienzeiten. Der Knotenpunkt selbst steht dabei für die Bedienstelle. Ganz allgemein werden Wartesysteme durch die Kendall-Notation beschrieben, die aus mindestens drei Klassifikationsmerkmalen besteht: der Art des Ankunftsprozesses, der des Bedienprozesses und der Anzahl an Bedienstellen. Wird keine ergänzende Angabe gemacht, erfolgt die Bedienung nach dem FIFO-Prinzip (first in, first out). Die Beschreibung lautet also  $M/M/1$  und steht für einen Poisson-Prozess als Ankunftsstrom ( $M/\bullet/\bullet$ ), unabhängig identisch exponentiell verteilte Bedienzeiten ( $\bullet/M/\bullet$ ) und eine Bedienstelle ( $\bullet/\bullet/1$ ). Weitere Arten von Wartesystemen und ihre Notation werden im Folgenden an den relevanten Stellen genauer ausgeführt und sind in der entsprechenden Literatur ausführlich beschrieben. (Baum, 2013)

Methoden zur Berechnung von Wartezeiten, die ausschließlich auf dem rein analytischen Konzept der Warteschlangentheorie aufbauen, unterliegen dabei jedoch starken Einschränkungen. Ein stochastisches Gleichgewicht kann dabei nur bei unendlichem Zeithorizont und stabiler Ankunftsrate erreicht werden. Der Ankunftsprozess wird dabei als stationär, also nicht zeitabhängig (siehe Kapitel 3), vorausgesetzt und darf einen Auslastungsgrad von eins weder erreichen noch überschreiten. Bei der Anwendung auf den Verkehrsfluss als Ankunftsprozess hat dies zur Folge, dass exakte Ergebnisse nur schwer erzielt und folglich bestenfalls Näherungslösungen bei eher geringen Belastungen darstellen können, da es kaum oder nicht möglich ist, von diesen Rahmenbedingungen in der Praxis auszugehen. (Rouphail et al., 2001; Troutbeck und Brilon, 2001)

Aus diesem Grund verwenden laut Roupail et al. bereits frühe Modelle zur Wartezeitberechnung Näherungslösungen. So ist die Wartezeitformel für signal-geregelte Knotenpunkte von Webster (1958) einer der ersten Ansätze, der reine Warteschlangentheorie durch numerische Simulation ergänzt. Dennoch bleiben diese grundsätzlich auf stochastischen Konzepten basierenden Modelle durch ihre Rahmenbedingungen nur eingeschränkt nutzbar.

In der Realität sind diese strengen Annahmen aus verschiedenen Gründen nicht haltbar. Für die Bewertung der Verkehrsqualität eines Knotenpunkts ist nach dem HBS (2015) die Bemessungsverkehrsstärke relevant, die durch die Verkehrsstärke in der n-ten Stunde eines Jahres festgelegt ist oder die durch Messungen in der Hauptverkehrszeit ermittelte Verkehrsstärke innerhalb der entsprechenden Spitzenstunde. Damit ist die zu betrachtende Zeitspanne automatisch ein wohl definiertes und abgeschlossenes Zeitintervall, im Gegensatz zu dem in der Theorie für stochastische Modelle notwendigen unendlichen Zeithorizont.

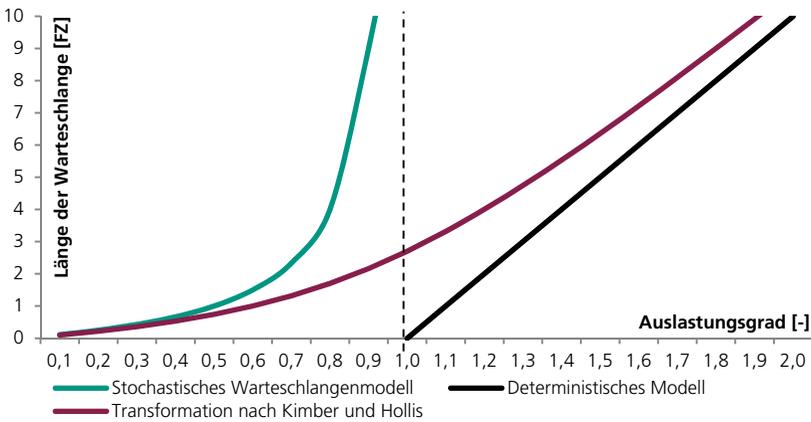
Auch liegt die Verkehrsstärke innerhalb der Bemessungsstunde im Allgemeinen in dem Bereich um die Kapazität herum oder übersteigt diese sogar. Laut Wu (1990) werde in der Praxis auf Auslastungsgrade um 1,0 herum innerhalb der Spitzenzeiten abgezielt. Den Fall einer Überlastung oder auch eines Auslastungsgrades knapp unterhalb der Kapazität realistisch abzubilden, sind die rein stochastischen Modelle nicht in der Lage. Roupail et al. (2001) argumentieren, dass für eine Auslastung nahe oder oberhalb der Kapazität die Warteschlange theoretisch auf eine unendliche Länge anwachsen würde, ohne dass sich das stochastische Gleichgewicht einstellt. Zusätzlich unterstellen die Modelle einen stationären Verkehrsfluss, der gerade innerorts in den Spitzenstunden nicht der Realität entspricht.

### **2.1.2 Koordinatentransformation nach Kimber und Hollis**

Nach Kimber und Hollis (1979) zeigen im Bereich hoher oder kapazitätsüberschreitender Belastungen nicht nur die stochastischen Modelle mit der Berechnung unendlicher Warteschlangen und entsprechender Wartezeiten ihre Schwäche, sondern ebenso die bei schwankender Nachfrage oder Kapazität und

Auslastungsgraden größer eins als Alternative verwendbaren deterministischen Ansätze. Letztere berechnen Wartezeiten allein über den Unterschied zwischen Nachfrage und Kapazität, ohne die stochastische Verteilung der Fahrzeugankünfte zu berücksichtigen.

Kimber und Hollis verwenden deshalb eine Methode, die als Koordinatentransformation bezeichnet wird, um ein zeitabhängiges Wartezeitmodell zu entwickeln. Das zugrundeliegende Wartesystem ist vom Typ  $M/G/1$ , gekennzeichnet durch poissonverteilte Ankünfte ( $M/\bullet/\bullet$ ) und eine generelle, nicht näher klassifizierte Verteilung ( $\bullet/G/\bullet$ ) der Bedienzeiten an einer Bedienstelle ( $\bullet/\bullet/1$ ). Ein nicht stationärer Zufluss und temporäres Überschreiten der Kapazität sind ausdrücklich Teil des Modells.



**Abbildung 2-1 Schematische Darstellung der Koordinatentransformation nach Kimber und Hollis (1979)**

Abbildung 2-1 stellt das Verfahren vereinfacht schematisch dar. Die Funktionskurve für die Berechnung der Warteschlangenlänge nach dem stochastischen Modell steigt bereits bei einem Auslastungsgrad unterhalb von eins stark und nähert sich einer Parallelen zur y-Achse durch den Wert eins asymptotisch an. Die Koordinatentransformation kippt diese Kurve gewissermaßen, so dass die gerade verlaufende Funktion des deterministischen Modells die Asymptote des daraus

entstehenden zeitabhängigen Modells darstellt. Für die genaue Herleitung und Darstellung der resultierenden Formel sei auf Kimber und Hollis (1979) verwiesen. Von besonderem Interesse ist dabei, dass das Modell durch einen entsprechend zu wählenden Faktor auf Knoten sowohl mit als auch ohne Lichtsignalanlage angewendet werden kann. Troutbeck und Brilon (2001) beurteilen die Formel als sinnvoll zur Bestimmung von Wartezeiten, vor allem bei zeitweiliger Überlastung.

Außerdem ist es möglich, als Ausgangspunkt für die Koordinatentransformation die von Kimber und Hollis verwendeten stochastischen und deterministischen Modelle durch jeweils andere Ansätze auszutauschen. Auf dieser Basis entstanden etliche Weiterentwicklungen, vor allem auch die im HCM (2010) und HBS (2015) zur Berechnung von Wartezeiten an Knotenpunkten mit und ohne Lichtsignalanlage verwendeten Formeln.

## **2.2 Wartezeit an vorfahrtgeregelten Knotenpunkten**

### **2.2.1 Stochastischer Ansatz**

Zur Modellierung eines Knotenpunktes mit Vorfahrtregelung als rein stochastisches Wartesystem, noch ohne zeitabhängige Anpassungen, kommt nach Troutbeck und Brilon (2001) neben dem  $M/M/1$ -System mit der Annahme negativ exponentialverteilter Zeitlücken auch ein stärker differenzierter  $M/G2/1$ -Ansatz in Betracht. Hierbei wird durch zwei verschiedene Verteilungen genauer darauf eingegangen, in welchem Zustand sich das Wartesystem Knotenpunkt bei Ankunft eines Fahrzeuges befindet. Bei leerem System erreicht ein ankommendes Fahrzeug direkt die erste Position der Warteschlange und kann mit der nächsten ausreichend großen Zeitlücke direkt bedient werden. Existiert jedoch bereits eine Warteschlange, an deren Ende sich ein neu ankommendes Fahrzeug einreihet, unterliegt die nachfolgende Bedienung einer anderen Verteilung.

Die für die Anwendung geltenden Einschränkungen umfassen, neben konstantem Zufluss unterhalb der Kapazität und negativ exponentialverteilten Zeitlücken,

auch die Existenz konstanter Grenz- und Folgezeitlücken. Die Autoren schätzen, gerade für diesen erweiterten Fall, die Formeln als kompliziert und wenig praxistauglich ein.

### 2.2.2 Zeitabhängige Lösungen in HCM und HBS

Troutbeck und Brilon (2001) stellen eine auf der Koordinatentransformation nach Kimber und Hollis basierende, vereinfachte approximative Methode vor. Für die stochastische Komponente wird eine generalisierte Wartezeitformel verwendet, die aus der Skalierung einer minimalen Wartezeit über mehrere Konstanten und den Auslastungsgrad besteht. Laut der Autoren geht diese minimale Wartezeit auf Adams (1936) zurück (vgl. Kapitel 2.1.1). Für das deterministische Modell wird ein Term angegeben, der ebenfalls diese minimale Wartezeit enthält. Durch weitere vereinfachende Umformungen entsteht nach Aussage von Troutbeck und Brilon die Formel von Akçelik und Troutbeck (1991):

$$d = d_{\min}(1 + \gamma) + 900T \cdot \left[ (x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{8kx}{Q_e T}} \right] \quad 2-1$$

wobei:  $k = d_{\min}(\gamma + \varepsilon) \frac{Q_e}{3600}$

mit:

- d mittlere Wartezeit pro Kraftfahrzeug [s/Kfz]
- $d_{\min}$  minimale Wartezeit eines ankommenden Fahrzeugs [s/Kfz]
- $\gamma, \varepsilon$  Parameter (abhängig von Zeitlückencharakteristika)
- T betrachteter Zeitraum [h]
- x Auslastungsgrad
- $Q_e$  Verkehrsstärke [Kfz/h]

Durch Adaption auf ein M/M/1-Wartesystem mit  $\gamma = 0$ ,  $\varepsilon = 1$  und  $d_{\min} = 1/Q_e$  ergibt sich schließlich die im HBS (2015) zur Berechnung von Wartezeiten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage vorgesehene Gleichung 2-2.

$$t_{w,i} = \frac{3600}{C_i} + 900 \cdot \left[ \left( \frac{q_i}{C_i} - 1 \right) + \sqrt{\left( \frac{q_i}{C_i} - 1 \right)^2 + \frac{8 \cdot q_i}{C_i^2}} \right] \quad 2-2$$

mit:

$t_{w,i}$  mittlere Wartezeit pro Kraftfahrzeug [s/Kfz] im Verkehrsstrom i [s]

$C_i$  Kapazität des Verkehrsstroms i [Kfz/h]

$q_i$  Verkehrsstärke in Verkehrsstrom i [Kfz/h]

Dabei berechnet sich die Kapazität nach der Formel von Siegloch (vgl. HBS, 2015; Troutbeck und Brilon, 2001):

$$C_i = \frac{3600}{t_f} \cdot e^{-\frac{q_p}{3600}(t_g - \frac{t_f}{2})} \quad 2-3$$

mit:

$C_i$  Kapazität des Verkehrsstroms i [Pkw-E/h]

$t_f$  mittlere Folgezeitlücke für Strom i [s]

$t_g$  mittlere Grenzzeitlücke für Strom i [s]

$q_p$  Verkehrsstärke der maßgebenden Hauptströme [Kfz/h]

Die im HCM (2010) angegebene Formel zur Berechnung der mittleren Wartezeiten (Gleichung 2-4) stimmt nahezu mit der HBS (2015)-Formel überein. Sie wird ergänzt durch den pauschalen Wert von fünf Sekunden, der den Brems- und Beschleunigungsvorgang miteinberechnet. Als zeitlicher Bezug wird nicht die gesamte Spitzenstunde, sondern grundsätzlich ein 15-Minuten-Intervall empfohlen, dass bei Bedarf verlängert werden soll.

Ein weiterer geringer Unterschied zum HBS (2015) ist die Verwendung des Ansatzes von Harders (1968) zur Bestimmung der Kapazität eines untergeordneten Stroms (Gleichung 2-5, vgl. HCM, 2010; Troutbeck und Brilon, 2001).

$$d = \frac{3600}{c_{m,x}} + 900T \cdot \left[ \left( \frac{v_x}{c_{m,x}} - 1 \right) + \sqrt{\left( \frac{v_x}{c_{m,x}} - 1 \right)^2 + \frac{\left( \frac{3600}{c_{m,x}} \right) \left( \frac{v_x}{c_{m,x}} \right)}{450T}} \right] + 5 \quad 2-4$$

mit:

d mittlere Wartezeit pro Kraftfahrzeug [s/Kfz]

$v_x$  Verkehrsstärke für Strom x [Kfz/h]

$c_{m,x}$  Kapazität des Verkehrsstroms x [Kfz/h]

T Untersuchungszeitraum [h]

$$c_{p,x} = v_{c,x} \frac{e^{-\frac{v_{c,x} t_{c,x}}{3600}}}{1 - e^{-\frac{v_{c,x} t_{f,x}}{3600}}} \quad 2-5$$

mit:

$c_{p,x}$  potentielle Kapazität des Verkehrsstroms x [Kfz/h]

$t_{c,x}$  Grenzzeitlücke für untergeordneten Strom x [s]

$t_{f,x}$  Folgezeitlücke für untergeordneten Strom x [s]

$v_{c,x}$  Verkehrsstärke der Konfliktströme für Strom x [Kfz/h]

Brilon (2007) wendet die Koordinatentransformation in mehreren Varianten und mit verschiedenen Ansätzen für den deterministischen Teil an und erhält bei einer dieser Kombinationen genau die Formel von Akçelik und Troutbeck (Gleichung 2-1) als Ergebnis. Er bewertet sie jedoch als wenig geeignet für die praktische Anwendung, da sie nur bei stark vereinfachten Rahmenbedingungen gelte. In der gleichen Untersuchung verwendet er Markov-Ketten, um exaktere Lösungen zur Wartezeitberechnung an zeitweise überlasteten Knotenpunkten zu erzielen, deren Ergebnisse aber nur sehr wenig von den approximativen Ansätzen abweichen. Allerdings empfiehlt er eine größere Auswahl an Berechnungsmodellen, darunter auch eine erweiterte Variante der Formel von Akçelik und Troutbeck, um nicht nur selten in der Realität vorkommenden Spezialfälle abzudecken.

## 2.3 Wartezeit an Knotenpunkten mit LSA

### 2.3.1 Deterministischer und stochastischer Ansatz

Grundlegend ergeben sich Wartezeiten an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage zuerst durch den reinen Ablauf des Signalprogramms. Fahrzeuge, die während der Sperrzeit ihrer Phase am Knotenpunkt eintreffen, müssen bis zum Beginn der Freigabezeit warten. Diese deterministische Wartezeit lässt sich einfach über die Elemente des Signalprogramms sowie den Fahrzeugzufluss berechnen.

Hierbei wird ein gleichmäßiger Zu- und Abfluss sowie ein vollständiges Abfließen der aufgestauten Fahrzeuge während der Freigabezeit unterstellt. Dementsprechend liefert diese Methode allein nur bei niedrigen Auslastungsgraden (bis etwa 0,5) einigermaßen realistische Ergebnisse. (Rouphail et al., 2001)

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 angesprochen, war Webster (1958) einer der ersten, der ein Modell entwickelte, das einen rein analytischen, auf Warteschlangentheorie basierenden Ansatz durch numerische Simulation ergänzt. Dieses Modell dient als Basis vieler weiterer Modelle und ist in Gleichung 2-6 dargestellt.

$$d = \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65 \left( \frac{c}{q^2} \right)^{\frac{1}{3}} x^{(2+5\lambda)} \quad 2-6$$

mit:

- d mittlere Wartezeit pro Fahrzeug [s]
- c Umlaufzeit [s]
- $\lambda$  effektiver Freigabezeitanteil, d. h.  $\lambda = g/c$  [-]
- q Verkehrsstärke [Fz/s]
- s Sättigungsverkehrsstärke [Fz/s]
- x Auslastungsgrad, d. h.  $x = q/\lambda s$  [-]

Der erste Term der Formel beschreibt dabei die mittlere Wartezeit unter der Annahme gleichverteilter Ankünfte, der laut Webster (1958) bei niedrigen Auslastungsgraden bereits recht gute Ergebnisse liefert. Der zweite Term berücksichtigt zusätzlich die Zufälligkeit der Ankünfte. Diese beiden Terme besitzen einen rein

theoretischen Hintergrund, der dritte Term hingegen basiert allein auf den Ergebnissen numerischer Simulationen.

### 2.3.2 Zeitabhängige Wartezeitmodelle

Um die bereits ausführlich beschriebenen Schwachstellen und die zugrundeliegenden Annahmen der rein stochastischen Modelle zu vermeiden, sind nach Roupail et al. (2001) verschiedene Herangehensweisen möglich. Der Ansatz, der sich aufgrund seiner Qualität durchsetzen konnte, ist auch für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage die Koordinatentransformation nach Kimber und Hollis.

Dabei ist anzumerken, dass nach Aussage von Roupail et al. die im Modell von Kimber und Hollis enthaltene modifizierte Pollaczek-Khintchine-Formel für den stochastischen Teil für den Fall eines Knotenpunktes mit Lichtsignalanlage weniger gut geeignet sei, da Teile dieser Formel dann je nach aktueller Situation entsprechend angepasst bzw. kalibriert werden müssten. Um in der Tradition von Webster einfach anwendbare und robuste Modelle für signalisierte Knotenpunkte zu erhalten, verwendet Akçelik (1980) die Technik der Koordinatentransformation nach Kimber und Hollis, jedoch mit verschiedenen Varianten der zugrundeliegenden stochastischen bzw. deterministischen Berechnung der Warteschlangenlänge. Auf die verschiedenen von Akçelik entwickelten Modelle soll im Folgenden noch genauer eingegangen werden.

Das Konzept der Warteschlangentheorie stellt nur einen speziellen Typ einer Markov-Kette dar. Neuere Ansätze zur Wartezeitberechnung, wie von Wu (1990) oder Viti und van Zuylen (2004), basieren auf weniger stark beschränkten Markov-Ketten mit einer deutlich größeren Anzahl an Freiheitsgraden und damit einhergehend ebenso höherer Komplexität.

In seiner Dissertation entwickelt Wu einen Ansatz auf der Basis von Markov-Ketten, mit deren Hilfe Rückstaulängen und Wartezeiten numerisch exakt bestimmt werden können. Aufgrund der dafür umfangreichen Berechnungen entwickelt er außerdem weitere Näherungsformeln, die auch Instationarität im Verkehrsfluss berücksichtigen.

### 2.3.3 Wartezeitberechnung für Knotenpunkte mit LSA

Im Folgenden sollen die Berechnungsformeln für die Wartezeit an Knotenpunkten mit festzeitgesteuerter Lichtsignalanlage aus dem aktuellen HBS (2015) genauer untersucht und Bezug auf ihre Herkunft genommen werden. Für die Bestimmung der Bestandteile dieser Formeln, auf die an dieser Stelle nicht explizit eingegangen wird, sei auf das HBS (2015) verwiesen.

Die folgenden Gleichungen 2-7 bis 2-9 dienen der Berechnung der Gesamtwartezeit  $t_{W,j}$  pro Fahrzeug auf dem Fahrstreifen  $j$ , die sich aus der Grundwartezeit  $t_{W,G,j}$ , die allein durch den Ablauf des Signalprogramms entsteht, und der Wartezeit aufgrund eines Rückstaus bei Freigabezeitende  $t_{W,R,j}$ , zusammensetzt.

$$t_{W,j} = t_{W,G,j} + t_{W,R,j} \quad 2-7$$

mit:

$t_{W,j}$  mittlere Wartezeit eines Kfz auf dem FS  $j$  [s]

$t_{W,G,j}$  Grundwartezeit aufgrund des periodischen Wechsels zwischen Freigabe- und Sperrzeit auf dem Fahrstreifen  $j$  [s]

$t_{W,R,j}$  Wartezeit aufgrund des Rückstaus bei Freigabezeitende auf dem FS  $j$  [s]

$$t_{W,G,j} = \frac{t_U \cdot (1 - f_{A,j})^2}{2 \cdot (1 - \min(1; x_j) \cdot f_{A,j})} \quad 2-8$$

mit:

$t_{W,G,j}$  Grundwartezeit aufgrund des periodischen Wechsels zwischen Freigabe- und Sperrzeit auf dem FS  $j$  [s]

$t_U$  Umlaufzeit [s]

$f_{A,j}$  Abflusszeitanteil des FS  $j$  [-],  $f_{A,j} = t_{A,j} / t_U$

mit Abflusszeit des FS  $j$  [s],  $t_{A,j} = t_{R,j} + 1s$  ( $t_{R,j}$  Freigabezeit Strom  $j$  [s])

$x_j$  Auslastungsgrad des FS  $j$  [Kfz/h]

$$t_{W,R,j} = \frac{N_{GE,j} \cdot 3600}{C_{0,i,j}} \quad 2-9$$

mit:

$t_{W,R,j}$  Wartezeit aufgrund des Rückstaus bei Freigabezeitende auf dem FS j [s]

$N_{GE,j}$  mittl. Rückstau bei Freigabezeitende für den Betrachtungszeitraum auf FS j [Kfz]

$C_{0,i,j}$  Kapazität des Stroms i auf FS j [Kfz/h]

Die gesamte Wartezeit pro Fahrzeug ergibt sich als Summe der Wartezeit, die dadurch entsteht, dass während der Sperrzeit ankommende Fahrzeuge warten müssen, bis sie während der Freigabezeit abfließen können, und der Wartezeit, die noch hinzukommt, falls sich die Warteschlange aller aufgestauten Fahrzeuge während der entsprechenden Freigabezeit nicht auflösen kann.

Die durch den reinen Ablauf des Signalprogramms entstehende deterministische Wartezeit ist somit von der Berechnung her eindeutig und wird in exakt dieser Form z. B. von Webster (1958), Akçelik (1980) oder auch Wu (1990) verwendet.

Der zweite Teil der Gesamtwartezeit, der laut Wu durch Überlastungen und die Instationarität im Zufluss entsteht, basiert auf der Bestimmung der mittleren Rückstaulänge. Die Art und Weise, diese zu berechnen, mache demnach grundsätzlich den Unterschied der vielen verschiedenen Modelle zur Ermittlung der mittleren Wartezeit aus.

Im HBS (2015) wird für die Berechnung der mittleren Rückstaulänge der in Gleichung 2-10 folgende Ausdruck verwendet. Für die genauere Betrachtung dieser Formel sollen der Instationaritätsfaktor  $f_{in,j}$  und der Wert 0,58 im ersten Term zunächst außer Acht gelassen werden. Eine ausführliche Darstellung hierzu folgt in Kapitel 3.3.2.

$$N_{GEj} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,58 \cdot T \cdot C_{0,ij}}{4} \cdot \left[ (f_{in,j} \cdot x_j - 1) + \sqrt{(f_{in,j} \cdot x_j - 1)^2 + \frac{4 \cdot f_{in,j} \cdot x_j}{0,58 \cdot T \cdot C_{0,ij}}} \right] \\ \frac{T \cdot C_{0,ij}}{4} \cdot \left[ (x_j - 1) + \sqrt{(x_j - 1)^2 + \frac{4 \cdot x_j}{T \cdot C_{0,ij}}} \right] \end{array} \right. \quad 2-10$$

mit:

- $N_{GEj}$  mittl. Rückstau bei Freigabezeitende  
für den Betrachtungszeitraum auf FS j [Kfz]
- $T$  Betrachtungszeitraum (i. d. R.  $T=1h$ ) [h]
- $C_{0,ij}$  Kapazität des Stroms i auf FS j [Kfz/h]
- $f_{in,j}$  Instationaritätsfaktor für den FS j [-] (siehe Kapitel 3.3.2)
- $x_j$  Auslastungsgrad des FS j [-]

Der zweite Term dieser Gleichung stimmt mit einer von Akçelik (1980) entwickelten Formel überein:

$$N_o = \frac{Q \cdot t}{4} \cdot \left[ (x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{4 \cdot x}{Q \cdot t}} \right] \quad 2-11$$

mit:

- $N_o$  mittlerer Rückstau (average overflow queue) [Kfz]
- $t$  betrachteter Zeitraum [h]
- $Q$  Kapazität [Kfz/h]
- $x$  Auslastungsgrad [-]

Diese ist das Ergebnis einer Koordinatentransformation nach der Art von Kimber und Hollis (1979), enthält jedoch „einige geringfügige vereinfachende Annahmen“ (Akçelik (1980), S. 10), die aber nicht näher ausgeführt werden. Der zugrundeliegende Ausdruck für die deterministische Komponente der Formel (Gleichung 2-12) wird von Akçelik in der Veröffentlichung hergeleitet.

$$N_d = \frac{(1 - x) \cdot Q \cdot t}{2} \quad 2-12$$

mit:

$N_d$  mittlerer Rückstau, rein deterministische Berechnung [Kfz]

$x$  Auslastungsgrad [-]

$Q$  Kapazität [Kfz/h]

$t$  betrachteter Zeitraum [h]

Die stochastische Komponente stammt nach Aussage von Akçelik von McNeil (1968) und stellt nach Aussagen beider Autoren eine Abgrenzung nach oben (einen ‚upper bound‘-Ausdruck) für poissonverteilte Ankünfte dar:

$$N_s = \frac{1}{2 \cdot (1 - x)} \quad 2-13$$

mit:

$N_s$  mittlerer Rückstau, rein stochastische Berechnung [Kfz]

$x$  Auslastungsgrad [-]

Laut Akçelik ist daher auch die Formel für die mittlere Rückstaulänge (Gleichung 2-11, in Akçelik (1980) Gleichung 16) ‚upper bound‘ und liefert, gerade im Bereich von Auslastungsgraden kleiner eins, etwas größere Werte als eine andere, in der gleichen Veröffentlichung beschriebene, Formel (in Akçelik (1980) Gleichung 17). Diese entsteht zwar ebenfalls über eine Koordinatentransformation nach Kimber und Hollis, enthalte aber eine andere stochastische Komponente.

Wu (1990) greift in seiner Dissertation zur Entwicklung seiner Näherungsformel gerade auf diese ‚andere‘ Formel von Akçelik (1980) zurück. Auch Roupail et al. (2001) zitieren in ihrem umfassenden Überblick zum Verkehrsfluss an signalisierten Knotenpunkten diese Formel.

Der Autor selbst verfolgt ebenfalls diese ‚andere‘ Formel weiter, beispielsweise um in Akçelik und Rouphail (1993) eine verallgemeinerte Variante zur Berücksichtigung verschiedener Nachfragebedingungen zu entwickeln.

Wu äußert sich allerdings gegenüber der ‚anderen‘ Formel von Akçelik in ihrer ursprünglichen Form kritisch, da sie mögliche Instationaritäten im Verkehrsfluss nur unzureichend berücksichtige und somit zu niedrige Werte für die mittlere Rückstaulänge liefere.

Das HCM (2010) greift bei der Berechnung von Wartezeiten an signalisierten Knotenpunkten grundsätzlich ebenfalls auf die im HBS (2015) verwendete Formel zurück. Allerdings erfolgt die Bestimmung der Gesamtwartezeit im HCM in einer detaillierteren Form als im HBS, da keine Unterscheidung in einzelne Verfahren für Festzeit-Signalsteuerung und verkehrsabhängige Steuerung erfolgt. Dabei ergibt sich die Gesamtwartezeit aus drei Komponenten:

$$d = d_1 + d_2 + d_3 \quad 2-14$$

mit:

- d     mittlere Wartezeit pro Fahrzeug [s/Fz]
- d<sub>1</sub>   uniform delay: Wartezeit durch das Signalprogramm [s/Fz]
- d<sub>2</sub>   incremental delay: Wartezeit durch Rückstau bei Freigabezeitende [s/Fz]
- d<sub>3</sub>   initial queue delay: Wartezeit durch bereits bestehenden Rückstau zu Beginn des Untersuchungszeitraums [s/Fz]

Der erste Wartezeitanteil d<sub>1</sub> gleicht dem des HBS (2015), hinzu kommt mit d<sub>3</sub> die Berücksichtigung einer möglicherweise bereits zu Beginn des Untersuchungszeitraums existierenden Warteschlange. Dieser letzte Teil beinhaltet einige Fallunterscheidungen und wird aufgrund der im HBS fehlenden Vergleichsgröße hier nicht näher betrachtet. Die zweite Wartezeitkomponente d<sub>2</sub> berechnet sich wie in Gleichung 2-15 angegeben.

$$d_2 = 900 T \left[ (X_A - 1) + \sqrt{(X_A - 1)^2 + \frac{8 k I X_A}{c_A T}} \right] \quad 2-15$$

mit:

- $d_2$  incremental delay: Wartezeit durch Rückstau bei Freigabezeitende [s/Fz]
- $T$  betrachteter Zeitraum [h]
- $X_A$  Auslastungsgrad [-]
- $k$  incremental delay factor: zur Berücksichtigung der Art der Signalisierung (Festzeit, Koordinierung etc.) [-]
- $I$  upstream filtering adjustment factor: zur Berücksichtigung des Einflusses anderer Lichtsignalanlagen auf den betrachteten Zufluss [-]
- $c_A$  Kapazität [Fz/h]

Die Faktoren  $I$  und  $k$  dienen also der Differenzierung zwischen den verschiedenen möglichen Arten der Signalsteuerung und der eventuell vorhandenen Wirkung von Lichtsignalanlagen auf den zu analysierenden Knotenpunkt. Ohne diese Elemente stimmte die Formel ebenfalls mit dem zweiten Teil der Wartezeitberechnung nach HBS (2015) ohne die Faktoren zur Berücksichtigung der Instationarität überein.

# 3 INSTATIONARITÄT IN THEORIE UND ANWENDUNG

Da sich diese Arbeit mit den Auswirkungen von Instationarität auf Wartezeiten beschäftigt, ließ es sich in logischer Folge bisher nicht vermeiden, die Begriffe vor ihrer eigentlichen Erklärung zu verwenden. Eine allgemeingültige Definition ist ohnehin schwierig, da sie stark vom entsprechenden fachlichen Kontext abhängt. Daher soll nun der Definition und Bedeutung von Instationarität in verschiedenen Zusammenhängen genauer auf den Grund gegangen werden, vor allem hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Wartezeiten. Grundsätzlich ist Instationarität dabei meist kein eigenständiges Konzept, sondern vielmehr als das Nichtvorhandensein oder die Verletzung der Rahmenbedingung Stationarität zu verstehen.

Die meisten Wartezeitberechnungsverfahren basieren, wie erläutert, grundlegend auf Wartesystemen oder allgemein stochastischen Prozessen. Deshalb ist es naheliegend, die Suche nach Bedeutung, Auswirkung und Behandlung von (In)Stationarität in der Wahrscheinlichkeitstheorie zu beginnen.

Die Technologie der Telekommunikation wandte laut Baum (2013) Erkenntnisse aus der Warteschlangentheorie bereits sehr früh praktisch an und entwickelte diese auch maßgeblich weiter. Nachdem sich dieser Forschungsbereich ebenfalls um eine spezielle Art von Verkehr, nämlich von Sprache und Daten, dreht, ist auch hier ein kurzer Überblick von Interesse.

Der Hauptfokus des Kapitels liegt aber schließlich auf Instationarität in Bezug auf Kraftfahrzeugverkehr, Verkehrsfluss und ihren Einfluss auf die Wartezeit von Fahrzeugen an Knotenpunkten sowie insbesondere auf der entsprechenden Berücksichtigung in den Verfahren des HBS (2015) und HCM (2010).

## 3.1 Instationarität – Vorkommen und Bedeutung

### 3.1.1 Instationarität in der Stochastik

Stationarität als Eigenschaft stochastischer Prozesse kann in zwei verschieden starke Varianten unterschieden werden. Ein stochastischer Prozess ist genau dann streng stationär, wenn beliebige gleich lange Folgen von Variablen dieselbe gemeinsame Verteilungsfunktion besitzen. Der Prozess befindet sich im Gleichgewicht, sein Zustand ist unabhängig vom Beobachtungs- oder Startzeitpunkt. So ist insbesondere eine Markov-Kette mit passender Startverteilung ein streng stationärer Prozess, da ihr aktueller Zustand allein vom vorhergehenden Zustand und nicht vom absoluten Zeitpunkt abhängt. Ein stochastischer Prozess heißt schwach stationär oder stationär im weiteren Sinne, wenn sein Erwartungswert und die Autokorrelation, das heißt die Korrelation mit sich selbst zu einem anderen Zeitpunkt, von der Zeit unabhängig sind. (vgl. Baum, 2013 sowie Giambene, 2014)

Stationarität als essentielle Voraussetzung bedeutet in erster Linie, dass Verfahren oder Modelle nicht oder nur sehr eingeschränkt genutzt werden können, solange Stationarität nicht gegeben ist oder zumindest nicht nachgewiesen werden kann. Eine Aussage, wie sich eine Verletzung dieser Bedingung generell auswirkt, lässt sich dabei allerdings nicht treffen. In Bezug auf Warteschlangentheorie und dabei speziell für Warteschlangen mit Poisson'schen Ankunftsprozessen formulierte Ross (1978) die Vermutung („Ross's conjecture“), dass mittlere Wartezeiten in einem Wartesystem mit einer Bedienstelle und unbeschränktem Warteraum umso geringer ausfallen, je stationärer der Eingangsprozess ist.

Ein nicht stationärer Poissonprozess kann in diesem Kontext mithilfe einer Intensitätsfunktion, die selbst ein Zufallsprozess ist, modelliert werden. Diese führt zu wechselnden Erwartungswerten der Ankunftsrate. Eine analytische Ableitung des Einflusses dieses schwankenden Ankunftsprozesses auf die mittleren Wartezeiten ist für den allgemeinen Fall nicht bekannt. Auch die Vermutung von Ross (1978) konnte bisher nicht prinzipiell, sondern nur für Spezialfälle mit Einschränkungen bewiesen werden, wie etwa in der Veröffentlichung von Bäuer-

le und Rolski (1998). Sie verwenden modulierte Markov-Ketten zur Modellierung des Ankunftsprozesses, so dass die Ankunftsrate sich gemäß einer Übergangsmatrix verändert. Dabei werden zwei Modelle betrachtet, die sich allein in der Häufigkeit der Wechsel zwischen Ankunftsrate unterschiedlicher Intensität unterscheiden. Es kann gezeigt werden, dass seltenere Wechsel zwischen den verschiedenen Ankunftsrate zu höheren Wartezeiten führen als häufigere Wechsel. Der mittlere Auslastungsgrad ist in beiden Fällen kleiner als eins, das System also dauerhaft stabil.

### **3.1.2 Instationarität in der Telekommunikationswissenschaft**

Recht bald nach der Erfindung und Verbreitung des Telefons Ende des 19. Jahrhunderts begann Erlang ab 1917, Wahrscheinlichkeitsrechnung zur Untersuchung von Staus und Blockierungen in der Anrufvermittlung einzusetzen. Damit erfolgten erste praktische Anwendungen bereits zeitgleich mit der eigentlichen Entstehung der wissenschaftlichen Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie. Etwas später befasste sich Palm ab etwa 1937 mit der „Auswirkung von Intensitätsschwankungen im Fernspreverkehr“ (Titel seiner Dissertation, 1943). Auf beide Forscher gehen Erkenntnisse und Konzepte zurück, die ihre Namen tragen (Erlang-Verteilung, Palm-Wahrscheinlichkeit) und zu wichtigen Grundlagen in der Markov-Theorie zählen. (Giambene, 2014; Baum, 2013; Palm, 1943)

Bezüglich Schwankungen im Ankunftsprozess wird für Telekommunikationssysteme zwischen peakedness („Spitzigkeit“) und Instationarität unterschieden. Heffes (1973) untersucht mit Hilfe numerischer Methoden die Auswirkungen von peakedness in verschieden starker Ausprägung auf Wartezeiten und stellt eine starke Empfindlichkeit der Leistungsfähigkeit des Warteschlangensystems auf die peakedness fest. Dabei beschreibt die peakedness mit dem Quotient aus Varianz und Mittelwert eine Art Variationskoeffizient einer Verteilung, um sie mit den Eigenschaften einer Poisson-Verteilung zu vergleichen. Je stärker die peakedness einer Verteilung, desto höhere Blockierungswahrscheinlichkeiten ergeben sich für das System. (Heffes, 1973; Giambene, 2014)

Holtzman und Jagerman (1979) differenzieren in Auswirkungen von peakedness und Instationarität und beschreiben, dass Instationarität zu fehlerhafter Bestimmung der peakedness führen kann und ihre Berücksichtigung bei der Analyse von Ankunftsprozessen demnach von Relevanz ist.

### 3.1.3 Relevanz von Instationarität

Instationarität ist in ihrer Auswirkung auf Wartesysteme also von wesentlicher Bedeutung. Sie kann als Verletzung der Rahmenbedingung stationären Zuflusses dazu führen, dass Modelle nicht anwendbar sind oder keine zuverlässigen Ergebnisse liefern, und lässt sich nicht auf einfache oder direkte Art in ein Verfahren integrieren.

Wie schon im Zusammenhang mit der allgemeinen Berechnung von Wartezeiten an Knotenpunkten beschrieben, wird in der Warteschlangentheorie ein unendlich langer Zeithorizont angenommen, der für die Berechnung von Grenzwerten und als Voraussetzung für Gleichgewichtszustände notwendig ist. Dazu steht der für die verkehrstechnische Untersuchung relevante Analysezeitraum von maximal einigen Stunden in starkem Gegensatz. Palm (1943) behandelt bei der Analyse von Anrufintensitätsschwankungen dieses Problem durch einen Vergleich mit physikalischen Einschwingungsvorgängen. Eine Veränderung der Anrufintensität ziehe ebenfalls eine Art Einschwingungsvorgang nach sich, der theoretisch betrachtet erst nach unendlich langer Zeit ende. Physikalische Einschwingungsvorgänge ließen sich jedoch angenähert als in vergleichsweise kurzer Zeit abgeschlossen einschätzen. Er führt hierzu zwar keinen theoretischen Beweis, jedoch kann er diese Annahmen durch seine Messungen stützen.

Der von Bäuerle und Rolski (1998) geführte Beweis, dass häufigere Wechsel der Höhe der Ankunftsrate zu geringerer Wartezeit führen als seltenere Änderungen, geht konform mit der Auffassung, dass bei der Verwendung stark aggregierter Daten für die Wartezeitberechnung mögliche Effekte innerhalb dieser aggregierten Intervalle verloren gehen könnten. Laut Kimber et al. (1977) wirken sich bereits kurzfristige Schwankungen von nur wenigen Minuten Länge steigend auf

die mittlere Wartezeit aus. Auf die Frage nach der möglichst optimalen Länge der einzelnen Intervalle wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch eingegangen.

Die Berücksichtigung von Instationarität und ihrer Auswirkungen ist sehr stark vom jeweiligen Zusammenhang beeinflusst. Wenngleich die zugrundeliegenden Konzepte vom ‚Typ Wartesystem‘ sind, so unterscheiden sie sich dennoch teilweise stark in ihren Eigenschaften. Wird, wie im theoretischen Kontext, von unendlichem Zeithorizont ausgegangen oder wird ein 15-Minuten-Intervall einer Spitzenstunde im verkehrstechnischen Bereich betrachtet? Wird eine Lichtsignalanlage mit einer Bedienstelle modelliert oder ein Telekommunikationsnetzwerk mit einer großen Anzahl an Bedienern untersucht? Diese Unterschiede sind sicherlich ein möglicher Grund dafür, dass keine allgemeingültige Lösung für die Quantifizierung und Integration der Effekte von Instationarität in Modellen oder Verfahren existiert. Die Berücksichtigung von Instationarität ist dabei allerdings fachübergreifend von Bedeutung.

## **3.2 Instationarität im Verkehr – Definition und Nachweis**

Eine Aussage zu Schwankungen im Verkehrsfluss macht bereits Adams (1936). In seiner Studie zur Ankunftsverteilung von Fahrzeugen beschreibt er Einflüsse, die zu Störungen der Verkehrsverteilung führen. Plötzliche Zu- oder Abnahme der Verkehrsmenge, Regelung durch Polizisten oder Lichtsignalanlagen, Schwierigkeiten bei Fahrzeugbegegnungen aus verschiedenen Richtungen durch schmale Straßen, Straßenbahnen oder scharfe Kurven und auch die Sättigung, wenngleich als seltene Bedingung eingeschätzt, nennt er als mögliche Einflussfaktoren. Die Effekte seien ähnlich und führten zu abwechselnden Zeiträumen mit stärkerem und schwächerem Verkehrsfluss.

Stationarität im Verkehrskontext im Zusammenhang mit dem Verkehrsfluss wird von Wu (1990) so beschrieben, dass die Verkehrsstärke nicht von der Zeit abhängt und zusätzlich der Auslastungsgrad kleiner als eins bleibt. Entsprechend liegt Instationarität vor, wenn sich die Verkehrsstärke im Verlauf der Zeit ändert

und somit auch der Auslastungsgrad im zeitlichen Verlauf nicht konstant ist. Zusätzlich könne im Falle von Instationarität dieser sowohl unter- als auch oberhalb von eins liegen.

Ein Nachweisverfahren, das Instationarität feststellt ist, ist kaum auffindbar. Es wird entweder mit Tests gezeigt oder versucht zu zeigen, dass Stationarität vorliegt, um bestimmte Verfahren oder Modelle anwenden zu können, oder es wird, gerade im Verkehrskontext, zwar explizit auf die Behandlung der Instationarität eingegangen, sie aber als gegebene Rahmenbedingung oder auch Problem dargestellt.

So entwickelt beispielsweise Jacobs (1979) einen Stationaritätstest für Zeitlückenfolgen, um konventionelle statistische Methoden auf Zeitlückenfolgen anwenden zu können. Ein solcher Test wäre im hier untersuchten Zusammenhang kaum durchführbar, weil dazu die Verfügbarkeit von Einzelfahrzeugdaten unumgänglich ist. Vom Vorhandensein solch detaillierter Daten kann jedoch bei der Anwendung der Verfahren nach HBS (2015) nicht ausgegangen werden.

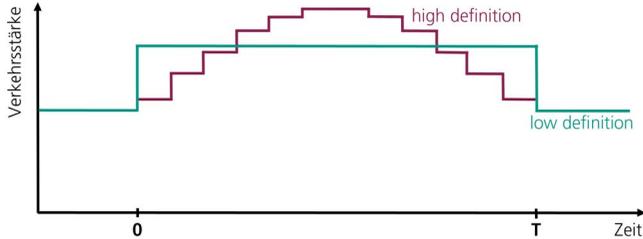
Ein Verfahren, das Daten zum Verkehrsaufkommen explizit auf Instationarität untersucht, wird von Vlahogianni et al. (2006) vorgestellt. Dieses basiert jedoch allein auf dem visuellen Auffinden von Änderungen im statistischen Verhalten der Daten und benötigt dafür weiterhin recht lange Zeitintervalle. Insofern ist auch dieser Ansatz für die Feststellung oder gar Quantifizierung von Instationaritäten im Zufluss an Knotenpunkten ungeeignet.

## **3.3 Instationarität im Verkehrsfluss und ihr Einfluss auf die Wartezeitberechnung**

### **3.3.1 Auswirkungen von Instationarität und deren Beachtung bei der Berechnung von Wartezeiten**

Um Instationarität bei der Wartezeitberechnung zu berücksichtigen, existieren zwei grundlegende Ansätze: sogenannte ‚high definition‘ und ‚low definition‘ Formeln. Dabei wird bei der Verwendung von high definition die Ganglinie der

Verkehrsstärke möglichst genau nachgebildet, um keine bis nur wenig Information zu verlieren, low definition hingegen vereinfacht diese so weit wie möglich. Eine anschauliche Darstellung dieser beiden Ansätze liefert Abbildung 3-1.



**Abbildung 3-1 Modellierung von Verkehrsstärke-Ganglinien nach dem High-Definition- und Low-Definition-Ansatz (nach Kimber und Hollis, 1979)**

Nach Wu beinhalten beispielsweise die Formeln von Kimber und Hollis (1978) sowie von Catling (1977) einen high-definition-Ansatz. Deren Autoren sind sich einig, dass gerade während der Spitzenstunden die Schwankungen der Verkehrsnachfrage, inklusive Zu- und Abnahmen, möglichst realistisch berücksichtigt werden müssen, um die Wartezeiten im vollen Ausmaß berechnen zu können. Einen low-definition-Ansatz verwendet Akçelik (1980), den Wu dahingehend kritisiert, dass die damit berechneten Wartezeiten deutlich zu niedrig ausfielen. Er begründet dies damit, dass eine realistische Ganglinie mit einer Nachfragespitze sich auf den Aufbau eines Rückstaus wesentlich anders auswirke als eine abgeflachte low-definition-Ganglinie. Weiterhin bemerkt Wu, dass sich der Rückstau und damit auch die Wartezeiten umso mehr verlängerten, je stärker die Instationarität ansteige.

Catling sagt aus, dass die Form eines Nachfrageprofils berücksichtigt werden müsse. Die von ihm entwickelten Formeln dazu sind allerdings komplex. Auch Kimber et al. (1977) beschreiben drei verschiedene Nachfragemuster, die zu betrachten sind, nämlich eine hohe Belastung nahe oder an der Kapazität über

einen längeren Zeitraum (z.B. eine Stunde); kurze, starke Spitzen von etwa 15 Minuten Dauer sowie kurzfristige Schwankungen von nur wenigen Minuten.

Die von Wu entwickelte „theoretisch-empirische Wartezeit-Formel für den instationären Verkehr“ zur Berechnung der mittleren Rückstaulänge nimmt auf die Form der Nachfrage-Ganglinie über mehrere verschiedene Parameter Bezug:

$$N_o = \begin{cases} \frac{Q \cdot T_o'}{4} \cdot \left[ \bar{x}' - 1 + \sqrt{(1 - \bar{x}')^2 + \frac{12(\bar{x}' - x_o)}{Q \cdot T_o'}} \right] & \begin{matrix} \bar{x}' > x_o \\ \bar{x} < x_2^* \end{matrix} \\ \frac{Q \cdot T_o}{4} \cdot \left[ \bar{x} - 1 + \sqrt{(1 - \bar{x})^2 + \frac{12[(1 - x_o) \cdot x_1^* - (1 - \bar{x})]}{Q \cdot T_o}} \right] & \begin{matrix} \bar{x} > x_o \cdot x_1^* \\ \bar{x} > x_2^* \end{matrix} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad 3-1$$

mit:

$N_o$  mittlere Rückstaulänge [Kfz]

$Q$  maximale Abfluss-Stärke der Zufahrt [Kfz/s]

$\bar{x}$  mittlerer Auslastungsgrad gemittelt über das Zeitintervall  $T_o$  [-]

$T_o$  Länge des betrachteten Zeitintervalls [s]

$T_o'$  =  $T_o \cdot k_T$  [-]

$\bar{x}'$  =  $\bar{x} \cdot k_x$  [-]

$x_o$  =  $0,67 + s \cdot G / 600$  [-]

mit  $s$ : Sättigungsverkehrsstärke [Kfz/s] und  $G$ : Grünzeit [s]

sowie  $k_T$  und  $k_x$ : Charakterisierungsfaktoren der Ganglinie

Die möglichen Ganglinientypen, die seiner Aussage nach am meisten verwendet werden und die bei der Berechnung berücksichtigt werden können, sind die Parabel, die Cosinus-Funktion und eine Geradenkombination in Form eines gleichschenkligen Dreiecks. Die spezifischen Parameter dieser Formen für die obige Gleichung sind in Tabellenform gegeben (vgl. Wu (1990), S. 121).

Es ist zu erkennen, dass Wu die Charakteristik der Ganglinien möglichst genau in seiner Näherungsformel abzubilden versucht. Allerdings ist anzumerken, dass hierbei eine Symmetrie der Ganglinie unterstellt wird. Der Autor berücksichtigt zwar in seiner numerisch exakten Wartezeit-Berechnung auch asymmetrische

Verläufe, in der Näherungsformel jedoch nicht mehr in dieser expliziten Form. Einzig bei Nichtvorhandensein einer Ganglinie und alleiniger Verfügbarkeit von viertelstündlichen Auslastungsgraden wird wieder auf einen möglichen asymmetrischen Verlauf eingegangen.

Wu bemerkt weiterhin, dass in der Praxis eine genaue Auflösung der Daten als Ganglinie oder in 1-Minuten-Intervallen nicht üblich sei und die genauesten verfügbaren Daten in 15-Minuten-Intervallen vorlägen.

Aus diesem Grund entwickelt Wu den im HBS (2015) so genannten Instationaritätsfaktor, der im Folgenden näher erläutert wird. Dabei ist zu beachten, dass für die Bemessungsstunde genau das 60 Minuten lange Intervall mit der höchsten Belastung, unabhängig von der genauen Uhrzeit, gewählt wird.

### **3.3.2 Berücksichtigung von Instationarität bei der Wartezeitberechnung an Knotenpunkten mit LSA nach HBS**

Das Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität im HBS (2015) beinhaltet in der Formel zur Berechnung der mittleren Rückstaulänge (Gleichung 2-10) den Instationaritätsfaktor  $f_{in,j}$  und einen zugehörigen Koeffizienten mit dem Wert 0,58.

Diese Faktoren dienen der Einbeziehung von Instationarität im Fahrzeugzufluss während der Bemessungsstunde, sobald sich eine Warteschlange bildet, die bis zum Ende der jeweiligen Freigabezeit nicht abfließen kann. Dabei erfolgt gewissermaßen eine Korrektur der Länge des betrachteten Zeitraums sowie des mittleren Auslastungsgrades.

Die Herkunft des Faktors 0,58 ist im HBS (2015) selbst nicht dokumentiert. In Wu (1990) sind jedoch für die in seinen Näherungsformeln zu verwendenden Faktoren für die drei unterschiedlichen Ganglinienformen exakte Werte tabelliert. Dabei entspricht der Faktor  $k$  zur Korrektur des betrachteten Zeitintervalls mit einem Wert von 0,582 einer parabelförmigen Ganglinie (vgl. Wu (1990), S. 121).

Abbildung 3-2 stellt diesen Zusammenhang anschaulich dar. Der Faktor  $k$  verringert also die in die Berechnung eingehende Dauer des betrachteten Zeitintervalls  $T_0$ , das im Allgemeinen eine Stunde beträgt, auf effektiv etwa 35 Minuten. Gleichzeitig hebt der Instationaritätsfaktor  $f_{in}$  (siehe Gleichung 3-2), der stets

einen Wert von mindestens 1,0 aufweist, den für die Berechnung zu verwenden- den mittleren Auslastungsgrad  $\bar{x}$  an.

$$f_{in,j} = 1 + \frac{\left(\frac{q_{15,j}}{q_j} - 1\right)}{1,5} \quad 3-2$$

mit:

$f_{in,j}$  Instationaritätsfaktor für den FS j [-]

$q_{15,j}$  Verkehrsstärke im höchstbelasteten 15-min-Intervall der betrachteten Stunde auf dem FS j [Kfz/h]

$q_j$  Verkehrsstärke der betrachteten Stunde auf dem FS j [Kfz/h]

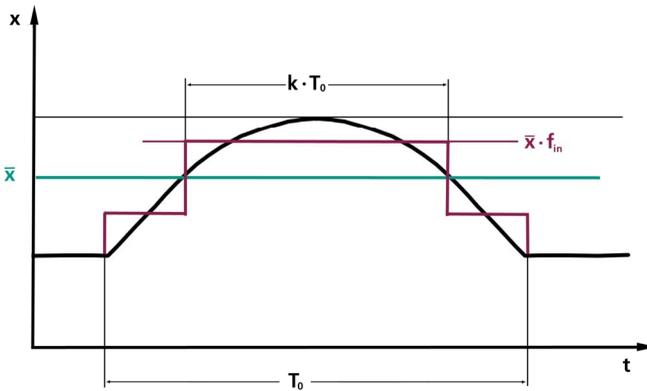


Abbildung 3-2 Anschauliche Erklärung des Instationaritätsfaktors anhand einer Ganglinie in Parabelform (verändert nach Wu, 1990)

Bildlich lässt sich der Einfluss dieser Faktoren auch als eine Stauchung des Bemessungszeitraums darstellen, in der Art, dass der Anteil der stündlichen Belastung, der einen Rückstau nach Freigabezeitende verursacht, in diesem verkürzten Intervall zusammengefasst wird und in diesem eine quasi-dauerhafte Überlastung in Höhe des Produkts aus Instationaritätsfaktor und mittlerer stündlicher Ver-

kehrsstärke herrscht. Die Auswirkung dieser künstlich in der Mitte aggregierten Überlastung als Länge des mittleren Rückstaus berechnet sich dann über die Formel von Akçelik (Gleichung 2-11)

Im Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage des HBS (2015) erfolgt keine explizite Berücksichtigung von Instationarität in den Fahrzeugzuflüssen.

### 3.3.3 Behandlung von Instationarität im HCM

Um Schwankungen im Verkehrsfluss innerhalb der Spitzenstunde bzw. des Untersuchungszeitraums zu beachten, verwendet das HCM (2010) im Allgemeinen das höchstbelastete 15-Minuten-Intervall des entsprechenden Zeitraums. Dessen Verkehrsbelastung bildet die Spitzenverkehrsstärke, die die wichtigste Eingangsgröße bei der Berechnung der Warteschlangenlänge und der Wartezeiten darstellt, um den level of service (Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs) eines Knotenpunkts zu bestimmen.

Falls die verfügbaren Daten nicht ausreichend genau zur Verfügung stehen, dient der peak hourly factor (PHF) dazu, die Verkehrsstärke der Bemessungsstunde auf das Spitzen-15-Minuten-Intervall hochzurechnen:

$$\text{PHF} = \frac{n_{60}}{4 \cdot n_{15}} \quad 3-3$$

mit:

PHF peak hour factor [-]

$n_{60}$  Fahrzeuganzahl während des betrachteten 1-h-Intervalls [Fz]

$n_{15}$  Fahrzeuganzahl während des darin höchstbelasteten 15-min-Intervalls [Fz]

Der PHF wird dabei auf die Zuflüsse des kompletten Knotenpunktes angewendet und die sich daraus ergebenden Bemessungsverkehrsstärken für alle weiteren Verfahren und Untersuchungen genutzt. Laut HCM (2010) wird der PHF vom Bearbeiter oder der zuständigen Behörde zur Verfügung gestellt.

Bei der Fragestellung der idealen zeitlichen Auflösung der Einzelintervalle zur Berücksichtigung von Instationarität gehen die Meinungen verschiedener Autoren allerdings auseinander. Yi et al. (2009) untersuchen, ob es eine Intervalldauer gibt, die bessere Ergebnisse liefert als der Bezug auf 15 Minuten, kommen aber zu dem Schluss, dass die bisher im HCM geforderten 15 Minuten als Bezugsintervall gute und stabile Ergebnisse für Knotenpunkte liefern. Als gleichwertige Alternative sehen sie eine Intervalldauer von 10 Minuten an, in kürzeren Intervallen sehen sie keinen Vorteil.

Dem widersprechen Catling (1977) sowie Tracz und Chodur (2011), die gerade in Spitzenstunden Intervalle mit einer Länge von 5 Minuten für angebracht halten. Tracz und Chodur stellen fest, dass bei Verwendung von 15-Minuten-Intervallen zu wenige Schwankungen in der Verkehrsnachfrage berücksichtigt und damit Wartezeiten so weit unterschätzt werden, dass sowohl die zugehörigen Levels of Service nach dem HCM als auch die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs nach dem HBS zu gut ausfielen.

# 4 INSTATIONARITÄT IN DER REALITÄT UND IHRE MODELLIERUNG

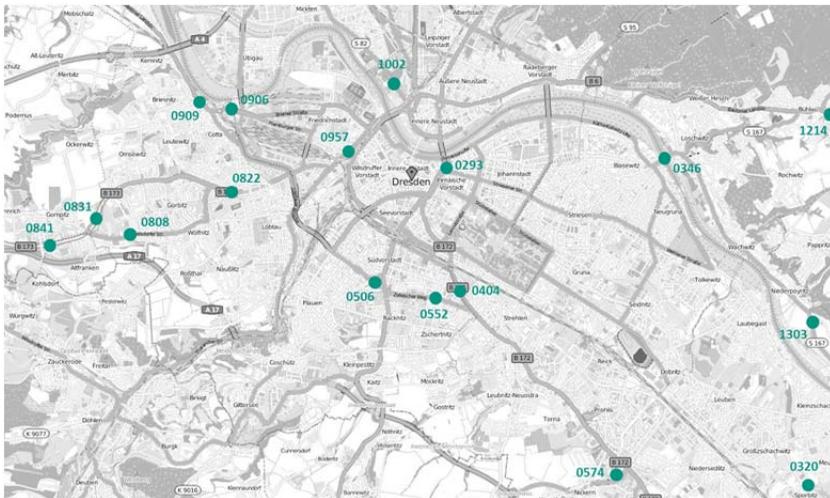
Auf der Grundlage empirischer Daten von Dauerzählstellen in Dresden erfolgt die Ableitung von Zuflussprofiltypen zur Modellierung verschiedener Formen von Instationarität. Diese bilden die Grundlage für die Verkehrsstärkeverläufe innerhalb der Simulationsmodelle für die Untersuchung der Auswirkung von Instationarität auf die Wartezeit an Knotenpunkten (siehe Kapitel 5 und 6). Weitere Verkehrsdaten von Dauerzählstellen in Berlin zeigen die Häufigkeit instationärer Zuflussprofile in der Realität.

## 4.1 Entwicklung von Zuflussprofiltypen auf der Basis von Realdaten

Bei der Berücksichtigung von Instationarität werden bestimmte Ganglinientypen mathematisch angenähert oder, bei nicht ausreichender Datenlage, unterstellt. Die häufigsten Formen hierbei sind eine Parabel oder ein Dreieck. Es ist davon auszugehen, dass diese idealisierten Arten von Ganglinien in der Realität jedoch nur selten vorkommen. Für die systematische Untersuchung der Auswirkungen von Instationarität wurden Profiltypen für die Simulationsstudien auf Basis von Verkehrsdaten aus Dresden entworfen. Die Lage der 18 vollautomatischen Pegelzählstellen (PZS) ist in Abbildung 4-1 dargestellt, die spezifischen Eigenschaften hierzu finden sich in Tabelle 4-1. Die zur Verfügung gestellten Daten der Pegelzählstellen wurden am 05. September 2012 zwischen 05:00 und 20:00 Uhr aufgenommen. Die Erfassung erfolgte fahstreifenbezogen ohne zeitliche Aggregation.

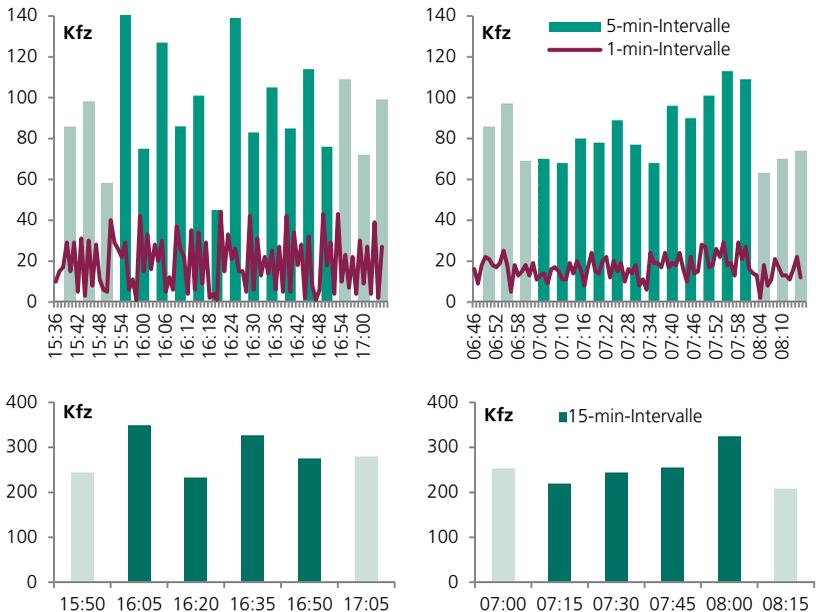
**Tabelle 4-1 Lage und Straßentyp der Pegelzählstellendaten Dresden**

Nr.	PZS	Lage (Straße)	Straßentyp
1	PZS 0293	Carolabrücke – Rathenauplatz	Bundesstraße
2	PZS 0320	Pirnaer Landstraße – Altsporbitz	Hauptverkehrsstraße
3	PZS 0346	Loschwitzer Brücke – Schillerplatz	Hauptverkehrsstraße
4	PZS 0404	Teplitzer Straße – Reichenbachstraße	Bundesstraße
5	PZS 0506	Nürnberger Straße – Fritz-Förster-Platz	Staatsstraße
6	PZS 0552	Zellescher Weg – Ackermannstraße	Staatsstraße
7	PZS 0574	Tschirnhausstraße – Michaelistraße	Staatsstraße
8	PZS 0808	Kesselsdorfer Str. – Baumarkt	Hauptverkehrsstraße
9	PZS 0822	Coventrystraße – Braunsdorfer Str.	Bundesstraße
10	PZS 0831	Coventrystraße – Kesselsdorfer Str.	Bundesstraße
11	PZS 0841	Coventrystraße – Gompitzer Höhe	Bundesstraße
12	PZS 0906	Hamburger Straße – Flügelweg	Bundesstraße
13	PZS 0909	Meißner Landstraße – Schunckstraße	Bundesstraße
14	PZS 0957	Löbtauer Straße – Berliner Straße	Hauptverkehrsstraße
15	PZS 1002	Leipziger Straße – Alter Schlachthof	Staatsstraße
16	PZS 1045	Washingtonstraße – Lommatzcher Str.	Staatsstraße
17	PZS 1214	Bautzner Landstraße – Rossendorfer Str.	Bundesstraße
18	PZS 1303	Pillnitzer Landstraße – Wasserwerkstraße	Staatsstraße



**Abbildung 4-1 Lage der Pegelzählstellen im Stadtgebiet Dresden (Karte: Open Street Map)**

Die Diagramme in Abbildung 4-2 zeigen beispielhaft für zwei der Pegelzählstellen den Verlauf der Verkehrsstärke innerhalb der Spitzenstunde sowie der beiden Viertelstunden davor und danach in Aggregationsstufen von einer Minute, 5 Minuten und 15 Minuten. Es ist eindeutig ersichtlich, dass diese Zuflussprofile weder einer Parabel noch einem Dreieck noch überhaupt einer symmetrischen Form folgen. Zur Verdeutlichung, dass es sich hierbei nicht um Einzelfälle handelt, ist in Abbildung 4-3 eine größere Auswahl an Spitzenstundenprofilen der Pegelzählstellen zusammenfassend dargestellt. Die Rohdaten sind dabei zu 15-Minuten-Intervallen aggregiert. Abweichend vom HBS (2015), das die Spitzenstunde auf Basis von 15-Minuten-Intervallen identifiziert, aber übereinstimmend mit Wu (1990), erfolgt hier eine Bestimmung der relevanten Spitzenstunde anhand von 5-Minuten-Intervallen.



**Abbildung 4-2** Spitzenstundenprofile der PZS 0506N (links) und 0522N (rechts) in verschiedenen Aggregationsstufen (farblich heller dargestellt) zusätzlich je 15 Minuten vor und nach der Spitzenstunde)

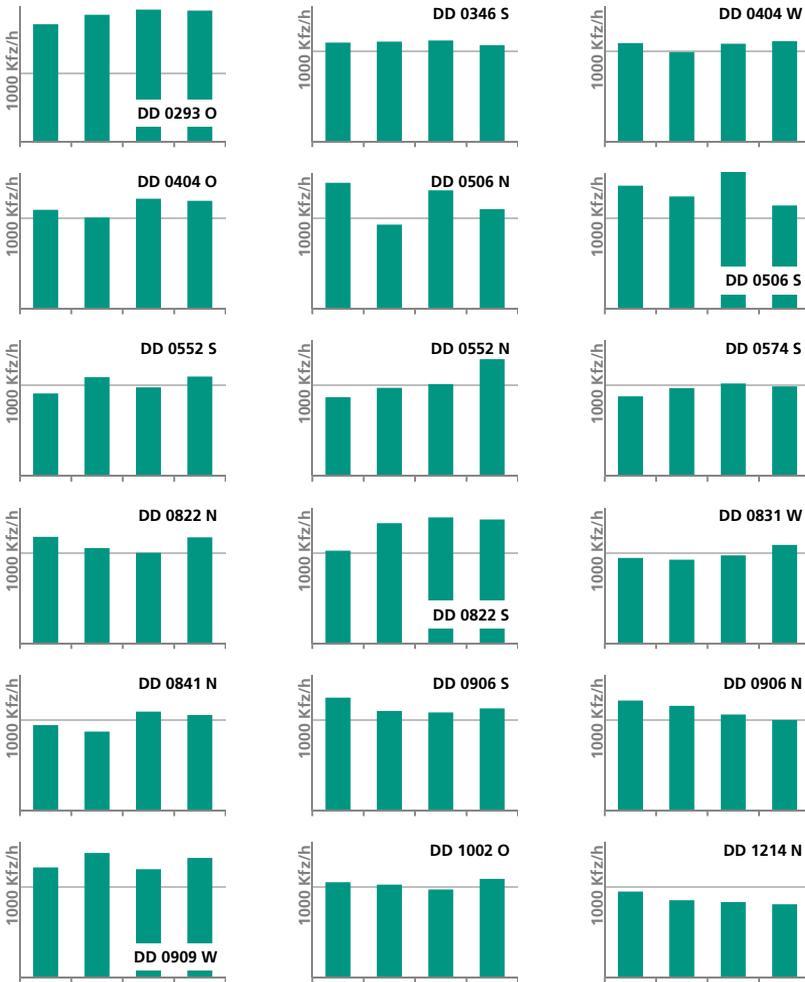


Abbildung 4-3 Kompaktdarstellung des Spitzenstundenverlaufs einiger PZS in 15-Minuten-Intervallen

Detaillierte Diagramme für die Verkehrsstärkeverläufe der Pegelzählstellen sind im Anhang ab S. 135 zu finden.

## 4.2 Die Zuflussprofiltypen

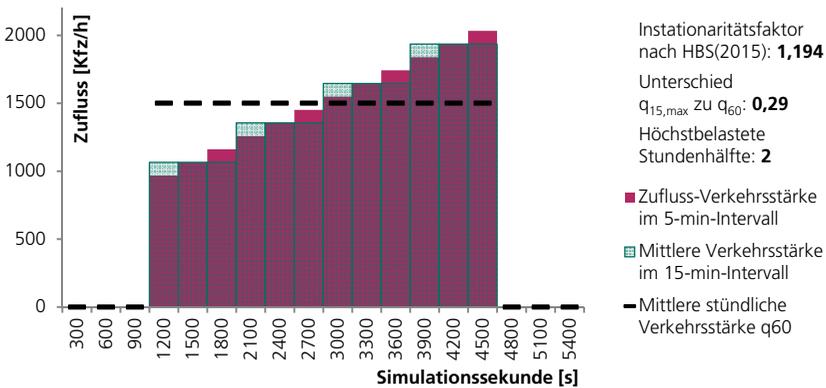
Die Profiltypen für die Simulationsuntersuchungen wurden, ausgehend von den Zuflussprofilen der Pegelzählstellen in Dresden, so gewählt, dass alle als sinnvoll erachteten Kombinationen und Variationen von Verläufen der Verkehrsstärke innerhalb einer Stunde abgedeckt werden. Dies bezieht sich sowohl auf die Fälle mit symmetrischen gegenüber asymmetrischen Verläufen mit ansteigenden oder abfallenden Varianten als auch auf die Relationen der Belastungen in den vier 15-Minuten-Intervallen einer Stunde zueinander. 15-Minuten-Intervalle sind zwar, im Vergleich zu 1-Minuten- oder 5-Minuten-Intervallen, einerseits stärker aggregiert und nicht in der Lage, die feineren Nachfrageschwankungen abzubilden, andererseits kann aber nicht grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass bei der Untersuchung zur Bewertung der Verkehrsqualität eines Knotenpunkts die Daten zur Verkehrsstärke in dieser feinen Auflösung vorliegen. Eine Intervalllänge von 15 Minuten entspricht dem geforderten Mindestdetaillierungsgrad bei der Ermittlung der Bemessungsverkehrsstärke nach dem HBS (2015).

Die Profiltypen zeichnen sich durch gute Handhabbarkeit aus und ermöglichen eine systematische Analyse und Sichtbarmachung verschiedener Effekte bei vertretbarem Aufwand. Tabelle 4-2 fasst die Zuflussprofiltypen mit ihren wichtigsten Eigenschaften zusammen. Abbildung 4-5 beinhaltet einen schematischen Überblick über die Verkehrsstärke in 15-Minuten-Intervallen, zur Vergleichbarkeit in derselben Form wie die Auswahl der Spitzenstundenprofile der Pegelzählstellen (vgl. Abbildung 4-3).

Eine detaillierte Darstellung des Profiltyps 1a (starker Anstieg) befindet sich in Abbildung 4-4. Verschiedene Farben zeigen die mittleren Verkehrsstärken je Intervall für verschiedene Intervall-Längen. Zusätzlich angegeben sind der Instationaritätsfaktor nach HBS (2015) und die maximale Amplitude ‚nach oben‘, also um wieviel höher die Verkehrsstärke des höchstbelasteten 15-Minuten-Intervalls in Bezug zur mittleren stündlichen Verkehrsstärke liegt. Diagramme dieser Art sind für jeden Profiltyp auf der jeweiligen Seite im Anhang ab S. 116 zu finden.

**Tabelle 4-2 Zuflussprofiltypen**

Zuflussprofiltyp	Verkehrsstärke der 15-min-Intervalle im Verhältnis zur Stunde (100%)				maximale Amplitude	$f_{in}$ nach HBS(2015)
1a - starker Anstieg	71%	90%	110%	129%	0,29	1,194
1b - mittlerer Anstieg	76%	92%	108%	124%	0,24	1,159
1c - leichter Anstieg	82%	94%	106%	118%	0,18	1,118
2a - starker Abfall	129%	110%	90%	71%	0,29	1,194
2b - mittlerer Abfall	124%	108%	92%	76%	0,24	1,159
2c - leichter Abfall	118%	106%	94%	82%	0,18	1,118
3a - starke Wellenform 'rechts'	104%	85%	100%	111%	0,11	1,074
3b - mittl. Wellenform 'rechts'	97%	90%	110%	103%	0,10	1,067
3c - leichte Wellenform 'rechts'	98%	95%	105%	102%	0,05	1,033
4a - starke Wellenform 'links'	111%	100%	85%	104%	0,11	1,074
4b - mittlere Wellenform 'links'	103%	109%	91%	97%	0,09	1,063
4c - leichte Wellenform 'links'	103%	106%	97%	94%	0,06	1,043
5a - starke Spitze	89%	111%	111%	89%	0,11	1,071
5b - mittlere Spitze	92%	108%	108%	92%	0,08	1,054
5c - leichte Spitze	94%	106%	106%	94%	0,06	1,038
6a - starke Wannenförmigkeit	113%	87%	87%	113%	0,13	1,086
6b - mittlere Wannenförmigkeit	111%	89%	89%	111%	0,11	1,071
6c - leichte Wannenförmigkeit	108%	92%	92%	108%	0,08	1,055



**Abbildung 4-4 Zuflussprofiltyp 1a - ‚starker Anstieg‘ im Detail**



**Abbildung 4-5** Kompaktdarstellung des Verkehrsstärkeverlaufs der Zuflussprofiltypen in 15-Minuten-Intervallen

Anhand der schematischen Darstellung der verschiedenen Profiltypen ist der zeitliche Aufbau der Simulationsexperimente ersichtlich. Zwar sind die Profiltypen anhand ihrer 15-Minuten-Intervalle charakterisiert, jedoch werden für die

Simulationsexperimente die Zuflüsse in 5-Minuten-Intervallen modelliert. Damit kommt es nicht zu quasistationären Zuständen innerhalb eines 15-Minuten-Intervalls und ein höherer Detaillierungsgrad ist möglich. Im Gegensatz zu einer noch feineren Aufschlüsselung, in beispielsweise 1-Minuten-Intervalle, hat die Modellierung der Fahrzeugzuflüsse und ebenso der Auswerteroutinen auf Basis von 5-Minuten-Intervallen den Vorteil, möglichst detaillierte Ergebnisse zu ergeben, ohne mögliche Unschärfen durch den langen Streckenvorlauf zum Knotenpunkt miteinbeziehen zu müssen. Ein langer Vorlauf ist hier besonders von Bedeutung, nicht allein, um sicherzustellen, dass die Fahrzeuge mit dem gewünschten Fahrverhalten am Knotenpunkt eintreffen, sondern auch, um ausreichend Aufstellfläche für die entstehende Warteschlange zu gewährleisten.

Nach Brilon (1995) ist eine Rahmenbedingung der Formel zur Wartezeitberechnung von Akçelik, dass die Verkehrsbelastung vor und nach dem Betrachtungszeitraum null betragen muss. Besonders im zeitlichen Nachlauf ist dies von Bedeutung, um wirklich alle Verlust- bzw. Wartezeiten aller Fahrzeuge zu erfassen, die während der Analyseperiode am Knotenpunkt ankommen, auch wenn sie diesen erst kurz nach dem Ende der Zeitraums verlassen können. Im Verlauf der Entwicklung der Laborbeispiele wurden auch Varianten mit verschiedenen hohen Verkehrsstärken im Vorlauf der eigentlichen Spitzenstunde getestet. Diese wurden zwar aufgrund der genannten Rahmenbedingungen für die Wartezeitberechnung wieder verworfen, der entsprechende zeitliche Vorlauf bleibt aber im Simulations-setup erhalten.

## **4.3 Vorkommen instationärer Zuflussprofile in der Realität**

### **4.3.1 Methodik zur Erkennung der Zuflussprofiltypen**

Um der Frage nachzugehen, wie oft die für die Laborbeispiele entworfenen Zuflussprofiltypen im realen Kontext tatsächlich vorkommen, wurden zusätzliche Daten von Dauerzählstellen in Berlin ausgewertet. Für den 17.09.2015 waren

Daten über den gesamten Tag von einer großen Anzahl an Zählstellen verfügbar, außerdem für den Zeitraum vom 01.09. bis 30.11.2015 von 5 Zählstellen.

Diese lagen als unbereinigte Listen im csv-Format vor und wurden zunächst automatisiert über Skripte in Python und manuell untersucht, um fehlende oder falsche Werte sowie fehlende bzw. anders fehlerbehaftete Intervalle zu identifizieren und die zugehörigen Messquerschnitte von der Analyse auszuschließen. Damit standen schließlich rund 1200 Datensätze mit Verkehrsstärken in Intervallen von einer oder fünf Minuten über jeweils einen ganzen Tag zur Verfügung.

Die Identifikation der jeweiligen Spitzenstunde erfolgte 5-Minuten-fein, bevor die Verkehrsstärken zu 15-Minuten-Intervallen zusammengefasst wurden. Die Zuordnung der Zuflussprofile der Spitzenstunden zu den Profiltypen basiert auf den Verhältnissen der 15-Minuten-Intervalle sowohl zueinander als auch zur mittleren Verkehrsstärke der gesamten Stunde. Hierbei wird zuerst unterschieden, welche Hälfte der Spitzenstunde die stärkere Belastung aufweist. Die Relationen des ersten zum zweiten sowie des dritten zum vierten 15-Minuten-Intervall ergeben verschiedene Kombinationen, aus denen sich die Zuordnung der Zuflussprofile ergibt. So führt beispielsweise eine höhere Belastung der zweiten Stundenhälfte mit einem vierten 15-Minuten-Intervall größer dem dritten und dem zweiten größer dem ersten in logischer Folge zum Profil ‚Anstieg‘.

Aus Gründen der Vereinfachung wird hierbei die Amplitude, also die Differenzierung in starke, mittlere und schwache Ausprägung eines Profiltyps, nicht berücksichtigt. Da der minimale Abstand des höchstbelasteten 15-Minuten-Intervalls zur mittleren Spitzenstundenverkehrsstärke innerhalb der Zuflussprofiltypen bei 5% liegt, ist die Grenze für die Identifikation des Profils ‚konstant‘ mit 4% definiert.

Der mittlere Abstand des höchstbelasteten 15-Minuten-Intervalls zur mittleren Spitzenstundenverkehrsstärke über alle Spitzenstunden der Messdaten beträgt 9% mit einer Standardabweichung von 13%. Werden allein Werte größer 5% betrachtet, liegt der Mittelwert bei 12%. Hinsichtlich der Frage, ob die erste oder die zweite Hälfte der Spitzenstunde die höhere Belastung aufweist, kommen für die ausgewerteten Daten beide Fälle mit jeweils etwa 50% Häufigkeit gleich oft vor.

Eine weitere mögliche Methode zur Erkennung des Profiltyps ist die Minimierung des Abstands zwischen den 15-Minuten-Intervallen (als Anteile an der Gesamtverkehrsstärke) und den für jeden Zuflussprofiltyp analog definierten Werten. Diese Variante zeigt jedoch nach visueller Kontrolle einer Stichprobe eine deutlich schlechtere Erkennungsrate und stellt daher keine belastbare Alternative dar.

Die Verteilung der Spitzenstunden über die Tageszeit entspricht der erwarteten Form einer hohen Anzahl in den Morgen- und in den Nachmittagsstunden mit einem Maximum in der Zeit zwischen 15:00 und 16:00 Uhr, innerhalb der etwa 27% der ermittelten Spitzenstunden beginnen (siehe Abbildung 4-6).

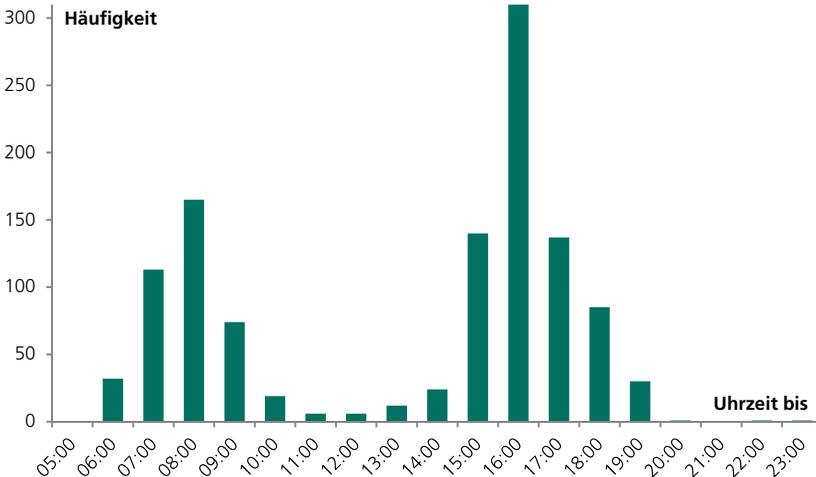


Abbildung 4-6 Startzeitpunkte der Spitzenstunden über den Tagesverlauf (Daten der Berliner Dauerzählstellen)

### 4.3.2 Häufigkeit der Zuflussprofiltypen in den Spitzenstunden

Die Unterteilung der Menge der Spitzenstunden nach den zugeordneten Zuflussprofiltypen, in erster Linie nach stationärem Zufluss (Profil ‚konstant‘) und instationärem Zufluss (alle anderen Profiltypen) in Abbildung 4-7 zeigt zuallererst

eine Dominanz der Instationarität. In allen betrachteten Zeitintervallen liegt der Anteil der Profiltypen, die instationären Zufluss repräsentieren, bei mindestens 50%, in den meisten Fällen aber noch deutlich darüber, dargestellt in Abbildung 4-8. Des Weiteren lässt sich eine gewisse Abhängigkeit von der Tageszeit vermuten. Zu den Zeiten, in denen die meisten Spitzenstunden beginnen, ist der Anteil instationärer Zuflüsse höher als in den restlichen Zeiten. Zusätzlich nimmt gegen Abend dieser Anteil nochmals zu.

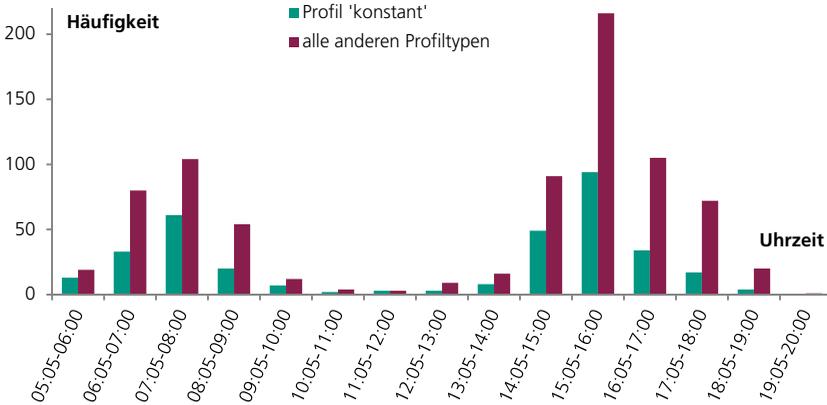
Eine genauere Aufschlüsselung der Häufigkeit der anderen Profiltypen liefert Tabelle 4-3. In Abbildung 4-9 ist die Aufteilung für die erste und zweite Tageshälfte angegeben. Die Zuflussprofile ‚Anstieg‘ und ‚Abfall‘ kommen weniger häufig vor als die restlichen Typen, die in etwa gleich oft zugeordnet werden können. Dabei ist insgesamt kein auffälliger Unterschied zwischen den Tageshälften erkennbar.

**Tabelle 4-3 Häufigkeit der Zuflussprofiltypen (Daten der Berliner Dauerzählstellen)**

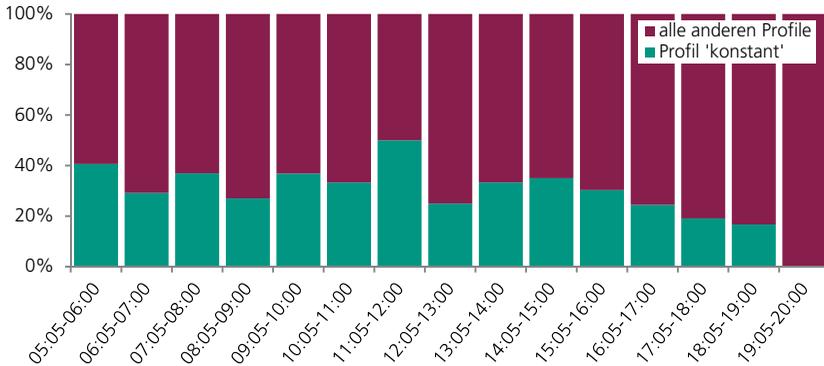
Profiltyp	konstant	Anstieg	Abfall	Welle R	Welle L	Spitze	Wanne
Häufigkeit	30%	8%	6%	14%	13%	14%	15%

Insgesamt ist also festzustellen, dass die ermittelten Spitzenstunden einer plausiblen Verteilung über den Tagesverlauf folgen, der Anteil instationärer Zuflüsse laut der verwendeten Zuordnung überwiegt und dass sich die instationären Zuflussprofile recht gleichmäßig auf die Menge der Profiltypen aufteilen. Fasste man allerdings die beiden Profiltypen ‚Welle R‘ und ‚Welle L‘ zu einem Typ zusammen, wäre dieser der mit Abstand am häufigsten vorkommende Profiltyp mit 27% Häufigkeit, sehr knapp nach ‚konstant‘ mit 30%.

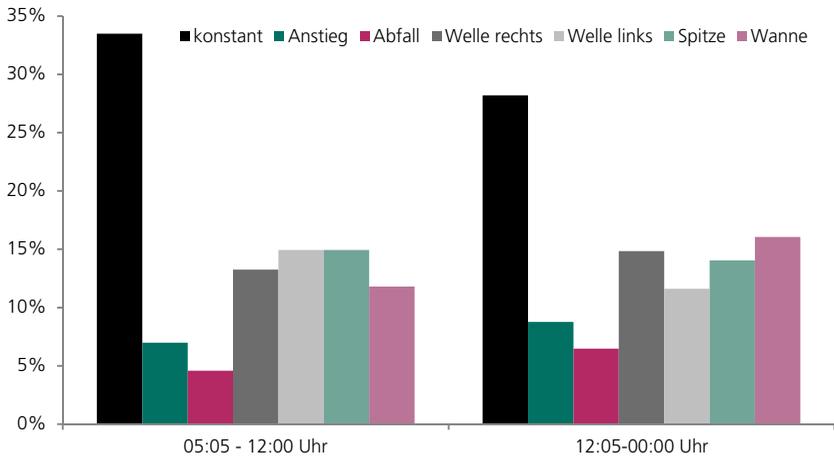
Somit wird nicht nur wiederholt die Relevanz der Beachtung von Instationarität im Allgemeinen unterstrichen, sondern auch die Auswahl und Definition der Zuflussprofiltypen als sinnvoll bestätigt.



**Abbildung 4-7 Häufigkeit der Spitzenstunden pro Stunde im Tagesverlauf, differenziert nach stationärem und instationärem Zufluss (Daten der Berliner Dauerzählstellen)**



**Abbildung 4-8 Prozentuale Aufteilung der Spitzenstunden pro Tagesstunde nach stationärem und instationärem Zufluss (Daten der Berliner Dauerzählstellen)**



**Abbildung 4-9** Prozentuale Aufteilung der Spitzenstunden nach Zuflussprofiltyp je Tageshälfte (Daten der Berliner Dauerzählstellen)



# 5 INSTATIONARITÄT AN KNOTENPUNKTEN MIT LICHTSIGNALANLAGE

## 5.1 Simulationsmodell und Kalibrierung

Für die mikroskopische Simulation wurde PTV VISSIM in der Version 7 verwendet. VISSIM ist eines der meistverwendeten Simulationswerkzeuge für die mikroskopische Verkehrsfluss-Simulation und beinhaltet für das Fahrverhalten das psycho-physische Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann. Eine Beschreibung der Bestandteile und Funktionsweise von VISSIM findet sich in der Veröffentlichung von Fellendorf und Vortisch (2010).

Im Rahmen der Untersuchung für diese Arbeit wurde VISSIM über die COM-Schnittstelle mit in Python programmiertem Scripting extern gesteuert. Ebenso erfolgte die Anpassung der verschiedenen Szenarien und die Auswertung von Zwischenergebnissen (teil-)automatisiert über entsprechendes Scripting.

### 5.1.1 Modellierung in VISSIM und Simulationsszenarios

Die mikroskopischen Simulationen zur Analyse des Einflusses instationärer Zuflüsse an einer Lichtsignalanlage wurden auf einem möglichst einfach gehaltenen Modell einer einstreifigen Strecke mit einer festzeitgesteuerten Lichtsignalanlage durchgeführt, das in Abbildung 5-1 dargestellt ist.

Ein ausreichend langer Vorlauf ist hierbei essentiell, damit ausreichend Aufstellfläche vor der Lichtsignalanlage vorhanden ist, besonders für sehr hohe Auslastungsgrade und dabei zu erwartende lange Warteschlangen. Außerdem benötigen die Fahrzeuge in VISSIM nach dem Einsetzen eine gewisse Zeit, bis das eingestellte Fahrverhalten zum Tragen kommt und sich die Wunschgeschwindigkeiten und bevorzugten Abstände der einzelnen Fahrzeuge einstellen. Die Fahr-

zeugzusammensetzung besteht aus 100% Pkw mit der für innerstädtischen Kontext voreingestellten Wunschgeschwindigkeitsverteilung für 50 km/h.



**Abbildung 5-1 Modellskizze der Laborauswertung von Knoten mit LSA**

Ein Simulationslauf dauert 5400 Sekunden, also 1,5 Stunden, durch jeweils 15 Minuten Vor- und Nachlauf. Der Nachlauf ist notwendig, um die Verlustzeiten aller Fahrzeuge, die im untersuchten Zeitraum am Knotenpunkt ankommen, zu erfassen, da bei Rückstau die letzten Fahrzeuge erst nach dem Ende der Stunde abfließen können. Zur Behandlung der zufälligen Streuungen werden stets zehn Simulationsläufe mit verschiedenen Startzufallszahlen durchgeführt und pro Ergebnisgröße der Mittelwert der Einzelergebnisse gebildet.

Für jedes Simulationsszenario wurde ein Festzeitsignalprogramm gewählt, dessen Freigabezeitanteil mindestens 50% beträgt. Der mittlere stündliche Zufluss wurde dabei ebenfalls variiert, so dass sich effektive Auslastungsgrade ergeben, die sowohl durch den Freigabezeitanteil als auch durch den eigentlichen Zufluss determiniert werden. In Tabelle 5-1 sind die Details zusammengefasst.

**Tabelle 5-1 Simulationsszenarios: Signalprogramm-Zufluss-Varianten**

Szenario	Umlaufzeit $t_u$ [s]	Freigabezeit $t_f$ [s]	Zuflussverkehrs- stärke $q_{60}$ [Kfz/h]	Auslastungs- grad $x$
I	30	20	1340	0,91
II	30	20	1400	0,95
III	60	30	1000	0,92
IV	60	30	1100	1,01
V	60	45	1500	0,93
VI	60	45	1600	0,99
VII	90	55	1250	0,96
VIII	90	55	1300	0,99
IX	120	75	1250	0,94
X	120	75	1300	0,98

Die Auswahl der verschiedenen effektiven Auslastungsgrade zeigt dabei einen Fokus auf den Bereich hoher und sehr hoher Auslastung bis hin zur Überlastung. Wie in Kapitel 2 angesprochen, wird gerade bei der Wartezeitberechnung für Spitzenzeiten von Auslastungsgraden knapp unterhalb bis etwas oberhalb von 1,0 ausgegangen. Betrachtet man in Abbildung 5-2 die Häufigkeit der gemessenen Verkehrsstärken der Berliner Dauerzählstellen pro Fahrstreifen, kommen durchaus sehr hohe Verkehrsstärken vor. Der Bereich ab etwa 1000 Kfz/h, also die Größenordnung der für die Laborbeispiele verwendeten Zufluss-Verkehrsstärken, macht dabei insgesamt 26% aus. Im Vergleich erscheint dieser Wert niedrig, jedoch befinden sich die Zählstellen über das gesamte Stadtgebiet verteilt und es ist daher davon auszugehen, dass die Messwerte zumeist durch Verkehrssteuerung, beispielsweise vorgelagerte Lichtsignalanlagen, beeinflusst sind. In solchen Fällen existieren häufig vergleichsweise lange Zeitlücken zwischen Fahrzeugpuls, die die maximal mögliche Verkehrsstärke nach oben beschränken.



**Abbildung 5-2** Häufigkeit der Verkehrsstärke pro Fahrstreifen innerhalb der Spitzenstunde (Daten der Berliner Dauerzählstellen)

### 5.1.2 Kalibrierung des VISSIM-Modells

Es wurde Wert darauf gelegt, möglichst wenige Anpassungen an den in VISSIM voreingestellten Parametern vorzunehmen, so dass lediglich die Einstellungen für das Verhalten an Lichtsignalanlagen verändert wurden. Diese bestehen aus der ‚Reaktion auf gelbes Signal‘, dem ‚Verhalten bei Rot-Gelb‘ und den Parametern zu ‚Reduzierter Sicherheitsabstand nahe einer Haltlinie‘. Die ersten beiden Bereiche blieben unverändert in den Standardeinstellungen, der reduzierte Sicherheitsabstand wurde wie in Tabelle 5-2 dargestellt angepasst.

Die Kalibrierung erfolgte anhand der Anpassung der über Reisezeitmessungen ermittelten Verlustzeit in VISSIM an die nach dem HBS (2015) mit einem Instationaritätsfaktor von 1,0 berechnete Wartezeit für den stationären Fall. Hierfür wurde ein konstanter Zufluss mit einer Auswahl der Szenarien mit einem Auslastungsgrad  $x_j$  im Bereich zwischen effektiv 0,91 und 0,96 verwendet. Nachdem die Abweichungen der Verlustzeit aus der Simulation und den nach HBS (2015) berechneten Wartezeiten in verschiedene Richtungen gingen, war die mittlere Abweichung über alle Varianten maßgeblich. Die Parameteranpassungen in Tabelle 5-2 führten zur geringsten mittleren Abweichung von 3%.

Tabelle 5-3 zeigt die verwendeten Einstellungen des Signalprogramms und die zugehörigen Ergebnisse, inklusive der sich dabei ergebenden Sättigungsverkehrsstärken. Dabei erfolgte die eigentliche Kalibrierung anhand der vier Szenarien, für die die Abweichungen zwischen der nach HBS (2015) berechneten Wartezeit und der Verlustzeit aus der Simulation angegeben ist.

Um die Sättigungsverkehrsstärke noch genauer zu untersuchen und sicherzustellen, dass stets Fahrzeuge in der Warteschlange warten, sodass sich tatsächlich die Sättigungsverkehrsstärke zeigt, wurden weitere vier Szenarien mit höheren Zufluss-Verkehrsstärken verwendet, bis hin zu einer Einstellung starker Überlastung ( $x=1,17$ ) bei minimaler Sperrzeit (5s).

Es ergaben sich dabei teilweise deutlich höhere Werte, auch gegenüber der im HBS (2015) für Standardbedingungen angesetzten Sättigungsverkehrsstärke von 2000 Fz/h. Der Grund hierfür liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit im Element ‚Verhalten bei Rot-Gelb‘ innerhalb des Fahrverhaltens an Lichtsignalanlagen in

VISSIM, das in der Standardeinstellung ‚Fahren (wie bei grün)‘ belassen wurde. Der Freigabezeitanteil der Signalprogramme ist, bedingt durch die Simulationsszenarien, für alle zur Kalibrierung verwendeten Varianten in ähnlichem Maße höher als im Allgemeinen in der Praxis vorzufinden und könnte ebenfalls einen Effekt haben.

**Tabelle 5-2 Eingestellte Parameter des kalibrierten Fahrverhaltens an LSA**

Reduzierter Sicherheitsabstand nahe einer Haltlinie:	VISSIM default	kalibriert
- Faktor	0,60	0,53
- Beginn stromaufwärts der Haltlinie	100 m	150 m
- Ende stromabwärts der Haltlinie	100 m	100 m

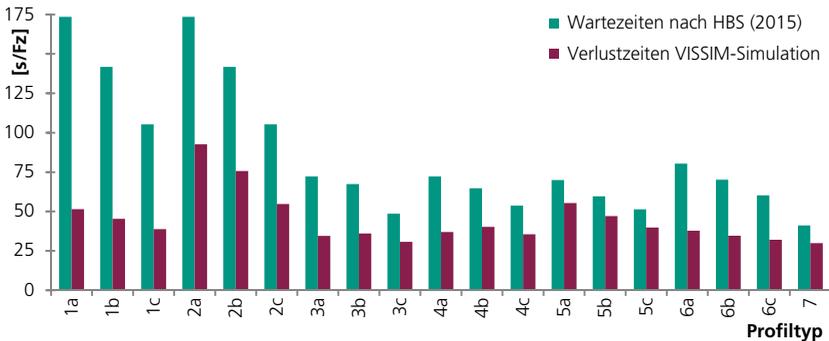
**Tabelle 5-3 Ergebnisgrößen der Kalibrierung des VISSIM-Modells mit LSA**

Umlaufzeit [s]	30	60	60	120	30	60	60	120	60
Freigabezeit [s]	20	30	45	75	20	30	45	75	55
Auslastungsgrad [-]	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	1,01	0,99	0,98	1,17
Wartezeit HBS [s/Fz]	14,87	30,76	19,43	38,04					
Verlustzeit VISSIM [s/Fz]	16,40	23,95	19,27	37,90					
Abweichung [%]	10%	-22%	-1%	0%					
Mittelwert der Abweichungen:				3%					
Sättigungs- verkehrsstärke [Fz/h]	1989	2044	2066	2056	2091	2276	2191	2122	2186
Mittelwert der Sättigungsverkehrsstärke:									2113

Unabhängig von den Ursachen bewegen sich die Abweichungen der Sättigungsverkehrsstärken gegenüber dem Wert von 2000 Kfz/h aber, mit nur einer Ausnahme, unterhalb von 10%. In Anbetracht der zu untersuchenden Auswirkung von Instationarität im Zufluss und eine dadurch begründete Kalibrierung des Simulationsmodells am Fall stationären Zuflusses, ist diese Abweichung von akzeptabler Größenordnung. Im Sinne möglichst hoher Vereinheitlichung wurden die weiteren Berechnungen mit einer Sättigungsverkehrsstärke von 2100 Kfz/h durchgeführt.

## 5.2 Auswertung der Simulationsergebnisse

Entsprechend der Erwartungen sind die Simulationsergebnisse der einzelnen Zuflussprofiltypen sehr verschieden, sowohl hinsichtlich der absoluten mittleren Verlustzeiten pro Fahrzeug als auch für die prozentualen Abweichungen zu den nach HBS (2015) berechneten Wartezeiten. Abbildung 5-3 stellt die absoluten Werte dieser Zeiten, gemittelt über alle Simulationsszenarien für alle Profiltypen dar. Insgesamt liegen dabei alle Verlustzeiten aus der Simulation unterhalb der berechneten Wartezeiten, in die allerdings die im Rahmen der Kalibrierung aus der Simulation ermittelte Sättigungsverkehrsstärke eingeht.



**Abbildung 5-3 Mittelwerte der Wartezeiten nach HBS (2015) sowie der Verlustzeiten aus der Simulation pro Zuflussprofiltyp**

Am auffälligsten sind hier sicherlich die Unterschiede für die Profiltypen 1 (Anstieg) und 2 (Abfall). Gut zu erkennen sind die identischen Wartezeiten nach HBS (2015) für die Profiltypen 1a und 2a etc., da es sich um eine exakte Spiegelung der Belastungen innerhalb der Stunde handelt und die Ausgangswerte für die Berechnung nach dem HBS (2015) damit übereinstimmen. Im Gegensatz dazu stehen die Simulationsergebnisse, innerhalb derer sich deutlich abzeichnet, ob die größte Belastung zu Beginn oder am Ende der betrachteten Stunde auftritt. Baut sich bereits am Anfang eine entsprechende Warteschlange auf, dauert es länger, bis sich diese wieder abbaut und es kommt zu insgesamt höheren mittleren

Verlustzeiten als für den Fall eines über den Verlauf der Stunde steigenden Fahrzeugzuflusses. Je ähnlicher der Zuflussprofiltyp der in der Formel nach dem HBS (2015) unterstellten Parabelform ist, hier insbesondere zutreffend für die Profiltypen mit der Nummer 5, desto geringer sind die Differenzen zwischen der berechneten Wartezeit und der Verlustzeit aus der Simulation. In Abbildung 5-4 sind diese Unterschiede in Form der mittleren prozentualen quadratischen Abweichung (RMSPE, siehe Gleichung 5-1), sortiert nach Zuflussprofiltyp dargestellt.

$$\text{RMSPE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( \frac{x_n^{\text{sim}} - x_n^{\text{cal}}}{x_n^{\text{cal}}} \right)^2} \quad 5-1$$

mit:

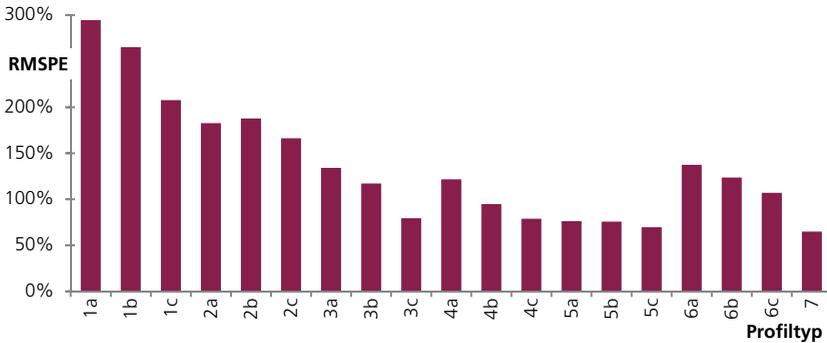
RMSPE root mean squared percentage error

(mittlere prozentuale quadratische Abweichung)

$x^{\text{sim}}$  Simulationswerte, hier z.B. die VISSIM-Verlustzeit

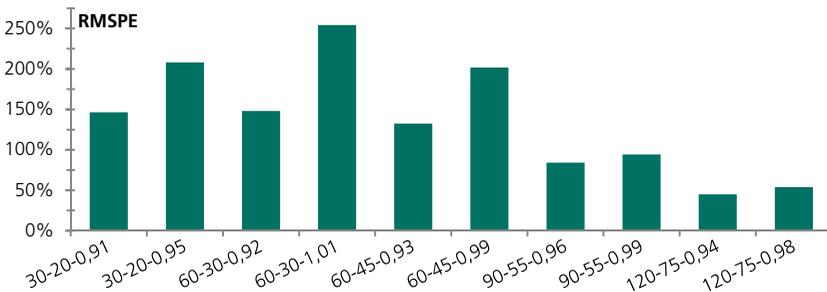
$x^{\text{cal}}$  berechnete Daten, hier z.B. die Wartezeit nach HBS (2015)

Wie schon anhand der absoluten Zeitwerte ersichtlich, werden die stärksten Abweichungen durch innerhalb der Stunde ansteigende Verkehrsstärken verursacht, wobei das Verhältnis der minimalen zur maximalen Belastung innerhalb der Ganglinie zusätzlichen Einfluss hat. Je mehr sich ein Ganglinienprofil der idealisierten konstanten Belastung oder der Parabelform annähert bzw. je geringer der Unterschied zwischen dem höchstbelasteten 15-Minuten-Intervall und der mittleren Verkehrsstärke innerhalb der Stunde ausfällt, desto niedriger ist auch die Abweichung. Ebenso ist gut erkennbar, dass es eine Rolle spielt, ob die erste oder die zweite Hälfte der betrachteten Stunde stärker belastet ist. Dies trifft nicht nur auf die bereits erwähnten Profiltypen 1 und 2 zu, sondern auch in schwächerer Form für die Wellenformprofile 3 und 4.



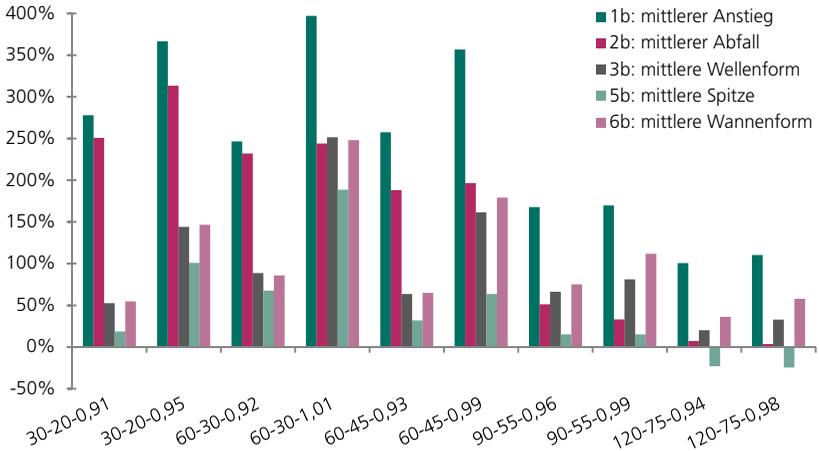
**Abbildung 5-4 RMSPE der Simulationsergebnisse und der nach HBS (2015) berechneten mittleren Wartezeiten je Profiltyp**

Der Zuflussprofiltyp 7 zur Modellierung eines stationären Zuflusses weist erwartungsgemäß die kleinste Abweichung auf. Die Tatsache, dass es in diesem Fall überhaupt zu einer Abweichung kommt, gibt einen ersten Hinweis darauf, dass nicht allein die Instationarität des Zuflusses (unabhängig von Form, Verlauf oder Höhe), sondern auch der tatsächliche Auslastungsgrad einen Einfluss auf die Abweichungen haben könnte.



**Abbildung 5-5 RMSPE der Simulationsergebnisse und der nach HBS (2015) berechneten mittleren Wartezeiten je Simulationsszenario (Umlaufzeit-Freigabezeit-Auslastungsgrad)**

Daher sind in Abbildung 5-5 die Differenzen in Form des RMSPE, sortiert nach den Simulationsszenarien zusammengefasst. Abbildung 5-6 zeigt zusätzlich für die jeweils mittlere Ausprägung der Zuflussprofiltypen die einzelnen prozentualen Unterschiede pro Szenario.



**Abbildung 5-6** Prozentuale Abweichungen der Simulationsergebnisse von den nach HBS (2015) berechneten Wartezeiten für ausgewählte Zuflussprofiltypen, nach Simulationsszenario

Auffällig ist, dass für jede Signalprogramm-Variante die Abweichungen zwischen Simulationsergebnissen und Wartezeit für den jeweils höheren Auslastungsgrad größer ausfallen. Die Szenarien 30-20-0,91, 60-30-0,92 und 60-45-0,93 sind sich von der Höhe der Unterschiede und auch von deren Struktur bezüglich der Profiltypen her ähnlich. Die Szenarien 60-45-0,99 und 90-55-0,99 hingegen weisen deutlich unterschiedliche Charakteristiken auf. Es scheint die Umlaufzeit ebenfalls Einfluss auf Abweichungen zwischen Verlustzeiten aus der Simulation und Wartezeit nach HBS (2015) zu haben. Ein Grund hierfür könnte in den Simulationseinstellungen liegen und wird im weiteren Verlauf noch angesprochen. Der Einfluss des Auslastungsgrades wird dabei vermutlich abgemildert. Was die einzelnen Zuflussprofiltypen angeht, wirkt sich die relative Auslastung anscheinend umso

stärker auf die Abweichungen aus, je symmetrischer der Profiltyp aufgebaut ist. Die Profiltypen 1 und 2 mit den am wenigsten symmetrischen Verläufen werden eher von der Länge der Umlaufzeit beeinflusst. Interessanterweise ergeben sich für den Zuflussprofiltyp 5 („Spitze“) einzelne Fälle mit niedrigeren Wartezeiten nach HBS (2015) als die entsprechenden per Simulation ermittelten Verlustzeiten. Auch wenn die meisten Unterschiede durch niedrigere Verlustzeiten als berechnete Wartezeiten verursacht sind, sollte nicht zwangsläufig von einer generellen Unterschätzung gegenüber dem HBS (2015) ausgegangen werden. In Tabelle 5-4 sind alle prozentualen Abweichungen nochmals einzeln aufgeführt.

**Tabelle 5-4 Prozentuale Abweichungen der mittleren Wartezeiten in [s/Kfz] nach HBS (2015) zu den in der Simulation gemessenen Verlustzeiten für die Laborbeispiele**

Zuflussprofiltyp / Simulationsszenario	I: 30-20-0,91	II: 30-20-0,95	III: 60-30-0,92	IV: 60-30-1,01	V: 60-45-0,93	VI: 60-45-0,99	VII: 90-55-0,96	VIII: 90-55-0,99	IX: 120-75-0,94	X: 120-75-0,98
1a - starker Anstieg	314	409	305	382	314	409	185	183	114	129
1b - mittlerer Anstieg	278	367	246	397	258	357	168	170	101	110
1c - leichter Anstieg	148	281	168	364	172	287	141	156	76	90
2a - starker Abfall	276	263	251	190	184	228	36	37	6	11
2b - mittlerer Abfall	251	313	232	244	188	197	51	33	7	4
2c - leichter Abfall	164	262	170	295	145	190	73	53	16	5
3a - starke Wellenform 'rechts'	58	150	92	272	70	202	80	119	37	61
3b - mittl. Wellenform 'rechts'	53	144	89	252	64	162	66	81	20	33
3c - leichte Wellenform 'rechts'	14	70	51	192	26	104	44	67	15	19
4a - starke Wellenform 'links'	65	138	88	246	70	184	76	99	26	39
4b - mittlere Wellenform 'links'	41	118	72	206	42	137	46	59	20	6
4c - leichte Wellenform 'links'	24	82	58	186	29	107	40	57	-1	0
5a - starke Spitze	34	99	78	175	25	90	8	11	-27	-23
5b - mittlere Spitze	19	101	68	189	32	64	15	15	-23	-25
5c - leichte Spitze	11	73	52	183	20	70	22	22	-16	-22
6a - starke Wannenform	73	168	105	269	89	197	83	114	38	61
6b - mittlere Wannenform	55	147	86	248	65	179	75	112	36	58
6c - leichte Wannenform	34	114	67	223	48	163	66	97	28	51
7 - konstanter Zufluss	-9	30	28	176	1	79	26	50	0	-1
Quadratsumme des Szenario	39	79	40	124	32	77	13	17	4	6

## 5.3 Ein neuer Faktor zur Modellierung der Instationarität

Die Analyse der Unterschiede zwischen den Simulationsergebnissen und den nach HBS (2015) berechneten mittleren Wartezeiten liefert Hinweise auf mögliche Charakteristika zur Abbildung und Integration der Instationarität im Berechnungsverfahren. Für eine genauere Untersuchung, ob und in welchem Ausmaß eine Auswirkung bestehen könnte, werden folgende Eigenschaften der Zuflussprofiltypen in Betracht gezogen:

- relative Differenz des höchstbelasteten 15-Minuten-Intervalls zur Gesamtverkehrsstärke:  $\frac{q_{15,max} - q_{60}}{q_{60}}$
- relative Differenz des höchstbelasteten 15-Minuten-Intervalls zum niedrigstbelasteten:  $\frac{q_{15,max} - q_{15,min}}{q_{15,min}}$
- Position des höchstbelasteten 15-Minuten-Intervalls innerhalb der Stunde
- Hälfte der Stunde mit der höheren Belastung
- Auslastungsgrad

Für die Identifikation der Einflussfaktoren wird zunächst für jedes Szenario und jeden Zuflussprofiltyp ein ‚idealer Instationaritätsfaktor‘ bestimmt, für den die Abweichung zwischen den mittleren Verlustzeiten aus der Simulation und den nach HBS (2015) unter Verwendung dieses idealen Faktors berechneten Wartezeiten minimal wird. Dabei werden zwei Versionen für die Berechnung der mittleren Warteschlangenlänge getestet:

- Verwendung der bestehenden Gleichung des HBS (2015)
- Verwendung der ‚Basisformel‘ nach Akçelik (1980) (vgl. Gleichung 2-11)

Unabhängig davon, dass sich eine Minimierung der Abweichungen mittels der Formel nach dem HBS (2015) als deutlich schwieriger herausstellt, ist die Korrektheit der Verwendung der ursprünglichen Formel nach Akçelik offensichtlich. Wie in Kapitel 3.3.2 aufgezeigt, unterscheiden sich die beiden Formulierungen lediglich durch den nahezu undokumentierten Faktor 0,58. Dieser lässt sich allein durch die Unterstellung einer parabelförmigen, symmetrischen Spitzenstundenganglinie erklären. Eine Identifikation charakteristischer Einflussfaktoren der

verschiedenen Zuflussprofiltypen auf Basis dieser Gleichung wäre also ein Widerspruch in sich und kann daher allein auf der Basisformel nach Akçelik ohne diese Annahme erfolgen.

Auf der Grundlage dieses idealen Instationaritätsfaktors werden verschiedene Kombinationen der potentiellen Einflussgrößen in diversen Formen getestet und untersucht. Als mögliche Varianten, wie diese als Variablen in eine Formulierung eines neuen Instationaritätsfaktors eingehen könnten, werden in erster Linie ein additiver sowie ein multiplikativer Einfluss analysiert. Eine Möglichkeit in Form eines Exponenten wurde aufgrund der Komplexität nur am Rande betrachtet und wird daher nicht näher erläutert. In der Grundform für den additiven Ansatz sind alle potentiellen Einflussgrößen als Linearkombination enthalten:

$$f_{IN,neu} = 1 + f_{q60} \left( \frac{q_{15,max} - q_{60}}{q_{60}} \right) + f_{qmin} \left( \frac{q_{15,max} - q_{15,min}}{q_{15,min}} \right) + f_{q\frac{1}{2}} n_{q\frac{1}{2}} + f_x x \quad 5-2$$

mit:

- $f_{IN,neu}$  Instationaritätsfaktor, neu
- $f_{q60}$  Faktor für das Verhältnis des höchstbelasteten 15-Minuten-Intervalls zum 60-Minuten-Intervall
- $q_{15,max}$  Verkehrsstärke im höchstbelasteten 15-Minuten-Intervall innerhalb der Spitzenstunde [Kfz/h]
- $q_{60}$  Verkehrsstärke im 60-Minuten-Intervall (Spitzenstunde) [Kfz/h]
- $f_{qmin}$  Faktor für das Verhältnis des höchstbelasteten zum niedrigstbelasteten 15-Minuten-Intervall
- $q_{15,min}$  Verkehrsstärke im niedrigstbelasteten 15-Minuten-Intervall innerhalb der Spitzenstunde [Kfz/h]
- $f_{q\frac{1}{2}}$  Faktor für die Lage des stärker belasteten 30-Minuten-Intervalls
- $n_{q\frac{1}{2}}$  Parameter für die Lage des stärker belasteten 30-Minuten-Intervalls, wobei  $n_{q\frac{1}{2}} = 1$ , wenn  $q_{30,1} > q_{30,2}$  (erste Hälfte der Spitzenstunde ist die höher belastete),  $n_{q\frac{1}{2}} = 2$  für  $q_{30,1} < q_{30,2}$  sowie  $n_{q\frac{1}{2}} = 1,5$  für den symmetrischen und  $n_{q\frac{1}{2}} = 0$  für den stationären Fall
- $f_x$  Faktor für den Auslastungsgrad
- $x$  Auslastungsgrad

Der multiplikative Ansatz besteht aus dem Produkt der potentiellen Einflussgrößen und eines zu bestimmenden Faktors. Für jede der in Frage kommenden Kombinationen erfolgt die Ermittlung von Faktoren bzw. Parametern über die Minimierung der Summe der Fehlerquadrate. Diese entsprechen hier den relativen Abweichungen zwischen dem idealen Instationaritätsfaktor und dem Wert, der durch die variablen Faktoren oder Parameter bestimmt wird. Das Vorgehen entspricht der Methode der gewichteten kleinsten Quadrate:

$$\min \sum_i \left( \frac{f_{IN,neu,i} - f_{IN,ideal,i}}{f_{IN,ideal,i}} \right)^2 \quad 5-3$$

mit:

$f_{IN,ideal,i}$  zu prüfender, nach neuer Vorschrift berechneter, Instationaritätsfaktor  
 $f_{IN,neu,i}$  idealer Instationaritätsfaktor

Die Methode der kleinsten Quadrate, bei der in die Bildung der Fehlerquadrate statt des hier verwendeten relativen Abstands die absolute Differenz eingeht, wird als alternatives Verfahren in Betracht gezogen. Die so erzielten Parameter liefern jedoch bei der Validierung (siehe folgendes Kapitel) deutlich höhere Abweichungen, so dass auf diese Berechnungsform und die zugehörigen Ergebnisse nicht näher eingegangen wird.

Tabelle 5-5 zeigt die mit obiger Methode bestimmten Faktoren für die relevanten Einflussgrößen, die Quadratesumme aller berücksichtigter Abweichungen sowie die maximalen prozentualen Abweichungen einzelner Elemente für die vier Varianten mit den niedrigsten Abweichungen. Die prozentualen Abweichungen sind für die Verwendung der Faktoren mit zwei bzw. drei Nachkommastellen angegeben. Die Bezeichnungen stehen für ‚additiv‘ (A), also den Aufbau des Faktors als Linearkombination, die Anzahl der verwendeten Einflussgrößen sowie eine laufende Nummer. In den letzten beiden Spalten finden sich zum Vergleich außerdem ein Beispiel für die Berücksichtigung lediglich einer einzelnen Einflussgröße (A 1-4) sowie für den multiplikativen Ansatz (Mult).

**Tabelle 5-5 Kenngrößen verschiedener Variationen für den Aufbau eines Instationaritätsfaktors**

Kombination	A 4	A 3-3	A 2-1	A 2-2	A 1-4	Mult
$f_{q60}$	0,5174429	0,2522735	0,2181681	0,2383935	-	
$f_{qmin}$	-0,0921484	-	-	-	-	3,571277
$f_{q,1/2}$	-0,0090817	-0,0076992	-0,0210034	-	-	
$f_x$	-0,0299581	-0,0273701	-	-0,0369617	-0,0004876	
Quadratsumme der Abweichungen	0,261	0,261	0,273	0,264	0,361	50,888
maximale Abweichungen	-9...8 %	-10...8 %	-9...11 %	-9...9 %	-12...11 %	-100... ...118 %

Klar ersichtlich ist hierbei die Relevanz der Profiltypeneigenschaft, um wieviel sich das höchstbelastete 15-Minuten-Intervall von der mittleren stündlichen Verkehrsstärke unterscheidet. Das Verhältnis dieser beiden Werte ist als einzige Charakteristik des Zuflussprofils im bisherigen Instationaritätsfaktor nach HBS (2015) (Gleichung 3-2) enthalten. Wird diese Eigenschaft miteinbezogen, verliert die zweite Kenngröße für die Amplitude der Ganglinie zwischen höchst- und niedrigstbelastetem 15-Minuten-Intervall soweit an Relevanz, dass keine der Kombinationen unter den am besten abschneidenden enthalten ist bzw. der entsprechende Faktor für die Variante mit allen vier Kenngrößen sogar einen negativen Wert annimmt. Von den anfangs aufgezählten möglichen Charakteristika erweisen sich diejenigen für die Kennzeichnung der stärker belasteten Hälfte und des Auslastungsgrades als relevant. Somit ergibt sich als Grundform des neuen Instationaritätsfaktors die additive Variante. Zusammenfassungen aller relevanten Ergebnisse für die Simulationsszenarien finden sich für die einzelnen Zuflussprofiltypen im Anhang ab S. 116.

## 5.4 Identifikation des optimalen Faktors mithilfe der Realdaten

Um aus der im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Auswahl möglicher Kombinationen von Einflussgrößen die ideale Variante zu identifizieren, werden diese auf die Spitzenstundenzuflussprofile der Dresdener Pegelzählstellendaten angewendet. Dafür wird mit diesen realen Profilen statt der Labor-Profiltypen, jedoch denselben Szenarien, simuliert. Die anschließende Auswertung erfolgt ebenfalls auf dieselbe Art und Weise. Um diesem Setup zu entsprechen und eine Vergleichbarkeit der Realbeispiele untereinander zu gewährleisten, werden alle Profile auf die passenden Gesamtverkehrsstärken pro Stunde skaliert.

Die Ergebnisse in Form der Abweichungen als Quadratesumme der Mittelwerte pro Variante über alle Zuflussprofile sind in Tabelle 5-6 zusammengefasst. Die Benennung besteht aus ‚A‘ für additiv, der Nummer der Variante (z.B. 3-1) und der Anzahl der Nachkommastellen der Faktoren. Die obere Hälfte zeigt dabei die Varianten, aus deren Menge die Parameterkombination für den neuen Faktor zur Berücksichtigung der Instationarität gewählt wird. Im unteren Teil der Tabelle finden sich die Ergebnisse desselben Berechnungsverfahrens auf leicht modifizierter Datenbasis (Markierung: \* für die Variante A 3-3) als eine vereinfachte Betrachtung hinsichtlich der Empfindlichkeit auf Änderungen. Außerdem sind die Werte aufgelistet, die sich bei Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate (also nicht der relativen kleinsten Quadrate) für die Ermittlung der Parameter, ebenfalls für die Variante 3-3 (‚aKQ‘), ergeben.

Der jeweils minimale Wert pro Szenario ist dabei farblich markiert, bei den Summen die kleinsten drei. Es ist eindeutig zu erkennen, dass die Kombination A 3-3, welche die Parameter  $f_{q60}$ ,  $f_{q,1/2}$  und  $f_{x,i}$  beinhaltet, sowohl in der Version mit zwei als auch mit drei Nachkommastellen unter den kleinsten Gesamtsummen vorkommt. Dies spricht für eine Stabilität dieser Kombination. Auch ist bemerkenswert, dass dieser Fall die mit Abstand geringsten Abweichungen für die Variante mit einem Auslastungsgrad von  $x > 1$  zeigt. Somit ist die Auswahl der Kombination A 3-3 für die Neufassung des Instationaritätsfaktors eindeutig,

einzig die Anzahl der Nachkommastellen für die einzelnen Parameter bleibt als Freiheitsgrad bestehen. Da die Ergebnisse für die Variante mit zwei Nachkommastellen eindeutig besser sind, muss hierbei nicht zwischen möglichst hoher Genauigkeit und Praktikabilität gewählt werden. Die Gesamt-Quadratsumme aller Abweichungen der so berechneten Wartezeiten gegenüber der Verlustzeiten aus der Simulation beträgt dabei 40,64 und ist um 90% geringer als diejenige zwischen den Wartezeiten nach der bisherigen Berechnung laut HBS (2015) und den Verlustzeiten aus der Simulation.

**Tabelle 5-6** Quadratesummen über die mittleren Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und den nach der entsprechenden, zu prüfenden Kombination berechneten Wartezeiten für die verschiedenen Szenarien

	I: 30-20-0,91	II: 30-20-0,95	III: 60-30-0,92	IV: 60-30-1,01	V: 60-45-0,93	VI: 60-45-0,99	VII: 90-55-0,96	VIII: 90-55-0,99	IX: 120-75-0,94	X: 120-75-0,98	Summe
Auslastungsgrad	0,91	0,95	0,92	1,01	0,93	0,99	0,96	0,99	0,94	0,98	
Abweichung Simulation – Ber. nach HBS	18,74	64,22	26,77	161,20	19,31	77,17	14,11	22,87	3,81	5,72	413,93
A 4, 2	2,96	0,36	29,40	3,50	3,82	0,36	1,69	1,93	3,72	4,29	52,94
A 4, 3	2,89	0,37	30,37	3,42	3,87	0,37	1,64	1,90	3,67	4,21	53,56
A 3-3, 2	3,50	1,13	0,14	17,80	4,12	1,21	2,04	1,55	4,19	4,95	40,64
A 3-3, 3	2,94	0,72	0,21	25,60	3,48	1,55	1,60	1,21	3,76	4,21	45,28
A 2-1, 2	2,74	0,72	0,36	35,74	3,20	2,71	1,41	1,31	3,54	3,68	55,40
A 2-1, 3	2,90	0,79	0,32	32,89	3,38	2,39	1,53	1,33	3,67	3,89	53,08
A 2-2, 2	2,97	0,76	0,20	23,00	3,55	1,39	1,68	1,29	3,83	4,38	43,05
A 2-2, 3	2,74	0,62	0,25	26,91	3,28	1,65	1,50	1,19	3,64	4,06	45,84
A 3-3, 2 *	2,57	0,59	0,32	33,37	3,05	2,45	1,31	1,17	3,45	3,67	51,95
A 3-3, 3 *	2,54	0,57	0,32	33,48	3,02	2,41	1,30	1,16	3,44	3,65	51,89
A 3-3, 2 aKQ	2,66	0,59	0,29	31,48	3,16	2,10	1,38	1,14	3,53	3,78	50,11
A 3-3, 3 aKQ	2,67	0,59	0,28	30,83	3,17	2,03	1,39	1,14	3,55	3,82	49,48

Damit ergibt sich der neue Faktor zur Berücksichtigung instationärer Zuflussprofile an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage (Gleichung 5-4) zur Verwendung in der Formel zur Berechnung der Warteschlangenlänge (Gleichung 5-5). Die Abweichungen zum idealen Instationaritätsfaktor in Form des RMSPE bewegen sich für die einzelnen Zuflussprofile zwischen 3,1% und 5,3% über alle Simulationsszenarien und sind in Abbildung 5-7 zusammengefasst.

$$f_{IN,neu,j} = 1 + 0,25 \cdot \left( \frac{q_{15,max,j} - q_{60,j}}{q_{60,j}} \right) - 0,01 \cdot n_{q_{\frac{1}{2}},j} - 0,03 \cdot x_j \quad 5-4$$

mit:

- $f_{IN,neu}$  Instationaritätsfaktor, neu
- $q_{15,max}$  Verkehrsstärke im höchstbelasteten 15-Minuten-Intervall innerhalb der Spitzenstunde [Kfz/h]
- $q_{60}$  Verkehrsstärke im 60-Minuten-Intervall (Spitzenstunde) [Kfz/h]
- $q_{15,min}$  Verkehrsstärke im niedrigstbelasteten 15-Minuten-Intervall innerhalb der Spitzenstunde [Kfz/h]
- $n_{q_{\frac{1}{2}}}$  Parameter für die Lage des stärker belasteten 30-Minuten-Intervalls, wobei  $n_{q_{\frac{1}{2}}} = 1$ , wenn  $q_{30,1} > q_{30,2}$  (erste Hälfte der Spitzenstunde ist die höher belastete),  $n_{q_{\frac{1}{2}}} = 2$  für  $q_{30,1} < q_{30,2}$  sowie  $n_{q_{\frac{1}{2}}} = 1,5$  für den symmetrischen und  $n_{q_{\frac{1}{2}}} = 0$  für den stationären Fall

$$N_{GE,j} = \frac{T \cdot C_{0,i,j}}{4} \cdot \left[ (f_{IN,neu,j} \cdot x_j - 1) + \sqrt{(f_{IN,neu,j} \cdot x_j - 1)^2 + \frac{4 \cdot f_{IN,neu,j} \cdot x_j}{T \cdot C_{0,i,j}}} \right] \quad 5-5$$

mit:

- $f_{IN,neu}$  Instationaritätsfaktor, neu
- $N_{GE,j}$  mittlerer Rückstau bei Freigabezeitende für den Betrachtungszeitraum auf FS j [Kfz]
- $T$  Betrachtungszeitraum (im Allgemeinen  $T=1h$ ) [h]
- $C_{0,i,j}$  Kapazität des Stroms i auf FS j [Kfz/h]
- $x_j$  Auslastungsgrad des FS j [-]

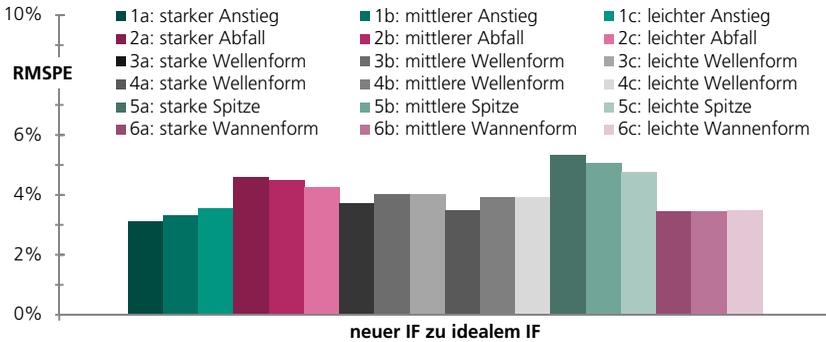


Abbildung 5-7 RMSPE des neu entwickelten zum idealen Instationaritätsfaktor

## 5.5 Ergebnisse bei der Anwendung des neuen Instationaritätsfaktors

Die mit Hilfe des neuen Faktors berechneten mittleren Wartezeiten weisen erwartungsgemäß eine grundsätzlich geringere Abweichung zu den Verlustzeiten aus der Simulation auf. Abbildung 5-8 zeigt die mittleren Abweichungen der Wartezeiten gegenüber der Verlustzeiten aus der Simulation in Form des RMSPE, gemittelt über die Simulationsszenarien für die einzelnen Zuflussprofiltypen.

Es ist sehr gut ersichtlich, dass die Unterschiede bei Berechnung mittels des neuen Instationaritätsfaktors nicht nur deutlich geringer ausfallen als bei Berechnung nach HBS (2015), sondern auch weniger Variation zeigen. Die Bandbreite des RMSPE der Wartezeiten nach HBS (2015) reicht dabei von 295% für den Profiltyp 1a bis 70% für Profiltyp 5c. Für die neu berechneten Wartezeiten bewegt sich der RMSPE lediglich zwischen 48% (1a) und 27% (3c). Ein ähnlich gleichmäßiges Bild zeigt sich in Abbildung 5-9 für den RMSPE zwischen den mithilfe des neuen Instationaritätsfaktors berechneten Wartezeiten gegenüber denjenigen nach HBS (2015). Die Profiltypen von mehr oder minder symmetrischer Form (3 bis 6) zeigen ähnliche Unterschiede, die von der Amplitude der Ganglinie abzuhängen scheinen. Für die Profiltypen 1 und 2 mit an- bzw. absteigendem Verlauf sind die RMSPE-Werte höher, aber pro Grundtyp weniger verschieden.

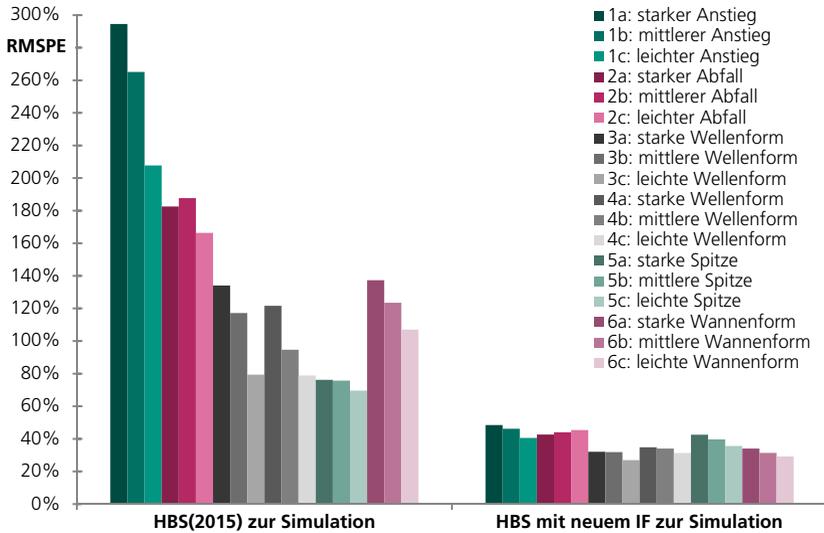


Abbildung 5-8 Abweichungen der berechneten Wartezeiten zu den Verlustzeiten aus der Simulation, je Zuflussprofiltyp

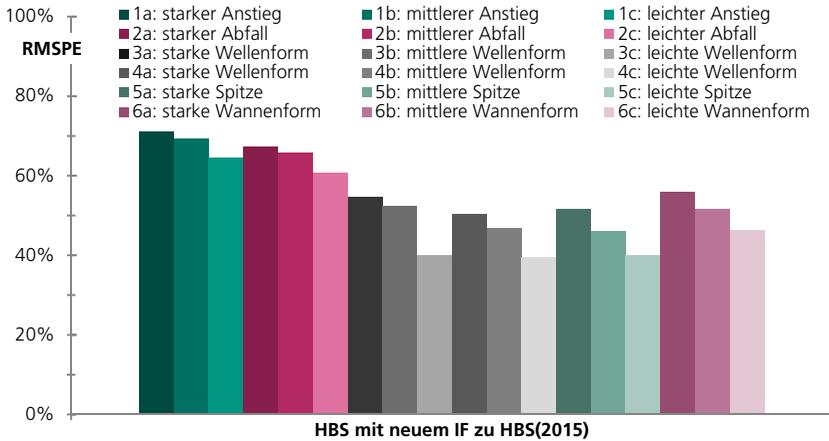


Abbildung 5-9 RMSPE der mittels neuem Instationaritätsfaktor und nach HBS (2015) berechneten Wartezeiten, je Zuflussprofiltyp

**Tabelle 5-7 Wartezeiten , Verlustzeiten und Abweichungen zwischen den Ergebnissen für Laborbeispiele und Realdaten, nach Szenario**

Variante ( $t_u-t_f$ )	x	Daten	Verlust- zeiten VISSIM [s/Kfz]	Berechnete Wartezeiten [s/Kfz]		Abweichung HBS- Simulation [%]		Abweichungen neue Berechnung – Simulation [%]	
				HBS (2015)	mit neuem IF	Mittel- wert	Min / Max	Mittel- wert	Min / Max
I: 30-20	0,91	Labor	19,06	41,71	14,46	100	-9 / 314	-24	-33 / -13
		Real	20,13	29,20	13,69	44	-4 / 268	-32	-43 / -20
II: 30-20	0,95	Labor	24,08	71,89	22,79	175	30 / 409	-6	-24 / 8
		Real	23,32	49,88	19,59	113	35 / 390	-15	-32 / 8
III: 60-30	0,92	Labor	27,53	64,79	29,98	121	28 / 305	9	4 / 16
		Real	27,67	47,69	27,96	74	22 / 253	1	-16 / 13
IV: 60-30	1,01	Labor	40,96	143,59	74,87	247	175 / 397	84	47 / 126
		Real	37,58	114,08	63,22	209	134 / 428	68	32 / 141
V: 60-45	0,93	Labor	26,53	56,95	18,79	97	1 / 314	-28	-44 / -18
		Real	25,97	38,40	16,92	47	-2 / 268	-34	-50 / -21
VI: 60-45	0,99	Labor	38,60	110,85	42,08	179	64 / 409	9	-31 / 69
		Real	36,02	82,83	33,94	134	54 / 396	-5	-34 / 58
VII: 90-55	0,96	Labor	52,74	89,00	37,81	69	8 / 185	-22	-56 / 2
		Real	44,59	66,04	34,05	51	2 / 206	-22	-41 / -5
VIII: 90-55	0,99	Labor	71,79	124,58	57,27	81	11 / 183	-14	-47 / 9
		Real	58,78	96,45	48,74	70	17 / 232	-15	-42 / 27
IX: 120-75	0,94	Labor	65,24	79,86	37,11	24	-27 / 114	-36	-67 / -17
		Real	53,56	59,50	34,56	13	-20 / 140	-34	-53 / -16
X: 120-75	0,98	Labor	88,50	112,11	51,05	32	-25 / 129	-37	-61 / -17
		Real	73,30	85,93	45,09	22	-17 / 158	-36	-56 / -9

Tabelle 5-7 zeigt die Ergebnisse in Form der Wartezeiten, berechnet nach HBS (2015) bzw. mittels des neu entwickelten Faktors sowie die Verlustzeiten aus der Simulation und die Abweichungen zwischen den einzelnen Zeiten mit Mittelwert und Spannweite pro Simulationsszenario. Im Anhang sind zusätzlich für alle Zuflussprofiltypen und Pegelzählstellenprofile Diagramme mit den berechneten Wartezeiten und der Verlustzeit aus der Simulation, je Simulationsszenario abgebildet.

Vergleicht man die einzelnen Werte der Abweichungen für die Zuflussprofiltypen je Simulationsszenario, so ist ersichtlich, dass die Unterschiede zwischen den über den neuen Instationaritätsfaktors berechneten Wartezeiten und den Verlustzeiten aus der Simulation eine ähnliche Struktur bezüglich der Szenarien zeigen. In Abbildung 5-10 bis Abbildung 5-12 sind für die Profiltypen 2, 3 und 4 sowie 5 diese Abweichungen je Simulationsszenario dargestellt. Für die Wartezeiten nach HBS (2015) gegenüber den VISSIM-Verlustzeiten sind im Vergleich deutlich weniger Ähnlichkeiten zu entdecken (siehe Abbildung 5-13 bis Abbildung 5-15). Für die Wartezeiten nach HBS (2015) weisen die Differenzen zu den Simulationsergebnissen für die Profiltypen nur teilweise gleichartige Strukturen auf. So sind die Werte für die Szenarien mit längeren Freigabezeiten (90-55 und 120-75) sowohl bei den Profiltypen 2 als auch 5 deutlich niedriger als für die anderen Szenarien. Für die Profiltypen 3 und 4 hingegen ist dieser Kontrast weniger stark ausgeprägt. Die größten Abweichungen ergeben sich bei den Profiltypen 3, 4 und 5 für das Szenario 60-30-1,01, bei den Profiltypen 2 verteilen sich die höchsten Werte, je nach Amplitude, auf die Szenarien mit den kürzeren Umlaufzeiten.

Im Fall der relativen Unterschiede zwischen den Wartezeiten, die sich bei Anwendung des neuen Instationaritätsfaktors ergeben, und den Verlustzeiten aus der Simulation zeigen die Diagramme für alle Profiltypen eine ähnliche Struktur hinsichtlich der Größenordnungen und Vorzeichen. Lediglich die Profiltypen 5 zeigen für das Szenario 60-45-0,99 eine Ausnahme hiervon.

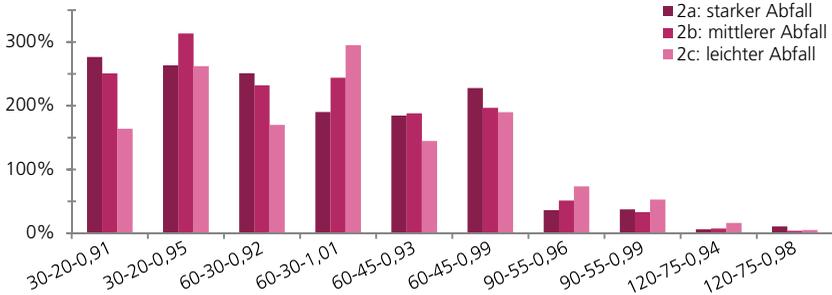


Abbildung 5-10 Abweichungen der Wartezeiten nach HBS (2015) zu den Verlustzeiten aus der Simulation für die Zuflussprofiltypen 2

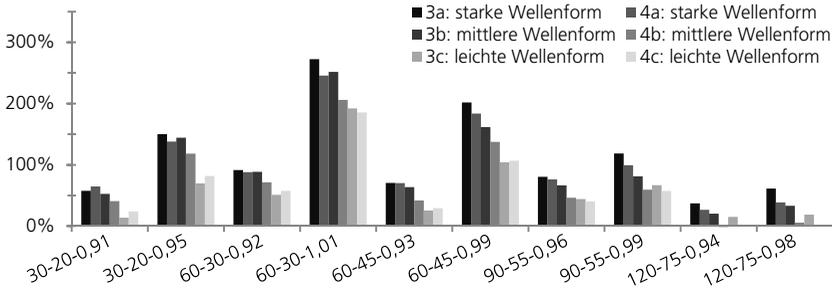


Abbildung 5-11 Abweichungen der Wartezeiten nach HBS (2015) zu den Verlustzeiten aus der Simulation für die Zuflussprofiltypen 3 und 4

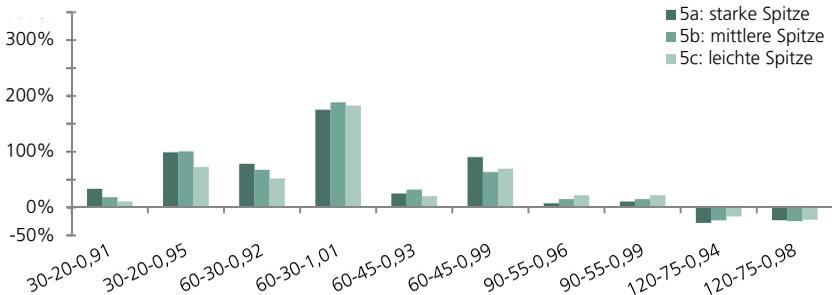


Abbildung 5-12 Abweichungen der Wartezeiten nach HBS (2015) zu den Verlustzeiten aus der Simulation für die Zuflussprofiltypen 5

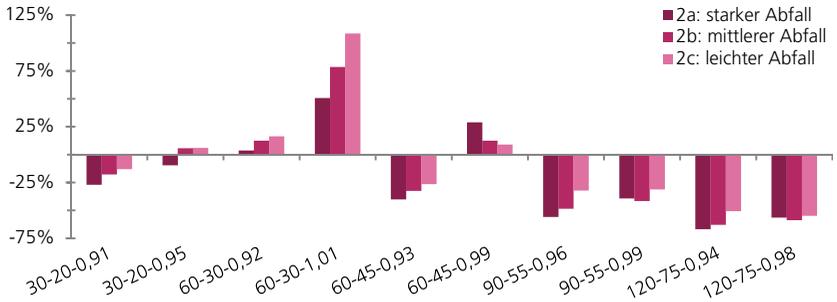


Abbildung 5-13 Abweichungen der Wartezeiten mit dem neuen IF zu den Verlustzeiten aus der Simulation für die Zuflussprofiltypen 2

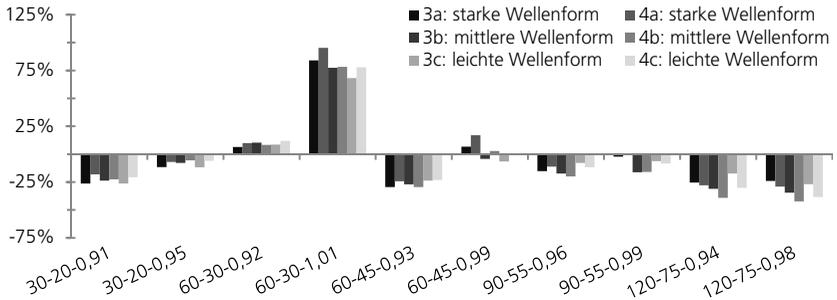


Abbildung 5-14 Abweichungen der Wartezeiten mit dem neuen IF zu den Verlustzeiten aus der Simulation für die Zuflussprofiltypen 3 und 4

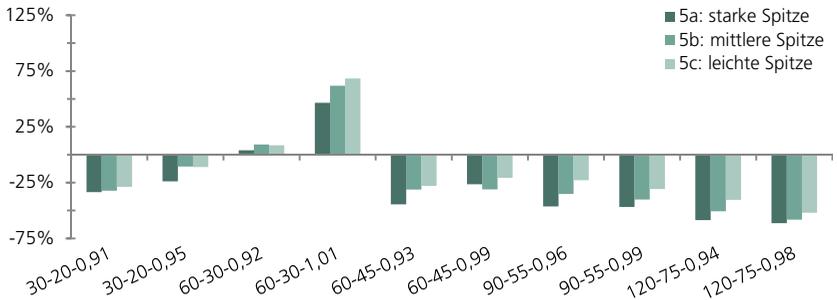


Abbildung 5-15 Abweichungen der Wartezeiten mit dem neuen IF zu den Verlustzeiten aus der Simulation für die Zuflussprofiltypen 5

Vergleichbar verhalten sich die Differenzen zwischen den nach HBS (2015) berechneten Wartezeiten und denjenigen durch Anwendung des neuen Instationaritätsfaktors. Die entsprechenden Abbildungen sind, sortiert für alle Zuflussprofiltypen, gemeinsam mit den hier bereits gezeigten Diagrammen, im Anhang ab S. 144 zusammengestellt.

Die beschriebenen Strukturveränderungen sind wenig überraschend, da der neue Instationaritätsfaktor über möglichst geringe Abweichungen zu den idealen Instationaritätsfaktoren optimiert ist. Die idealen Faktoren wiederum ergeben Wartezeiten mit dem kleinstmöglichen Unterschied zu den Verlustzeiten aus der Simulation. Dennoch zeigt der Zusammenhang, dass eine Modellierung des neuen Instationaritätsfaktors anhand von Charakteristiken des Verkehrsstärkeprofils geeignet ist, um die Auswirkungen von Instationarität auf die Wartezeiten abzubilden bzw. zu kompensieren.

## **5.6 Diskussion des neuen Instationaritätsfaktors und weitere Einflussfaktoren**

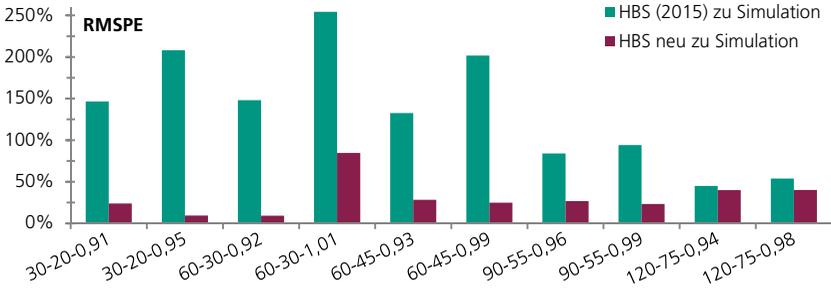
Wie die bisherigen Darstellungen vermuten lassen, bleiben Einflüsse aufgrund des Signalprogramms und des Auslastungsgrads übrig, die in die Berechnung nach HBS (2015) einzugehen scheinen. Die Ergebnisse in den Diagrammen in Abbildung 5-16 bis Abbildung 5-21 unterstützen diesen Eindruck. Sie zeigen die Abweichungen in Form des RMSPE bzw. als Mittelwerte, sortiert nach den Simulationsszenarien, gemittelt über alle Zuflussprofiltypen bzw. alle Zuflussprofile der Dresdner Pegelzählstellen. Letztere sind nur zur Auswahl, jedoch nicht zur Entwicklung des neuen Instationaritätsfaktors verwendet. Daher ist es umso interessanter, die Struktur der Abweichungen zu vergleichen. Mit nur sehr wenigen Ausnahmen stimmen die Unterschiede der auf verschiedene Arten berechneten Wartezeiten gegenüber den Simulationsergebnissen in ihrer Art und Größenordnung für die Profiltypen der Laborbeispiele und die Zuflussprofile der Pegelzählstellen überein.

Wenngleich die Unterschiede zwischen den neu berechneten Wartezeiten und den Simulationsergebnissen insgesamt geringer ausfallen, ist kritisch zu betrachten, dass die Wartezeiten in einigen Fällen niedriger sind als die Verlustzeiten.

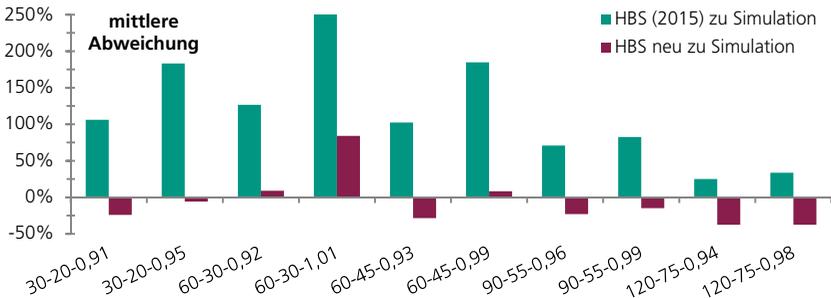
Dass die Berechnung nach HBS (2015) häufig zu sehr viel höheren Wartezeiten führt als per VISSIM ermittelte Verlustzeiten, hat zwei mögliche Ursachen. Die Simulation ist, gerade in ihrer Grundeinstellung, tendenziell zu optimistisch. Das HBS (2015) in seiner Funktion als Richtlinie neigt eher zur Überschätzung von Wartezeiten, um das Risiko von Fehleinschätzungen, gerade bei der Bewertung der Verkehrsqualität, zu vermeiden. Außerdem ist darauf zu achten, ob die für die Berechnung verwendete und die sich in der Simulation ergebende Sättigungsverkehrsstärke übereinstimmen. In dieser Untersuchung lag der Fokus klar auf einer möglichst realistischen Optimierung des Instationaritätsfaktors auf Basis der Simulation unter Verwendung des Berechnungsverfahrens nach HBS (2015).

Die mithilfe des neuen Instationaritätsfaktors berechneten Wartezeiten weichen auch für die Realdaten deutlich weniger von den Verlustzeiten aus der Simulation ab als die nach HBS (2015) bestimmten mittleren Wartezeiten. Dabei ist der Einfluss des Auslastungsgrades ohne Frage relevant, wird vermutlich aber von der Methodik nach HBS (2015) überschätzt, insbesondere bei Überschreiten der Kapazität. In die Berechnung des neuen Instationaritätsfaktors geht der Wert des Auslastungsgrades mit einem negativen Vorzeichen ein. Das bedeutet, dass der Einfluss des Auslastungsgrades in der Gesamtberechnung verringert wird.

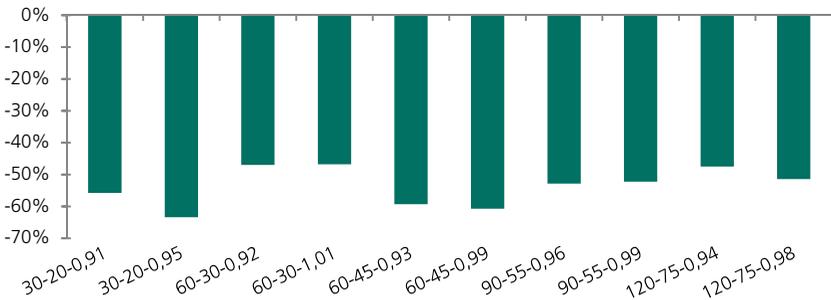
Zum Vergleich zeigen Abbildung 5-22 bis Abbildung 5-24 die absoluten Werte für die berechneten Wartezeiten und die Simulationsergebnisse. Bei der Betrachtung der einzelnen Zuflussprofiltypen über alle Szenarien ist ersichtlich, welche ‚Art‘ der Instationarität sich am stärksten auf die mittlere Verlust- bzw. Wartezeit auswirkt. Die Profiltypen 2 (Abfall) zeigen für jeden Fall die höchsten Werte. Die Warteschlange, die sich bereits zu Anfang der Stunde bildet, kann sich nur sehr langsam wieder abbauen. Auch zeigt sich hier, dass es wichtig ist zu beachten, ob die erste oder zweite Hälfte der Stunde die stärkere Belastung aufweist, da sich bei Berechnung nach HBS (2015) dieselben hohen Wartezeiten für die Profiltypen 1 und 2 ergeben, die in starkem Gegensatz zu den Simulationsergebnissen stehen.



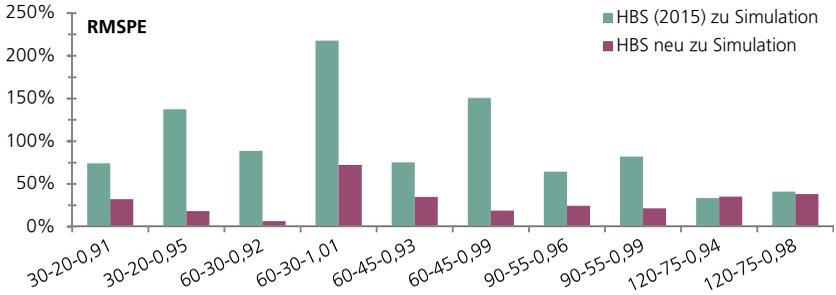
**Abbildung 5-16 RMSPE der berechneten Wartezeiten zu den Verlustzeiten aus der Simulation, über alle Zuflussprofiltypen, nach Szenario**



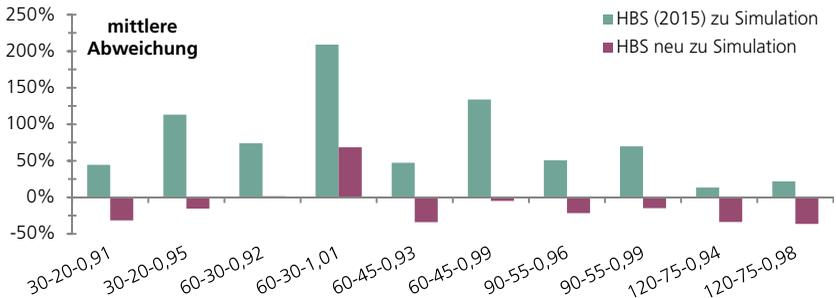
**Abbildung 5-17 Abweichungen der berechneten Wartezeiten zu den Verlustzeiten aus der Simulation, über alle Zuflussprofiltypen, nach Szenario**



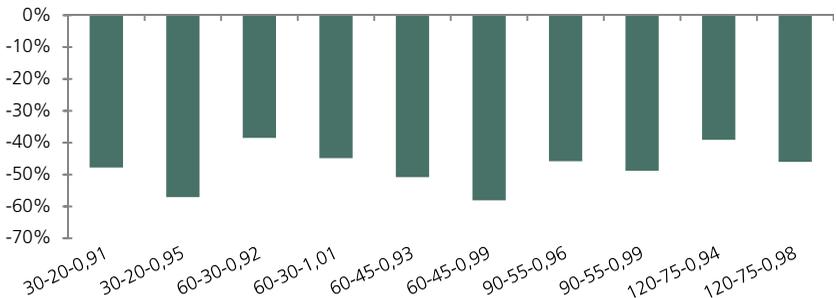
**Abbildung 5-18 Abweichungen der neu berechneten Wartezeiten zu den nach HBS (2015) ermittelten, über alle Zuflussprofiltypen, nach Szenario**



**Abbildung 5-19 RMSPE der berechneten Wartezeiten zu den Verlustzeiten aus der Simulation, über alle PZS-Profile, nach Szenario**



**Abbildung 5-20 Abweichungen der berechneten Wartezeiten zu den Verlustzeiten aus der Simulation, über alle PZS-Profile, nach Szenario**



**Abbildung 5-21 Abweichungen der neu berechneten Wartezeiten zu den nach HBS (2015) ermittelten, über alle PZS-Profile, nach Szenario**

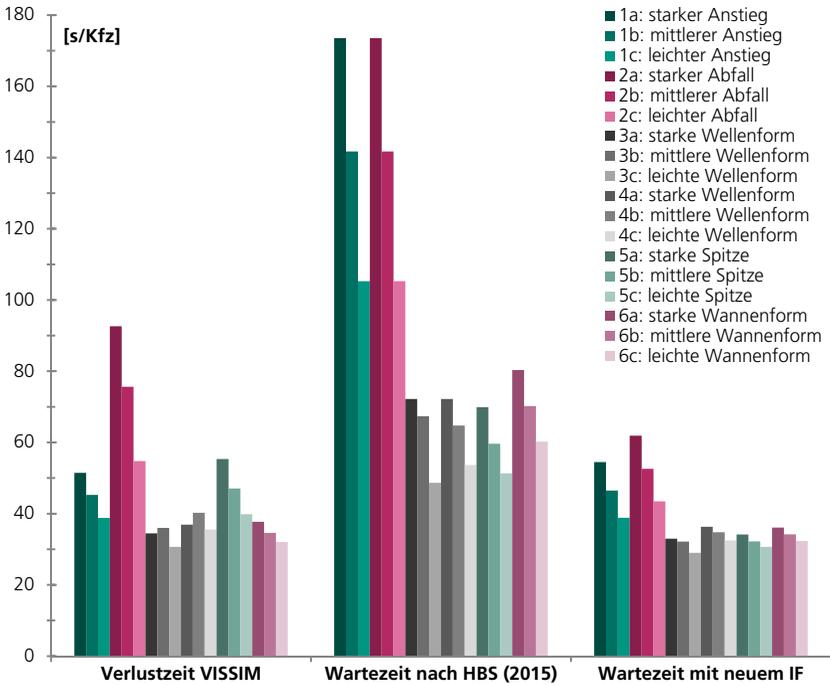


Abbildung 5-22 Mittlere Warte- bzw. Verlustzeiten über die Szenarien, je Zuflussprofiltyp

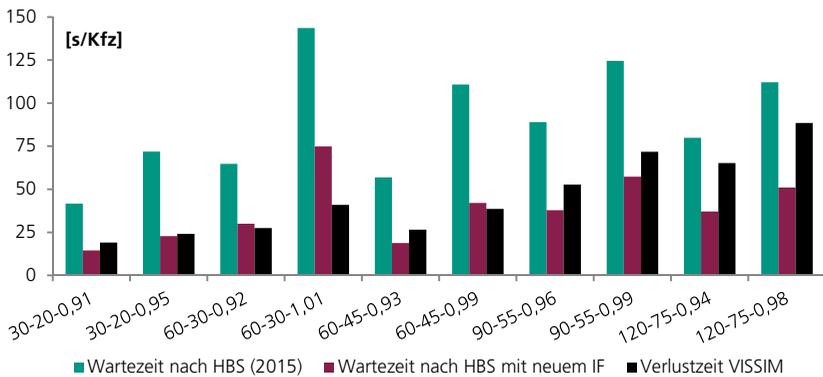
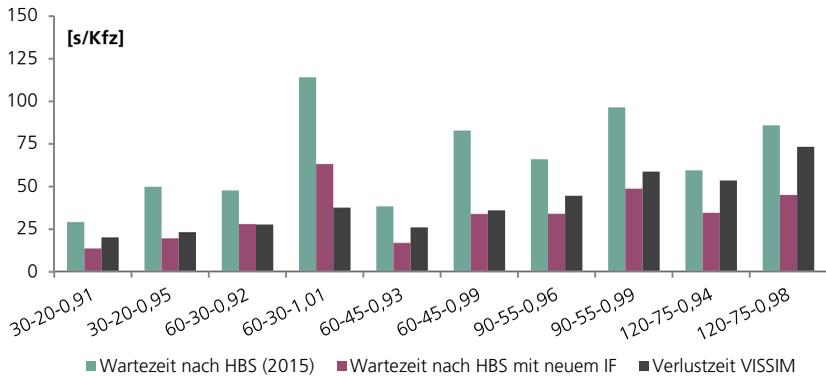


Abbildung 5-23 Mittlere Warte- bzw. Verlustzeiten über die Profiltypen, je Szenario



**Abbildung 5-24 Mittlere Warte- bzw. Verlustzeiten über die PZS-Profile, je Szenario**

Einzelne Diagramme, die die absoluten Verlust- bzw. Wartezeiten, analog zu Abbildung 5-22, je Simulationsszenario enthalten, sind im Anhang ab S. 149 zu finden. Insgesamt ähnelt sich die Struktur der Unterschiede für die Profiltypen und der Einfluss des Auslastungsgrades und der verschiedenen Signalprogramme ist gut zu erkennen.

Die Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und den mittels des neuen Instationaritätsfaktors berechneten Wartezeiten werden stärker mit steigender Umlaufzeit und damit auch absoluter Länge der Freigabe- bzw. Sperrzeit. Je länger die Umlaufzeit, desto größer ist der Anteil der Wartezeit aufgrund des periodischen Wechsels des Signalprogramms. Der damit verringerte Anteil der Wartezeit durch den Rückstau bei Freigabezeitende bedeutet auch einen schwächeren Einfluss des (neuen) Instationaritätsfaktors auf die Gesamtwartezeit. Bei längerer Umlaufzeit steigt die Verlustzeit in VISSIM. Dies könnte sich, zumindest zum Teil, durch das Anfahrverhalten („Verhalten bei Rot-Gelb“) erklären lassen, das in der Standardeinstellung „Fahren wie bei grün“ belassen wurde. Je weniger Umläufe in der simulierten Stunde stattfinden, desto seltener findet auch die sich durch die Einstellung ergebende kleine Zeitspanne „verstecktes Grün“ statt. Besonders stark ausgeprägt sind diese Abweichungen für Zuflussprofiltypen oder PZS-Profile, deren stärkste Belastung in der ersten Hälfte oder der Mitte der betrachteten Stunde auftreten. Für diese Fälle, insbesondere bei hohen Auslastungsgraden

und gleichzeitig langen Umlauf- und Sperrzeiten, zeigt der neue Instationaritätsfaktor eine gewisse Schwäche.

Die allesamt hohen Auslastungsgrade führen eventuell zu einer erhöhten Empfindlichkeit der Wartezeitberechnung, da bereits kleinere Veränderungen der Einflussgrößen einen starken Effekt haben können. Für deutlich geringere Wartezeiten bei niedrigeren Belastungen fallen diese Einflüsse nicht so stark ins Gewicht. Allerdings ist gerade dieser Bereich hoher Auslastungen für die Bewertung der Verkehrsqualität relevant.

Aus diesem Grund erfolgt eine kurze Betrachtung der Elastizität der Wartezeitberechnung nach HBS (2015) für die Einflussgrößen Zufluss (mit direkter Auswirkung auf den Auslastungsgrad), Freigabezeitanteil, Umlaufzeit und Sättigungsverkehrsstärke im stationären Fall. Tabelle 5-8 fasst die Ergebnisse zusammen. Die Elastizität stellt hier dar, um wieviel Prozent sich die Wartezeit für den Ausgangsfall, also das entsprechende Szenario, ändert, wenn eine Einflussgröße um ein Prozent oder einen Prozentpunkt (für den Freigabezeitanteil) steigt. Die anderen Einflussgrößen werden hierbei nicht verändert oder allenfalls angepasst, um eine andere Größe, insbesondere den Auslastungsgrad, konstant zu halten.

**Tabelle 5-8 Elastizitäten von Einflussgrößen auf die Wartezeitberechnung nach HBS (2015)**

Elastizität für:	30-20-0,91	60-45-0,93	90-55-0,99
Zuflussverkehrsstärke	8,22%	10,20%	15,00%
Freigabezeitanteil	-1,04%	-2,22%	-1,80%
Sättigungsverkehrsstärke	-0,70%	-0,63%	-0,42%
Umlaufzeit	0,25%	0,29%	0,24%

Die Ergebnisse bewegen sich für alle drei Szenarien in ähnlichen Größenordnungen. Die Verkehrsstärke im Zufluss bzw. der sich ergebende Auslastungsgrad besitzt den stärksten Einfluss, mit deutlichem Abstand folgt der Freigabezeitanteil. In Bezug auf die Sättigungsverkehrsstärke und die Umlaufzeit verhält sich die Wartezeit nach HBS (2015) für die untersuchten Beispiele sehr wenig elastisch, das heißt die entsprechende Auswirkung ist vergleichsweise gering.

Abbildung 5-25 zeigt für drei der Szenarien die Elastizitätskurven für den Einfluss der Zuflussverkehrsstärke. Die farblich hervorgehobenen Punkte stellen dabei die Ausgangspunkte dar, von denen aus die Zuflussverkehrsstärke unter ceteris paribus Bedingungen erhöht wird. Die Elastizitätskurven für alle untersuchten Größen befinden sich im Anhang ab S. 154.

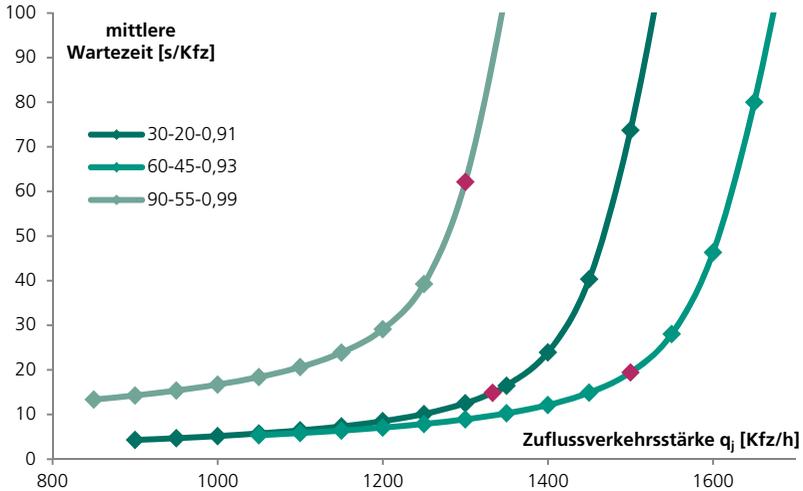


Abbildung 5-25 Elastizitätskurven der Wartezeit nach HBS (2015) in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke des Zuflusses

## 5.7 Aktuelle Forschung zum peak hourly factor

Im Rahmen einer Analyse des Instationaritätsfaktors des HBS (2015) stellt sich unweigerlich die Frage nach vergleichbaren Untersuchungen im Kontext des HBS (2015) oder HCM (2010). Etliche teils sehr aktuelle Studien haben verschiedene Aspekte des PHF, der im HCM (2010) zur Berücksichtigung von Schwankungen der Verkehrsstärke innerhalb der Analyseperiode verwendet wird, zum Thema.

Wie in Kapitel 3.3.3 angesprochen, untersuchen Yi et al. (2009) die Länge des Bezugsintervalls zur Berechnung des PHF hinsichtlich Stabilität und Sensitivität auf Schwankungen im Verkehrsablauf. Sie stellen auf Basis empirischer Daten fest, dass mit größeren Intervallen zur Berechnung eines ‚peak flow factors‘ sich auch dessen Wert erhöht. Als stabil zeigten sich dabei für Knotenpunkte die Intervalle ab 10 Minuten Länge.

Mehrere Studien kritisieren die Verwendung eines einzelnen, feststehenden Wertes für den PHF, wenn keine ausreichenden Daten zur Verfügung stehen. Die Variabilität des Verkehrsaufkommens, also die Instationarität der Verkehrsstärke, sei zu signifikant, als dass der Einsatz von Standardwerten für den PHF zu akzeptieren sei.

Tarko und Perez-Cartagena (2005) untersuchen die Variabilität des PHF in Bezug auf die Zeit und den Ort der Messung. Dabei zeige sich, dass Unterschiede von Tag zu Tag ähnlich stark seien wie Unterschiede durch verschiedene Messstellen. Im Gegensatz dazu werde der PHF häufig anhand einzelner Erhebungswerte berechnet oder ein Standardwert verwendet. Sie entwickeln deshalb ein Modell zur besseren Schätzung, wenn eine ausreichend genaue Messung des Verkehrsaufkommens nicht möglich ist. Die Berechnung des PHF nach Tarko und Perez-Cartagena beinhaltet einen Exponenten in Form einer Linearkombination von Einflussgrößen mit zugehörigen Faktoren. Dabei werden die Tageszeit (morgens oder nachmittags), die Einwohnerzahl und die Verkehrsstärke der Spitzenstunde als relevante Einflussgrößen festgestellt. Die Straßenkategorie habe keine relevante Auswirkung.

Lan und Abia (2011) überprüfen das Modell von Tarko und Perez-Cartagena hinsichtlich Übertragbarkeit auf andere geographische Gebiete und stellen fest, dass dabei aber keine ausreichende Genauigkeit erzielt werden könne. Folglich entwerfen Lan und Abia auf Basis empirischer Daten eine neue Berechnungsmethode in Form einer Potenzfunktion, die den Auslastungsgrad (statt der Spitzenstundenverkehrsstärke) und die Straßenklasse (Hauptverkehrsstraße oder Wohn- und Sammelstraßen) als maßgebende Einflussfaktoren enthält. Die bei Verwendung des so geschätzten PHF berechneten Wartezeiten an Knotenpunkten seien

höher als bei der Berechnung mit dem Standardwert nach dem HCM (2010). Eine Validierung des Modells durch Anwendung auf andere Orte zeige den Autoren zufolge eine akzeptable Erklärungsrate.

Dehman und Drakopoulos (2016) führen ihre Untersuchungen zum PHF in Bezug auf Elemente von Autobahnen durch. Die Relevanz des PHF in verschiedenen Anwendungen stehe im Gegensatz dazu, dass das HCM (2010) keinen Ansatz zur Schätzung des PHF liefere und Standardwerte durch nicht ausreichend große zugrundeliegende Datenmengen zu stark vereinfacht seien. Begründet durch die Auswertung großer Mengen empirischer Daten, werden vor allem die Tageszeit und das LOS (level of service), das sich aus dem Auslastungsgrad und der mittleren Fahrtgeschwindigkeit ergibt, als wichtigste Einflussgrößen auf den PHF identifiziert. Die Autoren schlagen daher vor, statt eines einzelnen PHF eine Reihe verschiedener Werte für unterschiedliche LOS und die beiden Tageshälften zu verwenden.

Das Vorgehen zur Ableitung eines passenderen PHF durch Optimierung anhand einer Datenbasis in den Studien von Tarko und Perez-Cartagena sowie Lan und Abia ähnelt der in dieser Arbeit durchgeführten Entwicklung eines neuen Instationaritätsfaktors. Im Gegensatz zur Verwendung empirischer Daten erfolgte die Anpassung hier auf Basis von Simulationsergebnissen. Auch die Identifikation des Auslastungsgrades (oder zumindest der Verkehrsstärke) bzw. des darauf basierenden LOS als wichtige Einflussgröße deckt sich mit Erkenntnissen dieser Arbeit.

## **5.8 Zusammenfassung**

Bei der Modellierung von Instationarität im Zufluss an eine Lichtsignalanlage fallen die nach HBS (2015) berechneten Wartezeiten für einzelne Szenarien im Mittel höher aus als die durch Simulation ermittelten Verlustzeiten. Zwischen den verschiedenen Zuflussprofiltypen zeigen sich hierbei jedoch starke Unterschiede. Besonders für die Profiltypen mit stark asymmetrischen Verkehrsstärkeverläufen betragen die Abweichungen teilweise 250% und mehr. Je mehr ein Profiltyp einer

Parabel ähnelt bzw. je symmetrischer die Ganglinie ist, desto kleiner sind die Unterschiede zwischen den Simulationsergebnissen und der Berechnung nach HBS (2015).

Doch nicht nur die konkrete Form der Instationarität und ihr Ausmaß, dargestellt durch das Verhältnis des höchstbelasteten 15-Minuten-Intervalls zur stündlichen Verkehrsstärke, haben Einfluss auf die Höhe der Warte- und Verlustzeit. Der Auslastungsgrad und die Charakteristik des Signalprogramms zeigen ebenfalls einen möglichen Effekt auf die Ergebnisse.

Davon ausgehend ergeben sich mögliche Varianten zum Aufbau eines neuen Faktors zur genaueren Berücksichtigung der Instationarität bei der Wartezeitberechnung mit dem Verfahren des HBS (2015). Eine Validierung erfolgt durch Anwendung dieser verschiedenen Varianten auf die Realdaten und Vergleich der resultierenden Abweichungen zwischen den neu berechneten Wartezeiten und den Verlustzeiten aus der Simulation. Die Kombination aus Parametern für das Verhältnis der Verkehrsstärke des höchstbelasteten 15-Minuten-Intervalls und der gesamten Stunde, für die Angabe, welche Stundenhälfte die höhere Belastung aufweist, sowie für den Auslastungsgrad liefert dabei die besten Ergebnisse.

Werden die Wartezeiten mithilfe des neuen Instationaritätsfaktors berechnet, ergeben sich sowohl für die Profiltypen als auch für die Zuflussprofile der Realdaten geringere Abweichungen von den Simulationsergebnissen als bei der Verwendung des ursprünglichen Instationaritätsfaktors nach HBS (2015). Auch die Spanne der Unterschiede zwischen den einzelnen Profiltypen verringert sich deutlich, so dass tatsächlich von einer Kompensation des Einflusses der verschiedenen Formen der Instationarität ausgegangen werden kann.

Teilweise liefert die Berechnung mittels des neuen Instationaritätsfaktors aber auch Wartezeiten, die niedriger ausfallen als die entsprechenden Verlustzeiten aus der Simulation. Dieser zeigt somit eine Schwäche für sehr hohe Auslastungsgrade und lange Umlaufzeiten, insbesondere für Verkehrsstärkeverläufe mit den höchsten Werten zu Beginn oder in der Mitte der Stunde. Der Grund hierfür liegt teilweise in Einstellungen des Simulationsmodells und einer möglichen Auswirkung des Freigabezeitanteils und der Länge der Umlaufzeit begründet. Für den

Freigabezeitanteil kann ein Einfluss durch Berechnung der Elastizität bestätigt werden, wenngleich sich der Effekt des Auslastungsgrades im Vergleich deutlicher zeigt.

Die Relevanz des Auslastungsgrades bei der Berücksichtigung von Verkehrsstärkeschwankungen im Rahmen der Wartezeitberechnung wird ebenfalls durch Studien zum peak hourly factor des HCM (2010) festgestellt. Dabei werden, ähnlich wie in dieser Arbeit, von mehreren Autoren Verbesserungen des PHF durch Berücksichtigung mehrerer Eigenschaften oder Rahmenbedingungen des Fahrzeugzuflusses vorgeschlagen.

Grundsätzlich ist bei der Entwicklung des neuen Instationaritätsfaktors und der verwendeten Methodik zu beachten, dass es sich um eine Laborumgebung handelt. Eine Spitzenstunde, die von unbelasteten Zeiträumen davor und danach umschlossen wird, stellt zwar die Rahmenbedingung für das Berechnungsverfahren dar, entspricht aber sicher nicht der Realität. Das heißt, dass, gerade bei Zuflüssen mit über die Stunde hin ansteigenden Profilen, von einer Auswirkung durch Reststau auf die Zeitintervalle unmittelbar nach dem Ende der betrachteten Stunde ausgegangen werden muss.

Zusammenfassend ist trotz der möglichen Schwächen in der Methodik eine Berechnung der Wartezeit mithilfe des neuen Instationaritätsfaktors in der Lage, verschiedene Arten von Instationarität der Zuflussverkehrsstärke zu berücksichtigen und damit zu genaueren Ergebnissen zu führen.



# 6 INSTATIONARITÄT AN VORFAHRT-GEREGELTEN KNOTENPUNKTEN

## 6.1 Simulationsmodell und Kalibrierung

Die Modellierung eines vorfahrtgeregelten Knotenpunkts zur Untersuchung des Einflusses von Instationarität ist ungleich komplexer als die Modellierung im signalgeregelten Fall, für den sich ein sehr vereinfachtes Modell erstellen lässt. Dabei ergibt sich die Frage, anhand welcher Größen überhaupt eine Kalibrierung erfolgen kann und wie eine Testumgebung auszusehen hat. Es wurde die gleiche Software verwendet wie zu Anfang von Kapitel 5 beschrieben.

### 6.1.1 Aufbau und Kalibrierung des VISSIM-Modells

Analog zur Simulation von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage, ist das Modell in VISSIM möglichst simpel aufgebaut. Eine einfache Einmündung einer einstreifigen Strecke an eine ebenfalls einstreifige Strecke mit Zuflüssen aus 100% Pkw stellt die Umgebung für die Laboruntersuchung am vorfahrtgeregelten Knotenpunkt dar. Ein Simulationslauf hat auch für diesen Fall eine Dauer von 5400 Sekunden und es wird über 10 Simulationsläufe mit verschiedenen Startzufallszahlen gemittelt.

Für die Regelung der Vorfahrt wird im VISSIM-Modell eine Konfliktfläche verwendet. Die Besonderheit einer Konfliktfläche ist, dass Fahrzeuge diese Art der Vorfahrtregelung nicht erst dann wahrnehmen oder erkennen, wenn sie am Knotenpunkt angelangt sind, sondern bereits im Voraus einen Plan entwickeln, wie auf den bevorrechtigten Hauptstrom reagiert werden soll, und entsprechend ihr Fahrverhalten anpassen. Über verschiedene Parameter lässt sich unter anderem darauf Einfluss nehmen, welche Lücken im bevorrechtigten Strom von Fahrzeugen des wartepflichtigen Stroms akzeptiert werden und aus welcher

Entfernung ein sich näherndes Fahrzeug die Fahrzeuge auf der anderen Strecke wahrnehmen kann. (vgl. PTV AG, 2015)

Eine Kalibrierung des Simulationsmodells auf der Basis von Wartezeit bei stationärem Zufluss ist hier nicht der optimale Weg. Da die Berechnung der Wartezeit für Fahrzeuge im Nebenstrom deutlich stärker auf stochastischen Modellen beruht als im Fall mit Lichtsignalanlage, stellt diese für vorfahrtsregelte Knotenpunkte eine weniger geeignete Kalibrierungsgröße dar. Das Verfahren zur Berechnung der Wartezeit im HBS (2015) baut auf der Grundkapazität des nachgeordneten Stroms auf. Diese (vgl. Gleichung 2-3) ist determiniert durch die Verkehrsstärke der maßgebenden Hauptströme und deren negativ exponentialverteilte Zeitlücken sowie die Interaktion zwischen Haupt- und Nebenstrom, repräsentiert durch Grenz- und Folgezeitlücke. Demnach stellen genau diese die relevanten Größen für die Kalibrierung dar, die auf eine Reproduktion der Grundkapazitätskurve nach dem HBS (2015) abzielt.

Um eine vergleichbare Kurve zu generieren, wurde der Zufluss des Nebenstroms auf einen Wert von 1400 Kfz/h, also größer als die zu erwartende Kapazität ohne Einfluss des Hauptstroms, fixiert. Damit ist gewährleistet, dass zu jeder Zeit Fahrzeuge im Nebenstrom warten. Die Belastung des Hauptstroms wurde dann in einzelnen Simulationsläufen über die Dauer einer Stunde (inklusive Vor- und Nachlauf) in einzelnen Schritten bis zu einer Höhe von 1800 Kfz/h gesteigert. Die Anzahl der eingefahrenen Fahrzeuge wurde über die Auswertung von Verlustzeitmessungen erfasst. Erste Simulationen mit den VISSIM Standardparametern des Wiedemann-99-Modells für das Fahrverhalten aller Fahrzeuge führten zu Kurven, die weit entfernt von der Kurve der Grundkapazität nach HBS (2015) liegen. Daher mussten die Parameter in VISSIM gefunden werden, die die Charakteristik der Kurve beeinflussen.

Für die Streckenkapazität im Hauptstrom ist recht offensichtlich der Parameter für den zeitlichen Abstand (CC1) des Fahrverhaltens maßgeblich. Eine Verringerung der Spannweite der Wunschgeschwindigkeitsverteilung verhinderte durch eine Harmonisierung der Geschwindigkeiten die Pulkung von Fahrzeugen im Hauptstrom. Dennoch blieb ein größerer Unterschied in der Höhe der Mindest-

zeitlücke bestehen, der sich nur durch einen zweiten Zufluss in Form einer zusätzlichen kurzen Strecke zu Beginn der Strecke des Hauptstroms, ohne Vorfahrtsregelung, der zu kürzeren ‚Startzeitlücken‘ führt, verringern ließ. Das Ergebnis dieses ersten Kalibrierungsschritts zeigt die Kurve ‚Schritt 1‘ in Abbildung 6-1. Die Einflussgröße für die Kapazität des Nebenstroms ohne Belastung im Hauptstrom, also quasi die Folgezeitlücke, ist mit der Einstellung der Konfliktfläche hinsichtlich der Sichtbarkeit für die Strecke des einbiegenden Stroms nicht ganz offensichtlich. Abbildung 6-2 zeigt, wie sich verschiedene Einstellungen von CC1 und der Sichtbarkeit auf die maximale Kapazität des einbiegenden Stroms ohne Belastung der bevorrechtigten Strecke auswirken. Die Kurve für ‚Schritt 2‘ in Abbildung 6-1 zeigt den Effekt des optimalen Werts.

Die Grenzzeitlücke, die sich auf die Krümmung der Grundkapazitätskurve auswirkt, lässt sich in VISSIM ebenfalls nicht direkt einstellen, doch auch dabei sind die Parameter der Konfliktfläche maßgebend. Die ‚Lücke vorn‘ gibt an, wie bald ein Fahrzeug der nachrangigen Strecke in den Bereich der Konfliktfläche einfährt, nachdem ein Fahrzeug auf der bevorrechtigten Strecke diese durchfahren hat. Der ‚Faktor Sicherheitsabstand‘ stellt die zeitliche Restlücke dar, die nach dem Einfahren eines Fahrzeugs aus dem Nebenstrom zum folgenden Fahrzeug im Hauptstrom noch vorhanden sein muss, damit das einfahrende Fahrzeug bereit ist, die gesamte Zeitlücke zu akzeptieren. Die ‚Lücke vorn‘ konnte in ihrer Standardeinstellung belassen werden, der ‚Faktor Sicherheitsabstand‘ wurde verändert.

Die eng gepunktete Kurve in Abbildung 6-1, die sehr gut zur Grundkapazitätskurve nach HBS (2015) passt, repräsentiert das kalibrierte Modell. Die dabei veränderten Parameter sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst.

**Tabelle 6-1 Eingestellte Parameter des kalibrierten Fahrverhaltens bei Vorfahrtregelung**

	VISSIM default	kalibriert
Fahrverhalten Wiedemann 99: Folgeabstand CC1	0,9 s	0,6 s
Spannweite der Wunschgeschwindigkeitsverteilung '50 km/h'	48,0-58,0 km/h	50,00-50,01 km/h
Einstellungen der Konfliktfläche		
- Sichtbarkeit der Strecke 1	100 m	3,6 m
- Faktor Sicherheitsabstand	1,5	3,2

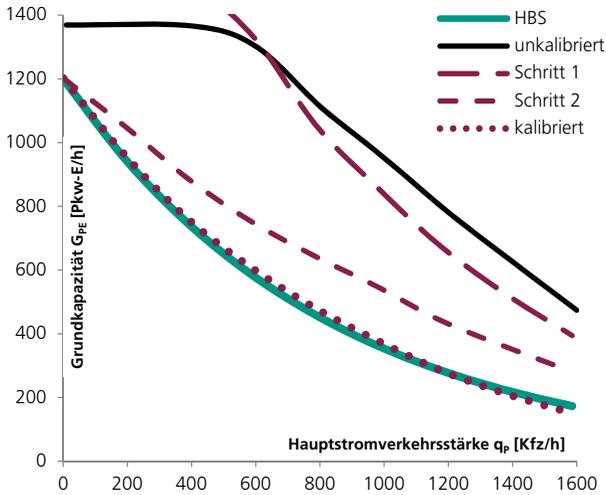


Abbildung 6-1 Grundkapazitätskurven verschiedener Kalibrierungsschritte im Vergleich zur Kurve nach HBS (2015)

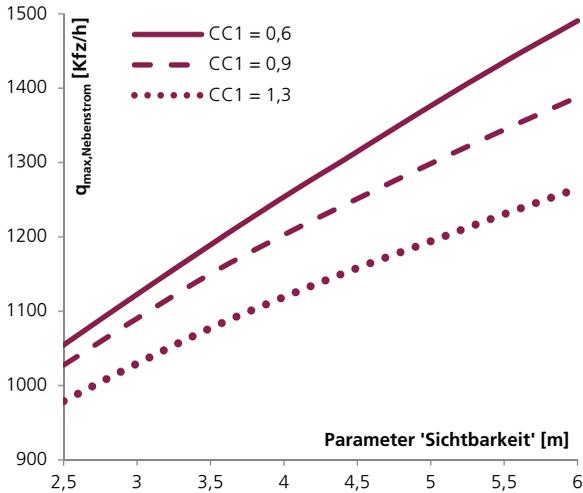


Abbildung 6-2 Maximale Kapazität des einbiegenden Stroms in Abhängigkeit vom Folgeabstand  $CC1$  und der Einstellung der Konfliktfläche ‚Sichtbarkeit‘ der Strecke

## **6.1.2 Modellierung der Instationarität**

Nicht nur die Erstellung eines Simulationsmodells ist für einen Knotenpunkt ohne Lichtsignalanlage komplexer als für einen Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage. Zur Untersuchung der Auswirkungen von Instationarität im Hauptstrom oder im Nebenstrom und schließlich der Kombination beider Fälle müssen verschiedene Szenarien definiert werden.

### **6.1.2.1 Instationarität im Hauptstrom**

Eine Untersuchung von Instationarität im Hauptstrom ist mit dem für die Kalibrierung verwendeten Modell und den Einstellungen für die Zuflüsse ohne größere Anpassungen umsetzbar. Die sich dabei ergebenden Kurven für die Kapazität des Nebenstroms können direkt miteinander verglichen werden, um zu bestimmen, wie sich Instationarität im Hauptstrom auf die Anzahl an Fahrzeugen aus dem Nebenstrom, die in der betrachteten Stunde in den Hauptstrom einfahren können, auswirkt.

Zur Modellierung der Instationarität werden die in Kapitel 4.2 vorgestellten Zuflussprofiltypen 1a (starker Anstieg), 2a (starker Abfall), 5a (starke Spitze) und 6a (starke Wannenförmigkeit) verwendet. Das für die Kalibrierung entworfene Szenario mit einer Steigerung des Hauptstromzuflusses in einzelnen Simulationsläufen von knapp über null bis 1800 Kfz/h bei kontinuierlichem, hohem Zufluss im Nebenstrom wird so adaptiert, dass der Zufluss innerhalb der jeweiligen Stunde den verschiedenen Profiltypen folgt, die auf den entsprechenden Gesamtzufluss pro Stunde umgerechnet sind.

### **6.1.2.2 Instationarität im Nebenstrom**

Für die Analyse der Auswirkungen instationären Zuflusses im Nebenstrom muss das bisher verwendete Szenario modifiziert werden. Ein dauerhaft starker Zufluss im Nebenstrom zur Aufrechterhaltung einer Warteschlange eignet sich nicht zur Erfassung des Einflusses von Instationarität in diesem Strom. Es kann davon ausgegangen werden, dass die sich dabei ergebenden langen Warteschlangen zu-

mindest einen Teil des Einflusses gewissermaßen neutralisieren. Somit können Grundkapazitätskurven weder abgeleitet noch miteinander verglichen werden.

Stattdessen werden die Verlustzeiten aus der Simulation zur Untersuchung verwendet. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass nur ein indirekter Vergleich der Verlustzeiten verschiedener Szenarien miteinander möglich ist, nicht aber ein Vergleich zu den Wartezeiten nach HBS (2015). Der Grund liegt darin, dass nicht feststeht, ob die sich ergebenden Zeiten die gleichen Komponenten beinhalten.

Der Zufluss des Nebenstroms muss also durch eine realistische stündliche Verkehrsstärke ersetzt werden. Mehrere Fälle werden durch verschieden hohe Auslastungsgrade (100%, 75% und 50% Auslastung sowie Überlastung bei 110%) unterschieden. Der Gesamtzufluss pro Stunde ergibt sich dabei durch die Grundkapazität des Nebenstroms bei der entsprechenden Hauptstrombelastung. Im Fall von 100% liegen die sich ergebenden Kombinationen von Haupt- und Nebenstromzufluss also genau auf der Grundkapazitätskurve, für 75% und 50% Auslastung wird die Verkehrsstärke für den Nebenstrom entsprechend verringert und für 110% erhöht. Außerdem erfolgt eine Umrechnung der Fahrzeugzuflüsse auf die einzelnen Profiltypen.

### **6.1.2.3 Instationarität im Hauptstrom und im Nebenstrom**

Für diesen Fall werden alle Zuflussprofiltypen, sowohl im Haupt- als auch im Nebenstrom, miteinander kombiniert als Zuflüsse im VISSIM-Modell verwendet und die jeweiligen Simulationsergebnisse in Form der Verlustzeiten mit den Ergebnissen des Szenarios mit stationären Zuflüssen in beiden Strömen verglichen. Für den Hauptstrom werden also die genannten Zuflussprofiltypen eingesetzt, und dessen Auslastung nach dem beschriebenen Verfahren gesteigert. Im Nebenstrom werden die Profiltypen in dieser Variante ebenfalls verwendet, zusätzlich zu den vier verschiedenen Auslastungsgraden.

Auch in diesem Fall ist davon auszugehen, dass lediglich relative Aussagen über Unterschiede innerhalb der verschiedenen Szenarien zueinander als gegenüber dem HBS (2015) möglich sind.

## 6.2 Auswertung der Simulationsergebnisse

### 6.2.1 Instationarität im Hauptstrom

Die Modellierung von Instationarität durch verschiedene Profiltypen im Hauptstrom zeigt eine minimale Auswirkung auf die stündliche Grundkapazität des Nebenstroms. Die in Abbildung 6-3 gemeinsam dargestellten Kurven liegen nahezu deckungsgleich aufeinander, einzig im Bereich sehr starker Hauptstrombelastungen zeigen sich Unterschiede. Der RMSPE (vgl. Gleichung 5-1) schwankt dabei von etwa 6% (Profiltyp Anstieg) bis 14% (Profiltyp konstant). Berücksichtigt man nur den Bereich bis zu einer Belastung von 1200 Kfz/h im Hauptstrom, bevor sich die Kurven der Simulationsergebnisse stärker von der Kurve nach HBS (2015) entfernen, so weichen diese nur noch zwischen circa 1% und 3% ab. Tabelle 6-2 fasst die Ergebnisse zusammen.

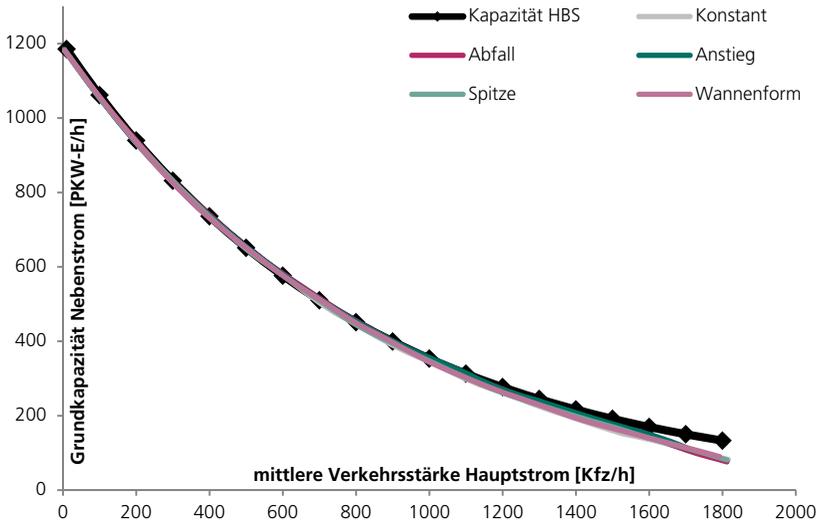
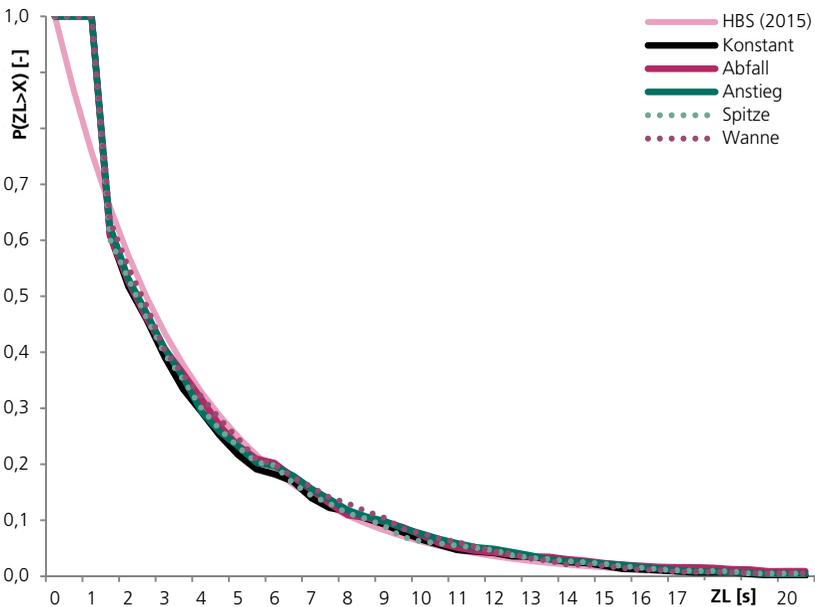


Abbildung 6-3 Kurven der sich aus den Simulationsergebnissen ergebenden Grundkapazitäten für die verschiedenen Zuflussprofiltypen im Hauptstrom

**Tabelle 6-2 Abweichungen der aus den Simulationsergebnissen berechneten Grundkapazitätskurven zur Grundkapazitätskurve nach HBS (2015) je Zuflussprofiltyp**

		konstant	Abfall	Anstieg	Spitze	Wanne
gesamt	RMSE	23,23	19,87	9,96	20,98	17,60
	RMSPE	14%	13%	6%	13%	11%
HS bis 1600 Kfz/h	RMSE	16,51	8,76	5,40	12,91	11,63
	RMSPE	9%	6%	3%	7%	6%
HS bis 1200 Kfz/h	RMSE	10,99	3,64	4,30	8,91	6,55
	RMSPE	3%	1%	1%	3%	2%

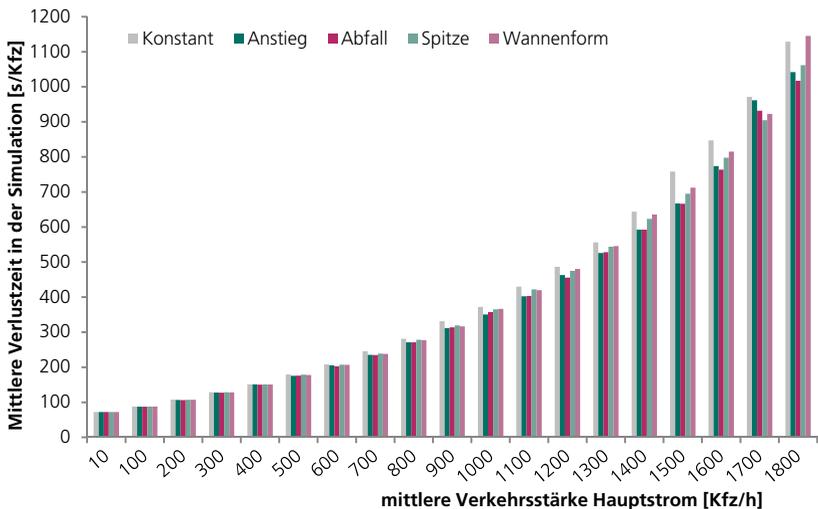
Vergleicht man zur Verifizierung dieser Ergebnisse die Zeitlückenverteilungen mit der negativen Exponentialverteilung nach HBS (2015) in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke für den beispielhaften Fall bei einer Belastung von 1000 Kfz/h, liegen diese ebenfalls sehr nah beieinander.



**Abbildung 6-4 Zeitlückenverteilung des Hauptstroms bei 1000 Kfz/h für die verschiedenen Zuflussprofiltypen im Vergleich zur theoretischen Annahme des HBS (2015)**

Abbildung 6-4 zeigt die Zeitlückenverteilungen für Stationarität und die verschiedenen Zuflussprofiltypen im Hauptstrom aus der Simulation sowie die theoretische Annahme. Auch hier ist kein wesentlicher Einfluss der Instationarität zu erkennen.

Bei der Betrachtung der sich für die Fahrzeuge im Nebenstrom ergebenden Verlustzeiten, relativ zum Fall konstanten Zuflusses im Hauptstrom, zeigt sich ein ähnlich homogenes Bild. Die absoluten Zahlen sind hierbei weniger relevant, da mit einem stetig hohen Zufluss im Nebenstrom simuliert wurde, der zu sehr hohen Verlustzeiten durch beabsichtigt lange Warteschlangen führt. Die Werte liegen ebenfalls nah beieinander, vor allem für Hauptstrombelastungen unterhalb von 1200 Kfz/h (siehe Abbildung 6-5). Die Abweichungen der Ergebnisse der verschiedenen Profiltypen im Vergleich zum stationären Fall sind zusätzlich in Tabelle 6-3 gegeben.



**Abbildung 6-5** Mittlere Verlustzeiten aus der Simulation für die verschiedenen Zuflussprofiltypen des Hauptstroms im Vergleich

**Tabelle 6-3 Abweichungen verschiedener Zuflussprofiltypen im Hauptstrom auf Basis der Ergebnisse konstanten Zuflusses**

q60 HS [Kfz/h]	Verlustzeit ,konstant' [s/Kfz]	Abweichung zu ,konstant'			
		Abfall	Anstieg	Spitze	Wanne
10	72,30	0,0%	-0,2%	0,0%	0,1%
100	88,09	-0,6%	-1,0%	-0,5%	-0,4%
200	107,67	-1,5%	-0,9%	-0,4%	-0,3%
300	128,92	-1,2%	-0,9%	-0,2%	-0,3%
400	151,19	-0,7%	0,1%	0,1%	-0,1%
500	179,33	-1,9%	-2,0%	-0,4%	-0,8%
600	208,10	-2,6%	-1,4%	-0,3%	-0,7%
700	245,66	-4,3%	-4,2%	-2,7%	-3,1%
800	281,38	-3,7%	-3,7%	-1,0%	-1,5%
900	331,39	-5,3%	-6,0%	-3,7%	-4,5%
1000	372,10	-3,9%	-5,7%	-1,9%	-1,5%
1100	430,16	-6,2%	-6,5%	-1,8%	-2,4%
1200	486,30	-6,3%	-4,8%	-2,4%	-1,2%
1300	556,39	-5,0%	-5,5%	-2,3%	-1,9%
1400	643,77	-7,9%	-7,9%	-3,2%	-1,2%
1500	758,32	-12,1%	-12,0%	-8,4%	-6,1%
1600	847,46	-9,9%	-8,7%	-5,9%	-3,8%
1700	971,14	-4,1%	-1,0%	-6,9%	-5,0%
1800	1128,64	-9,9%	-7,7%	-5,9%	1,5%
Quadratsumme		6%	5%	2%	1%
bis 1600 Kfz/h im HS		5%	5%	2%	1%
bis 1200 Kfz/h im HS		2%	2%	0%	0%

### 6.2.2 Instationärer Zufluss im Nebenstrom bei konstantem Zufluss im Hauptstrom

Wird bei stationärem Zufluss im Hauptstrom mithilfe der Profiltypen der Zufluss des Nebenstroms als instationär modelliert, ergeben sich die in Tabelle 6-4 zusammengefassten Ergebnisse. Der Zuflussprofiltyp Wanne zeigt die insgesamt geringsten Abweichungen gegenüber einem konstanten Zufluss im Nebenstrom, vor allem bei weniger hoher Auslastung. Die anderen Profiltypen weichen in dem Fall ähnlich stark ab. Im Fall der vollen Auslastung von 100% zeigt der abfallende

Profiltyp einen deutlicheren Unterschied als die anderen Profiltypen. Anders als die graphischen Darstellungen in Abbildung 6-6 und Abbildung 6-7 vermuten lassen, ist es hierbei kaum relevant, ob die komplette Spanne der Hauptstrombelastungen (bis 1800 Kfz/h) oder nur der Bereich bis 1200 Kfz/h betrachtet wird. Dies trifft insbesondere bei höherer Auslastung zu.

**Tabelle 6-4 RMSPE der einzelnen Abweichungen zwischen den Verlustzeiten der Zuflussprofiltypen und dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses**

Auslastung	HS berücksichtigt bis [Kfz/h]	Abweichungen zu Konstant (RMSPE)			
		Abfall	Anstieg	Spitze	Wanne
50%	1200	9%	7%	7%	3%
50%	1800	8%	10%	8%	5%
75%	1200	35%	45%	34%	8%
75%	1800	39%	38%	30%	8%
100%	1200	59%	10%	18%	10%
100%	1800	52%	14%	15%	9%
110%	1200	25%	24%	4%	5%
110%	1800	25%	23%	4%	4%

**Tabelle 6-5 RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten aus der Simulation gegenüber der nach HBS berechneten Wartezeiten**

Auslastung	HS berücksichtigt bis [Kfz/h]	Abweichungen (RMSPE)				
		konstant	Abfall	Anstieg	Spitze	Wanne
50%	1200	20%	29%	28%	29%	19%
50%	1800	97%	108%	109%	106%	87%
75%	1200	27%	60%	60%	58%	19%
75%	1800	126%	203%	120%	158%	115%
100%	1200	28%	66%	23%	33%	21%
100%	1800	74%	116%	50%	78%	69%
110%	1200	42%	38%	53%	43%	40%
110%	1800	50%	63%	49%	51%	49%

Vergleicht man hingegen die per HBS (2015) berechneten Wartezeiten und die Verlustzeiten aus der Simulation (siehe Tabelle 6-5) direkt miteinander, zeigt sich ein deutlicher Unterschied hinsichtlich der berücksichtigten Hauptstrombelastungen. Wie in Kapitel 6.1.2 begründet, ist ein direkter Vergleich der absoluten

Werte nicht zielführend. Ein Vergleich der Abweichungen untereinander liefert jedoch interpretierbare Ergebnisse.

Im nicht überlasteten Zustand sind, unabhängig von der Auslastung, die Differenzen über die gesamte Grundkapazitätskurve sehr viel größer als bis zu einer Hauptstrombelastung von 1200 Kfz/h. Das bedeutet, dass bei hohen Hauptstrombelastungen die Instationarität im Nebenstrom stark an Bedeutung verliert.

Ein weiterer interessanter Aspekt in Abbildung 6-9 sind die Differenzen zwischen den Wartezeiten nach HBS (2015) und den VISSIM-Verlustzeiten bei der Überlastung von 110%. Für niedrige Hauptstrombelastungen liegen die Wartezeiten dabei deutlich oberhalb der Verlustzeiten, bei hohen Hauptstrombelastungen, wie in allen anderen Belastungsszenarien, unterhalb. Vermutlich wirkt sich in der Berechnung nach HBS (2015) der Auslastungsgrad je nach Hauptstrombelastung unterschiedlich stark aus. Auch im Fall von 100% Auslastung in Abbildung 6-8 zeigt sich diese Tendenz bei sehr geringen Hauptstrombelastungen bereits.

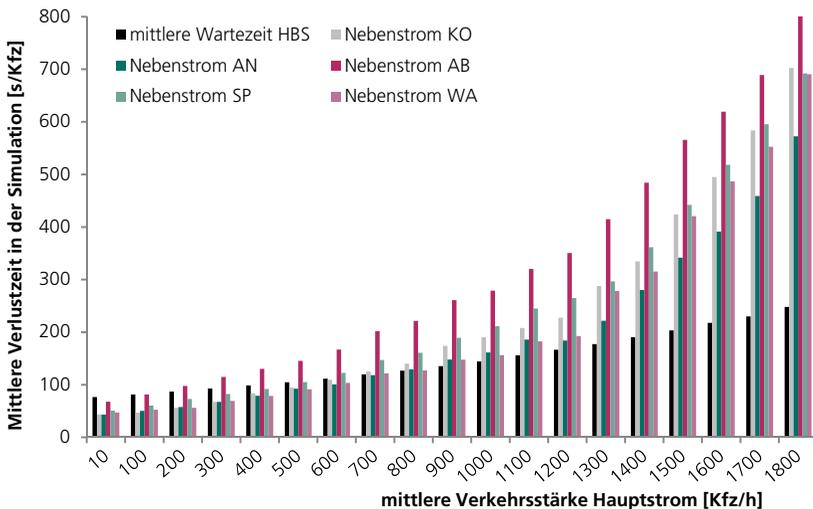


Abbildung 6-6 Instationarität im Nebenstrom, 100% Auslastung, HS konstant

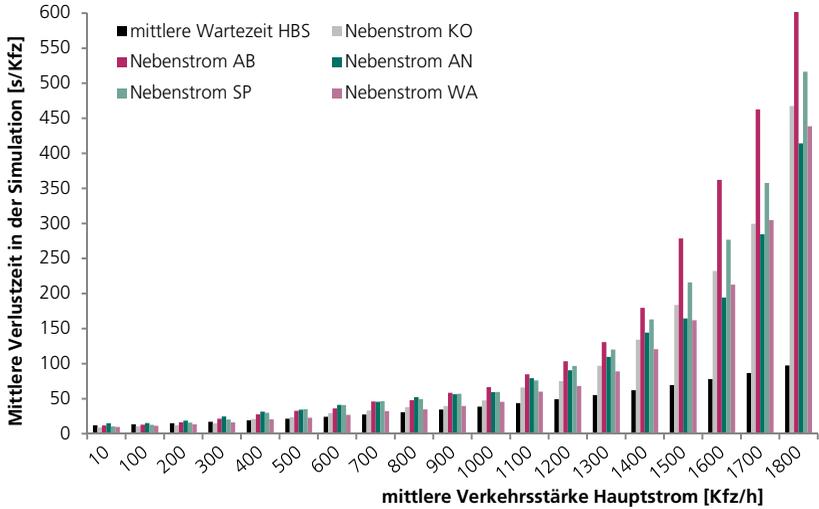


Abbildung 6-7 Instationarität im Nebenstrom, 75% Auslastung, HS konstant

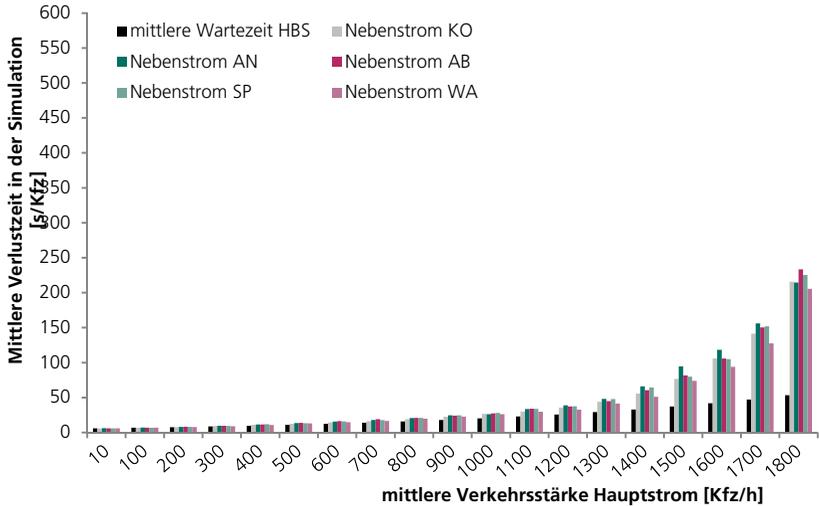


Abbildung 6-8 Instationarität im Nebenstrom, 50% Auslastung, HS konstant

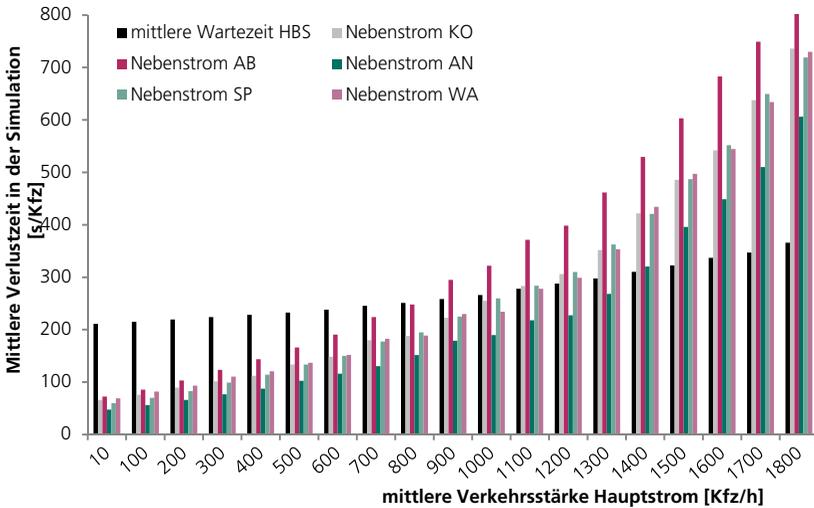


Abbildung 6-9 Instationarität im Nebenstrom, 110% Auslastung, HS konstant

### 6.2.3 Instationarität im Hauptstrom und im Nebenstrom

Die Simulation beider Ströme mit den verschiedenen Profilen und zusätzlich verschieden hohen Auslastungsgraden für den Nebenstrom vervielfacht die Anzahl der Einzelergebnisse. Die verschiedenen Varianten, je nach Auslastungsgrad des Nebenstroms und dem Wert der Hauptstrombelastung, bis zu dem die Ergebnisse für die Berechnung des RMSPE verwendet werden, befinden sich in Tabelle 6-6 bis Tabelle 6-13. Der RMSPE berechnet sich dabei jeweils zwischen den Verlustzeiten der entsprechenden Kombination der Zuflussprofiltypen und den Verlustzeiten im stationären Fall für Haupt- und Nebenstrom. Die Abweichungen sind mit farblicher Abstufung von dunkel für hohe und hell für niedrige Werte pro Tabelle dargestellt.

Tabelle 6-6 bis Tabelle 6-13:

RMSPE in % zwischen den Verlustzeiten je Profiltyp-Kombination und den Verlustzeiten im stationären Fall, je nach Auslastung des Nebenstroms, berechnet bis zur angegebenen Hauptstrombelastung von 1200 oder 1800 Kfz

Tabelle 6-6 100% Ausl. bis 1200 Kfz/h

HS / NS	KO	AB	AN	SP	WA
KO		59	10	18	10
AB	41	78	9	39	43
AN	9	37	5	16	25
SP	10	58	9	28	9
WA	11	56	24	13	11

Tabelle 6-7 50% Ausl. bis 1200 Kfz/h

HS / NS	KO	AB	AN	SP	WA
KO		9	7	7	3
AB	22	86	3	20	34
AN	32	9	68	32	26
SP	18	22	21	36	3
WA	3	14	9	4	10

Tabelle 6-8 75% Ausl. bis 1200 Kfz/h

HS / NS	KO	AB	AN	SP	WA
KO		35	45	34	8
AB	65	257	23	70	89
AN	37	12	125	72	32
SP	33	54	70	103	9
WA	5	63	45	11	21

Tabelle 6-9 110% Ausl. bis 1200 Kfz/h

HS / NS	KO	AB	AN	SP	WA
KO		25	24	4	5
AB	19	30	20	15	23
AN	19	14	21	8	28
SP	2	23	17	5	5
WA	5	25	34	6	6

Tabelle 6-10 100% Ausl. bis 1800 Kfz/h

HS / NS	KO	AB	AN	SP	WA
KO		52	14	15	9
AB	43	73	16	41	46
AN	14	34	10	15	28
SP	10	50	8	25	8
WA	13	48	29	14	12

Tabelle 6-11 50% Ausl. bis 1800 Kfz/h

HS / NS	KO	AB	AN	SP	WA
KO		8	10	8	5
AB	160	236	113	157	166
AN	58	23	101	62	51
SP	39	36	47	63	16
WA	4	19	10	8	13

Tabelle 6-12 75% Ausl. bis 1800 Kfz/h

HS / NS	KO	AB	AN	SP	WA
KO		39	38	30	8
AB	107	252	57	108	120
AN	35	11	108	67	28
SP	41	63	67	99	16
WA	7	56	39	12	18

Tabelle 6-13 110% Ausl. bis 1800 Kfz/h

HS / NS	KO	AB	AN	SP	WA
KO		25	23	4	4
AB	23	33	19	20	26
AN	22	19	21	12	31
SP	2	21	15	5	5
WA	6	24	34	7	6

Die Varianten mit 75% Auslastung weisen mit Werten des RMSPE zwischen 9% und 257% die stärksten Streuungen auf. Im Gegensatz dazu zeigen die mit 50% wenig ausgelasteten Fälle sowie die Szenarien mit Überlastung von 110% die geringsten Streuungen. Auch fällt bei diesen Ergebnissen weniger stark ins Gewicht, ob die gesamte Spannweite der Hauptstrombelastungen bis 1800 Kfz/h oder nur bis zu einem Wert von 1200 Kfz/h für die Berechnung verwendet wird.

Die Diagramme in Abbildung 6-10 bis Abbildung 6-13 zeigen die Abweichungen der verschiedenen Kombinationen für die Variante mit Nebenstromauslastung von 100% in graphischer Form.

Die Ergebnisse entsprechen insgesamt den Erwartungen. Die stärksten Abweichungen zeigt in allen Fällen der abfallende Profiltyp, da sich bereits zu Anfang der betrachteten Spitzenstunde eine vergleichsweise lange Warteschlange aufbaut, die sich nur sehr langsam oder kaum wieder abbauen kann. Dabei spielt keine Rolle, ob diese durch fehlende ausreichend große Lücken im Hauptstrom oder durch sehr starken Zufluss im Nebenstrom entsteht.

Kombinationen von Profiltypen mit gegensätzlichen Verläufen, wie Spitze und Wanne oder Anstieg und Abfall, bestätigen die Vermutung, dass sich Intervalle mit starker und schwacher Belastung hinsichtlich der Verlustzeiten im Nebenstrom vorteilhaft ausgleichen können.

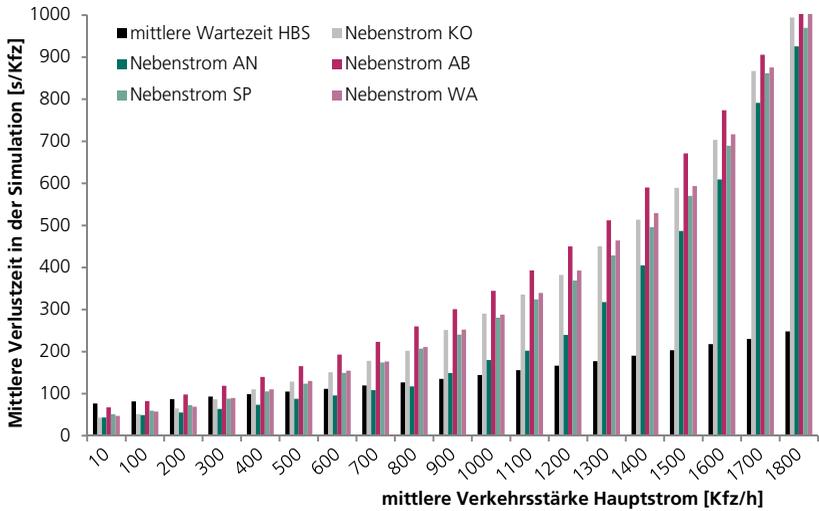


Abbildung 6-10 Instationarität im Nebenstrom, 100% Auslastung, HS-Profiltyp Abfall

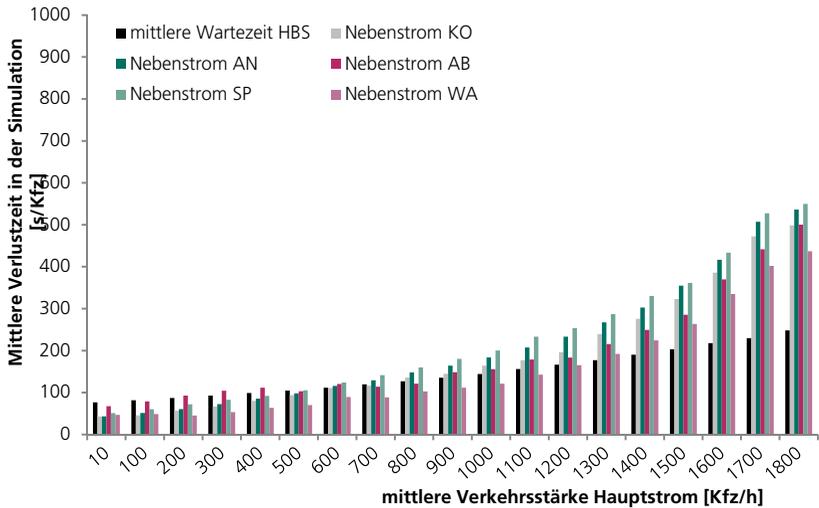


Abbildung 6-11 Instationarität im Nebenstrom, 100% Auslastung, HS-Profiltyp Anstieg

6 Instationarität an vorfahrtdirektierten Knotenpunkten

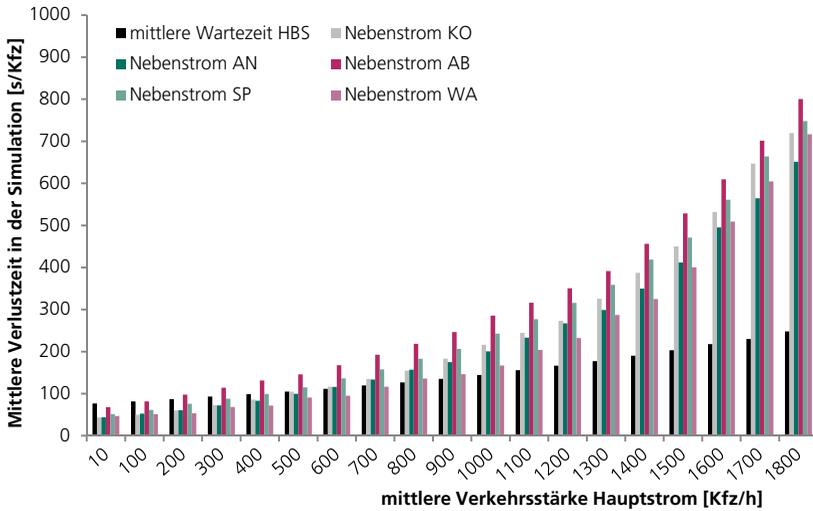


Abbildung 6-12 Instationarität im Nebenstrom, 100% Auslastung, HS-Profiltyp Spitze

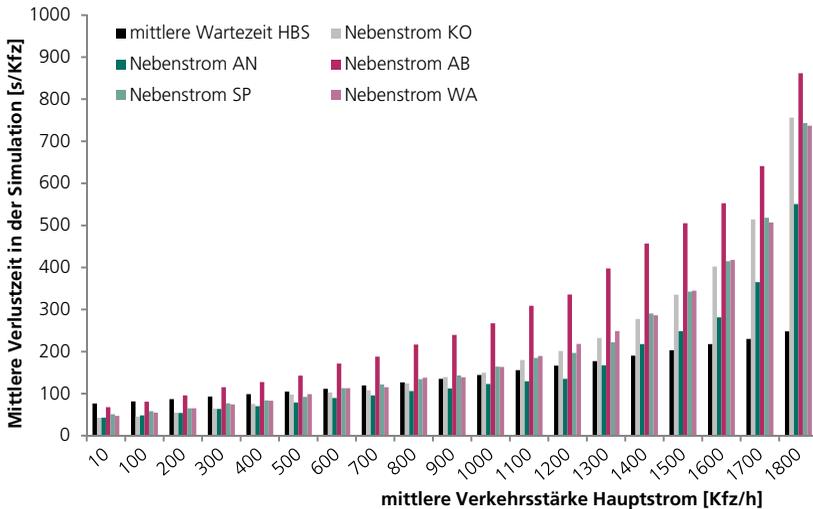


Abbildung 6-13 Instationarität im Nebenstrom, 100% Auslastung, HS-Profiltyp Wanne

## 6.3 Zusammenfassung

An der untersuchten vorfahrtgeregelten Einmündung scheint sich Instationarität, sowohl im Hauptstrom als auch im Nebenstrom, erheblich weniger auszuwirken als an einem Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage. Ein deutlich sichtbarer Einfluss ist bei hohen Hauptstrombelastungen erkennbar, wobei zu bedenken ist, dass die dann einfahrende Menge an Fahrzeugen aus dem Nebenstrom gering ist und es daher zu stärkeren Schwankungen der Ergebnisse kommen kann.

Dies impliziert weiterhin, dass bei einer Gesamtbewertung eines solchen Knotenpunkts nach HBS (2015) der entsprechende, schwach belastete Nebenstrom eine eher untergeordnete Rolle im Hinblick auf seinen Einfluss auf die Verkehrsqualität des Knotenpunkts spielen dürfte. Bei geringeren Hauptstrombelastungen scheint auch die stündliche Verkehrsstärke des Nebenstroms einen stärkeren Einfluss zu besitzen als darin eventuell inbegriffene Instationarität. Es ist anzunehmen, dass ein hoher Auslastungsgrad im Nebenstrom durch die sich bildende Warteschlange den Einfluss der Instationarität auf die Wartezeit verringert.

Durch die Modellierung als einbiegender Strom in eine einstreifige Strecke dürften sich die erlangten Erkenntnisse zumindest teilweise auch auf Kreisverkehre übertragen lassen.

Die bereits in Kapitel 5.8 bei der Zusammenfassung zu Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage angesprochene Problematik der isolierten Laborumgebung trifft ebenso hier zu. Für vorfahrtgeregelte Knotenpunkte kommt insbesondere hinzu, dass sich auch die Verkehrsverhältnisse nach der Spitzenstunde noch auf Fahrzeuge, die während der Spitzenstunde am Knotenpunkt ankamen, auswirken. Im Falle einer Lichtsignalanlage könnten diese, unbeeinflusst von anderen Strömen oder später ankommenden Fahrzeugen, abfließen. Bei Vorfahrtregelung sind die Anzahl und Größe der Zeitlücken im Hauptstrom auch nach dem Ende der Spitzenstunde für die Wartezeit der Fahrzeuge in der verbleibenden Warteschlange relevant.



# 7 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Instationarität im Verkehrsfluss wirkt sich in relevantem Ausmaß auf die mittlere Wartezeit von Kraftfahrzeugen an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage aus. Durch die Modellierung von Instationarität mittels verschiedener Zuflussprofiltypen konnte im Rahmen dieser Arbeit gezeigt werden, dass eine Berücksichtigung durch den Instationaritätsfaktor des HBS (2015) die mittlere Wartezeit im Vergleich zu den Ergebnissen eines kalibrierten Simulationsmodells teilweise stark überschätzt.

Die Verwendung eines auf Basis der Simulationsergebnisse entwickelten und anhand empirischer Daten validierten Faktors liefert Wartezeiten, die besser mit den Simulationsergebnissen übereinstimmen. Dieser Faktor enthält neben dem Verhältnis der Verkehrsstärke des höchstbelasteten 15-Minuten-Intervalls zu derjenigen der gesamten Stunde zusätzliche Parameter zur Berücksichtigung der Verteilung der Belastung auf die beiden Hälften der Stunde sowie des Auslastungsgrades.

Die Relevanz des Auslastungsgrades als Einflussfaktor bei der Modellierung von Instationarität bzw. Spitzenbildung der Verkehrsstärke wird ebenfalls von Studien zur Verbesserung des peak hourly factor des HCM (2010) bestätigt.

Sicherlich ist eine Laborumgebung nicht vollständig mit einer Spitzenstunde unter realen Bedingungen zu vergleichen. Sie hat allerdings den Vorteil, dass andere Einflüsse auf die Verlust- oder Wartezeit ausgeblendet werden können. Dies betrifft etwa die Höhe der Verkehrsbelastungen vor oder nach der Spitzenstunde, die den Annahmen der Berechnungsverfahren für die Warteschlangenlänge zum Teil entgegenstehen.

Der neu entwickelte Instationaritätsfaktor führt zu insgesamt geringeren Abweichungen der damit berechneten Wartezeiten von den Simulationsergebnissen, zeigt jedoch eine gewisse Schwäche darin, dass es in manchen Fällen zu einer

Unterschätzung der Wartezeiten kommt. Die Zuflussprofiltypen, bei denen sich die größte Abweichung dieser Art ergibt, sind der abfallende sowie der spitzenförmige Verlauf der Verkehrsstärke über die Stunde hinweg. Innerhalb der Daten der Berliner Dauerzählstellen kommen diese Profiltypen allerdings nur in einem Fünftel der Spitzenstunden vor.

Am betrachteten vorfahrtsregeltem Knotenpunkt wirkt sich Instationarität im Zufluss teilweise auf die mittleren Verlustzeiten in der Simulation aus. Jedoch ist dieser Einfluss nicht pauschal zu erfassen und in seiner Größenordnung im Hinblick auf die Bewertung der Verkehrsqualität von eher geringer Bedeutung.

Auf dieser Basis ließe sich die Vermutung aufstellen, dass sich Instationarität des Verkehrsflusses im Wartesystem mit deterministischer Bedienung durch eine Lichtsignalanlage stärker und deutlicher auswirkt als in einem Wartesystem mit stochastischer Bedienung durch die Zeitlückenverteilung im Hauptstrom an einem vorfahrtsregeltem Knotenpunkt. Zur Untersuchung dieser Zusammenhänge sind weitere Studien zu empfehlen.

Auch die Auswirkung der Verkehrsverhältnisse der Spitzenstunde auf den unmittelbar folgenden Zeitraum durch möglicherweise verbleibenden Reststau stellt ein Thema dar, das insbesondere im Zusammenhang mit den Verfahren des HBS (2015) genauer untersucht werden sollte.

Mikroskopische Simulation mit möglichst spezifischen Eingangsgrößen auf Basis eines gut kalibrierten Modells ist einer Berechnung auf abstraktem Niveau vorzuziehen, um möglichst exakte Ergebnisse bei der Bestimmung der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs zu erhalten. Lässt jedoch beispielsweise der organisatorische oder finanzielle Rahmen keine Simulationsstudien zu, führt eine Integration des neuen Instationaritätsfaktors in das bestehende Verfahren des HBS (2015) zu genaueren Ergebnissen für die mittlere Wartezeit an lichtsignalregeltem Knotenpunkten.

# LITERATUR

- Adams, William Frederick (1936): Road Traffic Considered as a Random Series.  
In: *Journal of the Institution of Civil Engineers* 4 (1), S. 121–130.  
DOI: 10.1680/ijoti.1936.14802
- Akçelik, Rahmi (1980): *Time-Dependent Expressions for Delay, Stop Rate and Queue Length at Traffic Signals*. Internal Report AIR 367-1. Australian Road Research Board, Vernon South, Australia
- Akçelik, Rahmi; Roupail, Nagui M. (1993): Estimation of Delays at Traffic Signals for variable Demand Conditions. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 27 (No. 2), S. 109–131. DOI: 10.1016/0191-2615(93)90003-S
- Akçelik, Rahmi; Troutbeck, Rod (1991): Implementation of the Australian roundabout analysis method in SIDRA. In : *Highway Capacity and Level of Service - Proceedings of The International Symposium of Highway Capacity*. Karlsruhe, Germany, 24-27 July 1991, S. 7–34
- Bäuerle, Nicole; Rolski, Tomasz (1998): A monotonicity result for the workload in Markov-modulated queues. In: *Journal of Applied Probability* 35 (3), S. 741–747. DOI: 10.1239/jap/1032265221
- Baum, Dieter (2013): *Grundlagen der Warteschlangentheorie*. Springer-Lehrbuch Masterclass. Springer Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg.  
DOI: 10.1007/978-3-642-39632-8\_5
- Brilon, Werner (1995): Wartezeiten an überlasteten Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen. In: *Straßenverkehrstechnik* 11, S. 531–538
- Brilon, Werner (2007): Time dependent delay at unsignalized intersections. In ISTTT17 (Hg.): *Proceedings of the 17th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. London. Elsevier, S. 547–572

- Catling, Ian (1977): A time-dependent approach to junction delays. In: *Traffic Engineering & Control* Vol. 18 (11), 520–523, 526
- Dehman, Amjad; Drakopoulos, Alexander (2016): Investigation of the Peak Hour Factor at Freeway Segments: The Urban and Suburban Vicinities. In Transportation Research Board (Hg.): *TRB 95th Annual Meeting Compendium of Papers*. Washington, D.C.
- Fellendorf, Martin; Vortisch, Peter (2010): Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM. In Jaume Barceló (Hg.): *Fundamentals of Traffic Simulation*. Springer. New York, S. 63–93
- Giambene, Giovanni (2014): *Queuing theory and telecommunications - Networks and applications*. Springer, New York, Heidelberg.  
DOI: 10.1007/978-1-4614-4084-0
- Harders, Jürgen (1968): *Die Leistungsfähigkeit nicht signalgeregelter städtischer Verkehrsknoten*. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (Heft 76), Bonn
- HBS (2015): *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- HCM (2010): *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Heffes, H. (1973): Analysis of First-Come First-Served Queuing Systems With Peaked Inputs. In: *Bell System Technical Journal* 52 (7), S. 1215–1228.  
DOI: 10.1002/j.1538-7305.1973.tb02014.x
- Holtzman, J. M.; Jagerman, D. L. (1979): Estimating Peakedness from Arrival Counts. In: *Proceedings of the 9th International Teletraffic Congress*
- Jacobs, F. (1979): *Ein Stationaritätstest für Zeitlückenfolgen - Arbeitsblätter zum Straßen- und Verkehrswesen*, Stuttgart
- Kimber, R. M.; Hollis, E. M. (1978): Peak-period traffic delays at road junctions and other bottlenecks. In: *Traffic Engineering & Control* 19 (10), S. 442–446

- Kimber, R. M.; Hollis, Erica M. (1979): *Traffic Queues and Delays at Road Junctions*. Transport and Road Research Laboratory (TRRL), Report 909, Crowthorne
- Kimber, R. M.; Marlow, M.; Hollis, Erica M. (1977): Flow/delay relationships for major/minor priority junctions. In: *Traffic Engineering & Control* 18 (11), S. 516–519
- Lan, Chang-Jen; Abia, Sonny D. (2011): Determining Peak Hour Factors for Capacity Analysis. In: *J. Transp. Eng.* 137 (8), S. 520–526.  
DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000241
- McNeil, Donald R. (1968): A Solution to the Fixed-Cycle Traffic Light Problem for Compound Poisson Arrivals. In: *Journal of Applied Probability* 5 (3), S. 624–635. DOI: 10.2307/3211926
- Palm, Conny (1943): *Intensitätsschwankungen im Fernsprechverkehr. Untersuchungen über die Darstellung auf Fernsprechverkehrsprobleme anwendbarer stochastischer Prozesse*. Ericsson Techniks (44). L.M. Ericsson, Stockholm
- PTV AG (2015): *PTV VISSIM 7 Benutzerhandbuch*, Karlsruhe
- Ross, Sheldon M. (1978): Average Delay in Queues with Non-Stationary Poisson Arrivals. In: *Journal of Applied Probability* 15 (3), S. 602–609
- Rouphail, Nagui; Tarko, Andrzej; Li, Jing (2001): Traffic Flow at Signalized Intersections. In Committee on Traffic Flow Theory and Characteristics (Hg.): *Traffic Flow Theory: A State-of-the-Art Report - Revised 2001*
- Tarko, Andrew P.; Perez-Cartagena, Rafael I. (2005): Variability of Peak Hour Factor at Intersections. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (1920), S. 125–130

- Tracz, Marian; Chodur, Janusz (2011): Quality of traffic performance assessment for priority type intersection with non-stationary traffic flow demands. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 19 (2), S. 307–319. DOI: 10.1016/j.trc.2010.05.016
- Troutbeck, Rod J.; Brilon, Werner (2001): Unsignalized Intersection Theory. In: Committee on Traffic Flow Theory and Characteristics (Hg.): *Traffic Flow Theory: A State-of-the-Art Report - Revised 2001*
- Viti, F.; van Zuylen, Henk J. (2004): Modeling Queues at Signalized Intersections. In: *Transportation Research Record* (1883), S. 68–77
- Vlahogianni, Eleni I.; Karlaftis, Matthew G.; Golias, John C. (2006): Statistical methods for detecting nonlinearity and non-stationarity in univariate short-term time-series of traffic volume. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 14 (5), S. 351–367. DOI: 10.1016/j.trc.2006.09.002
- Webster, F. V. (1958): *Traffic Signal Setting*. Road Research Technical Paper (No. 39), London
- Wu, Ning (1990): *Wartezeit und Leistungsfähigkeit von Lichtsignalanlagen unter Berücksichtigung von Instationarität und Teilgebundenheit des Verkehrs*. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Universität Bochum (8), Bochum
- Yi, Ping; Wolfenbarger, Jeanne; Raavi, Venkata; Yu, Lei (2009): Investigation of Peak Flow Variations - Preliminary Field Studies. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2130, S. 75–82. DOI: 10.3141/2130-10

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1	Schematische Darstellung der Koordinatentransformation nach Kimber und Hollis (1979).....	8
Abbildung 3-1	Modellierung von Verkehrsstärke-Ganglinien nach dem High-Definition- und Low-Definition-Ansatz .....	27
Abbildung 3-2	Anschauliche Erklärung des Instationaritätsfaktors anhand einer Ganglinie in Parabelform (verändert nach Wu, 1990)....	30
Abbildung 4-1	Lage der Pegelzählstellen im Stadtgebiet Dresden (Karte: Open Street Map).....	34
Abbildung 4-2	Spitzenstundenprofile der PZS 0506N (links) und 0522N (rechts) in verschiedenen Aggregationsstufen .....	35
Abbildung 4-3	Kompaktdarstellung des Spitzenstundenverlaufs einiger PZS in 15-Minuten-Intervallen.....	36
Abbildung 4-4	Zuflussprofiltyp 1a – ‚starker Anstieg‘ im Detail.....	38
Abbildung 4-5	Kompaktdarstellung des Verkehrsstärkeverlaufs der Zuflussprofiltypen in 15-Minuten-Intervallen.....	39
Abbildung 4-6	Startzeitpunkte der Spitzenstunden über den Tagesverlauf .....	42
Abbildung 4-7	Häufigkeit der Spitzenstunden pro Stunde im Tagesverlauf, differenziert nach stationärem und instationärem Zufluss .....	44
Abbildung 4-8	Prozentuale Aufteilung der Spitzenstunden pro Tagesstunde nach stationärem und instationärem Zufluss.....	44
Abbildung 4-9	Prozentuale Aufteilung der Spitzenstunden nach Zuflussprofiltyp je Tageshälfte.....	45
Abbildung 5-1	Modellskizze der Laborauswertung von Knoten mit LSA.....	48
Abbildung 5-3	Mittelwerte der Wartezeiten nach HBS (2015) sowie der Verlustzeiten aus der Simulation pro Zuflussprofiltyp.....	52

Abbildung 5-4	RMSPE der Simulationsergebnisse und der nach HBS (2015) berechneten mittleren Wartezeiten je Profiltyp.....	54
Abbildung 5-5	RMSPE der Simulationsergebnisse und der nach HBS (2015) berechneten mittleren Wartezeiten je Simulationsszenario.....	54
Abbildung 5-6	Prozentuale Abweichungen der Simulationsergebnisse von den nach HBS (2015) berechneten Wartezeiten für ausgewählte Zuflussprofiltypen, nach Simulationsszenario.....	55
Abbildung 5-8	Abweichungen der berechneten Wartezeiten zu den Verlustzeiten aus der Simulation, je Zuflussprofiltyp .....	65
Abbildung 5-9	RMSPE der mittels neuem Instationaritätsfaktor und nach HBS (2015) berechneten Wartezeiten, je Zuflussprofiltyp.....	65
Abbildung 5-10	Abweichungen der Wartezeiten nach HBS (2015) zu den Verlustzeiten aus der Simulation für die Zuflussprofiltypen 2	68
Abbildung 5-11	Abweichungen der Wartezeiten nach HBS (2015) zu den Verlustzeiten aus der Simulation für die Zuflussprofiltypen 3 und 4.....	68
Abbildung 5-12	Abweichungen der Wartezeiten nach HBS (2015) zu den Verlustzeiten aus der Simulation für die Zuflussprofiltypen 5	68
Abbildung 5-13	Abweichungen der Wartezeiten mit dem neuen IF zu den Verlustzeiten aus der Simulation für die Zuflussprofiltypen 2	69
Abbildung 5-14	Abweichungen der Wartezeiten mit dem neuen IF zu den Verlustzeiten aus der Simulation für die Zuflussprofiltypen 3 und 4.....	69
Abbildung 5-15	Abweichungen der Wartezeiten mit dem neuen IF zu den Verlustzeiten aus der Simulation für die Zuflussprofiltypen 5	69
Abbildung 5-16	RMSPE der berechneten Wartezeiten zu den Verlustzeiten aus der Simulation, über alle Zuflussprofiltypen, nach Szenario...	72

---

Abbildung 5-17	Abweichungen der berechneten Wartezeiten zu den Verlustzeiten aus der Simulation, über alle Zuflussprofiltypen, nach Szenario.....	72
Abbildung 5-18	Abweichungen der neu berechneten Wartezeiten zu den nach HBS (2015) ermittelten, über alle Zuflussprofiltypen, nach Szenario .....	72
Abbildung 5-19	RMSPE der berechneten Wartezeiten zu den Verlustzeiten aus der Simulation, über alle PZS-Profile, nach Szenario .....	73
Abbildung 5-20	Abweichungen der berechneten Wartezeiten zu den Verlustzeiten aus der Simulation, über alle PZS-Profile, nach Szenario .....	73
Abbildung 5-21	Abweichungen der neu berechneten Wartezeiten zu den nach HBS (2015) ermittelten, über alle PZS-Profile, nach Szenario .....	73
Abbildung 5-23	Mittlere Warte- bzw. Verlustzeiten über die Profiltypen, je Szenario .....	74
Abbildung 5-24	Mittlere Warte- bzw. Verlustzeiten über die PZS-Profile, je Szenario .....	75
Abbildung 6-1	Grundkapazitätskurven verschiedener Kalibrierungsschritte im Vergleich zur Kurve nach HBS (2015) .....	86
Abbildung 6-2	Maximale Kapazität des einbiegenden Stroms in Abhängigkeit vom Folgeabstand CC1 und der Einstellung der Konfliktfläche ‚Sichtbarkeit‘ der Strecke.....	86
Abbildung 6-3	Kurven der sich aus den Simulationsergebnissen ergebenden Grundkapazitäten für die verschiedenen Zuflussprofiltypen im Hauptstrom .....	89
Abbildung 6-4	Zeitlückenverteilung des Hauptstroms bei 1000 Kfz/h für die verschiedenen Zuflussprofiltypen im Vergleich zur theoretischen Annahme des HBS (2015).....	90

Abbildung 6-5	Mittlere Verlustzeiten aus der Simulation für die verschiedenen Zuflussprofiltypen des Hauptstroms im Vergleich .....	91
Abbildung 6-6	Instationarität im Nebenstrom, 100% Auslastung, HS konstant	94
Abbildung 6-7	Instationarität im Nebenstrom, 75% Auslastung, HS konstant	95
Abbildung 6-8	Instationarität im Nebenstrom, 50% Auslastung, HS konstant	95
Abbildung 6-9	Instationarität im Nebenstrom, 110% Auslastung, HS konstant	96
Abbildung 6-10	Instationarität im Nebenstrom, 100% Auslastung, HS-Profiltyp Abfall .....	99
Abbildung 6-11	Instationarität im Nebenstrom, 100% Auslastung, HS-Profiltyp Anstieg.....	99
Abbildung 6-12	Instationarität im Nebenstrom, 100% Auslastung, HS-Profiltyp Spitze.....	100
Abbildung 6-13	Instationarität im Nebenstrom, 100% Auslastung, HS-Profiltyp Wanne.....	100

# TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 4-1	Lage und Straßentyp der Pegelzählstellendaten Dresden.....	34
Tabelle 4-2	Zuflussprofiltypen .....	38
Tabelle 4-3	Häufigkeit der Zuflussprofiltypen (Daten der Berliner Dauerzählstellen).....	43
Tabelle 5-1	Simulationsszenarios: Signalprogramm-Zufluss-Varianten.....	48
Tabelle 5-2	Eingestellte Parameter des kalibrierten Fahrverhaltens an LSA .....	51
Tabelle 5-3	Ergebnisgrößen der Kalibrierung des VISSIM-Modells mit LSA ....	51
Tabelle 5-4	Prozentuale Abweichungen der mittleren Wartezeiten in [s/Kfz] nach HBS (2015) zu den in der Simulation gemessenen Verlustzeiten für die Laborbeispiele .....	56
Tabelle 5-5	Kenngrößen verschiedener Variationen für den Aufbau eines Instationaritätsfaktors.....	60
Tabelle 5-6	Quadratsummen über die mittleren Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und den nach der entsprechenden, zu prüfenden Kombination berechneten Wartezeiten für die verschiedenen Szenarien .....	62
Tabelle 5-7	Wartezeiten , Verlustzeiten und Abweichungen zwischen den Ergebnissen für Laborbeispiele und Realdaten, nach Szenario.....	66
Tabelle 5-8	Elastizitäten von Einflussgrößen auf die Wartezeitberechnung nach HBS (2015) .....	76
Tabelle 6-1	Eingestellte Parameter des kalibrierten Fahrverhaltens bei Vorfahrtregelung.....	85
Tabelle 6-2	Abweichungen der aus den Simulationsergebnissen berechneten Grundkapazitätskurven zur Grundkapazitätskurve nach HBS (2015) je Zuflussprofiltyp .....	90

Tabelle 6-3 Abweichungen verschiedener Zuflussprofiltypen im Hauptstrom auf Basis der Ergebnisse konstanten Zuflusses..... 92

Tabelle 6-4 RMSPE der einzelnen Abweichungen zwischen den Verlustzeiten der Zuflussprofiltypen und dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses..... 93

Tabelle 6-5 RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten aus der Simulation gegenüber der nach HBS berechneten Wartezeiten..... 93

Tabelle 6-6 100% Ausl. bis 1200 Kfz/h ..... 97

Tabelle 6-7 50% Ausl. bis 1200 Kfz/h ..... 97

Tabelle 6-8 75% Ausl. bis 1200 Kfz/h ..... 97

Tabelle 6-9 110% Ausl. bis 1200 Kfz/h ..... 97

Tabelle 6-10 100% Ausl. bis 1800 Kfz/h ..... 97

Tabelle 6-11 50% Ausl. bis 1800 Kfz/h ..... 97

Tabelle 6-12 75% Ausl. bis 1800 Kfz/h ..... 97

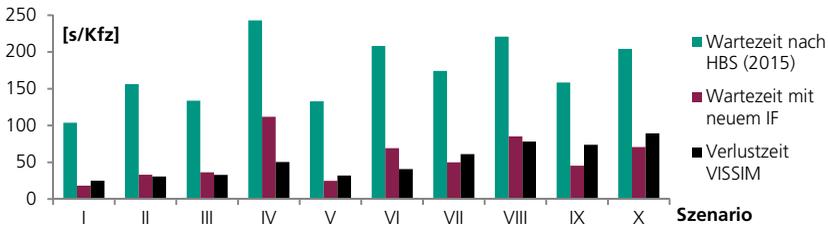
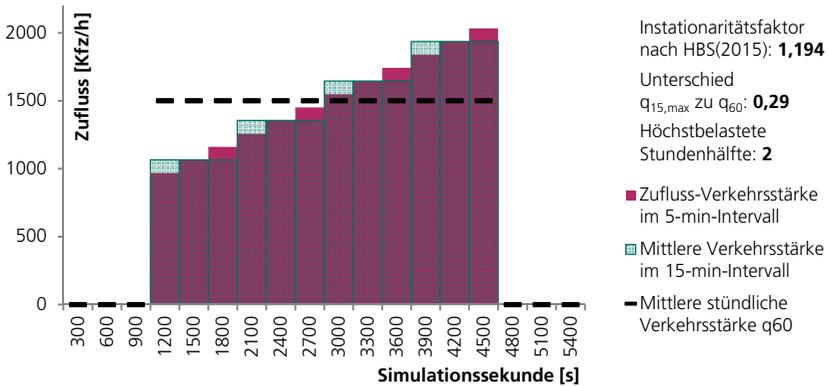
Tabelle 6-13 110% Ausl. bis 1800 Kfz/h ..... 97

# ANHANG

Zuflussprofiltypen – Eigenschaften und Ergebnisse .....	S. 116
Pegelzählstellen Dresden – Zuflussprofile .....	S. 135
Abweichungen der Wartezeiten .....	S. 144
Wartezeiten und Verlustzeiten je Szenario .....	S. 149
Elastizitätskurven .....	S. 154

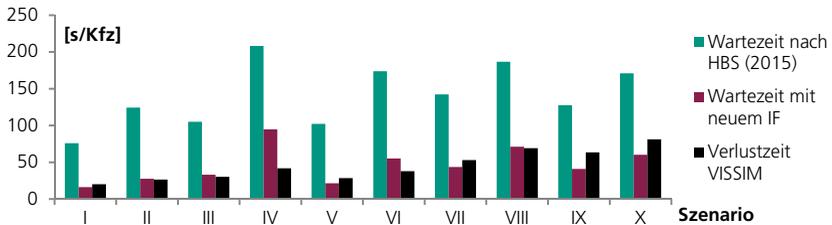
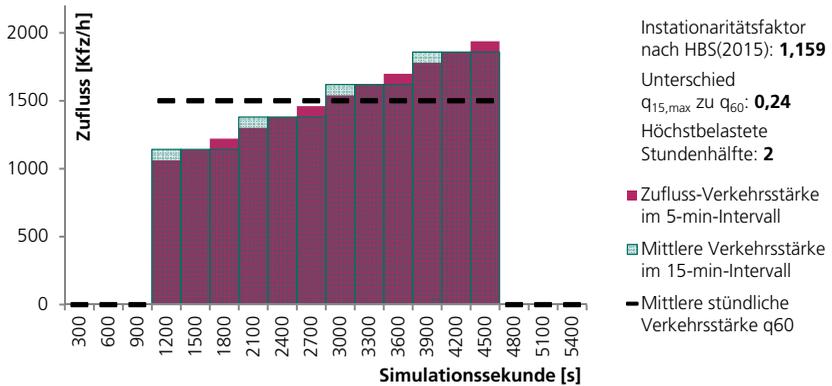
**Tabelle und Abbildungen A-1: Profil 1a – starker Anstieg**

Variante	Auslastungsgrad $\alpha$	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{fin}$ ideal	$f_{fin}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{fin}$ ideal zu $f_{fin}$ NEU
I: $t_u$ : 30s, $t_f$ : 20s	0,91	25,08	103,75	314%	1,041	1,025	18,29	-27%	-1,53%
II: $t_u$ : 30s, $t_f$ : 20s	0,95	30,72	156,32	409%	1,009	1,024	33,21	8%	1,54%
III: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 30s	0,92	33,01	133,67	305%	1,012	1,025	36,38	10%	1,33%
IV: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 30s	1,01	50,41	242,96	382%	0,961	1,022	111,90	122%	6,35%
V: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 45s	0,93	32,10	132,86	314%	1,045	1,025	24,79	-23%	-1,92%
VI: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 45s	0,99	40,88	208,07	409%	0,993	1,023	69,21	69%	3,05%
VII: $t_u$ : 90s, $t_f$ : 55s	0,96	61,09	174,26	185%	1,046	1,024	50,03	-18%	-2,14%
VIII: $t_u$ : 90s, $t_f$ : 55s	0,99	78,14	220,93	183%	1,021	1,023	85,27	9%	0,14%
IX: $t_u$ : 120s, $t_f$ : 75s	0,94	73,92	158,48	114%	1,079	1,024	45,31	-39%	-5,06%
X: $t_u$ : 120s, $t_f$ : 75s	0,98	89,29	204,14	129%	1,050	1,023	70,70	-21%	-2,53%
Mittelwert		51,46	173,54	274%			54,51	9,12%	-0,08%



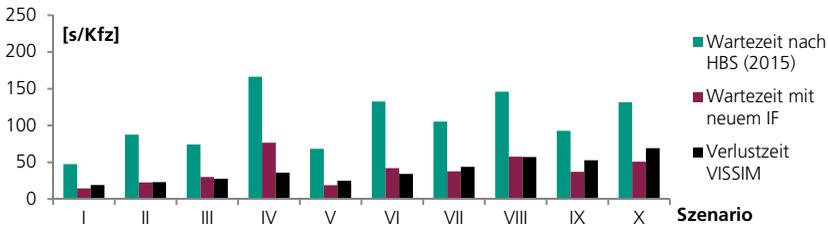
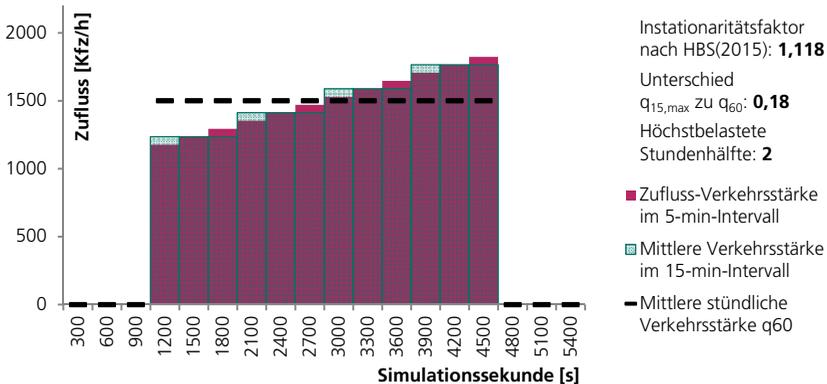
**Tabelle und Abbildungen A-2: Profil 1b – mittlerer Anstieg**

Variante	Auslastungsgrad $\alpha$	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{IN}$ ideal	$f_{IN}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{IN}$ ideal zu $f_{IN}$ NEU
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	20,12	76,05	278%	1,013	1,012	16,38	-19%	-0,04%
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	26,67	124,44	367%	0,995	1,011	27,60	3%	1,62%
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	30,32	105,05	246%	0,998	1,012	33,17	9%	1,46%
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	41,86	208,05	397%	0,944	1,009	94,78	126%	6,98%
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	28,62	102,37	258%	1,036	1,012	21,64	-24%	-2,37%
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	38,04	173,70	357%	0,988	1,010	55,20	45%	2,21%
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	53,12	142,30	168%	1,036	1,011	43,52	-18%	-2,47%
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	69,21	186,75	170%	1,013	1,010	71,21	3%	-0,33%
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	63,64	127,71	101%	1,069	1,012	41,02	-36%	-5,36%
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	81,27	170,87	110%	1,043	1,010	60,33	-26%	-3,16%
Mittelwert		45,29	141,73	245%			46,49	6,49%	-0,15%



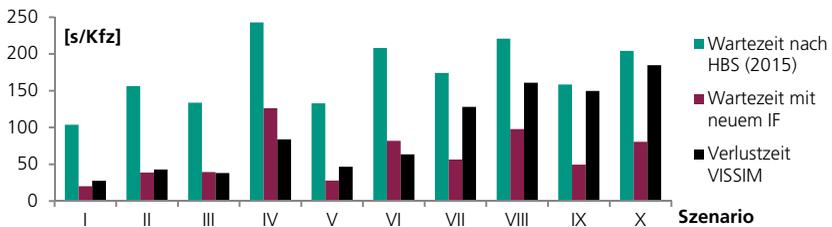
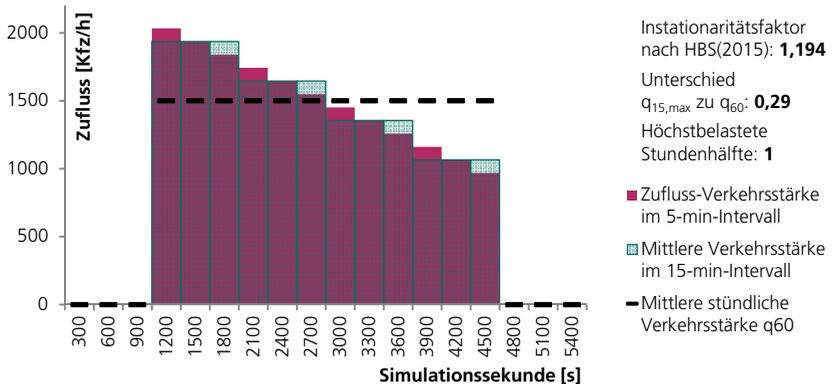
**Tabelle und Abbildungen A-3: Profil 1c – leichter Anstieg**

Variante	Auslastungsgrad x	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{fin}$ ideal	$f_{fin}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{fin}$ ideal zu $f_{fin}$ NEU
I: $t_u$ : 30s, $t_f$ : 20s	0,91	19,18	47,58	148%	1,005	0,997	14,57	-24%	-0,84%
II: $t_u$ : 30s, $t_f$ : 20s	0,95	22,98	87,60	281%	0,978	0,996	22,71	-1%	1,77%
III: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 30s	0,92	27,63	74,15	168%	0,980	0,997	30,14	9%	1,73%
IV: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 30s	1,01	35,88	166,38	364%	0,925	0,994	76,67	114%	7,39%
V: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 45s	0,93	25,10	68,25	172%	1,026	0,996	18,82	-25%	-2,88%
VI: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 45s	0,99	34,30	132,74	287%	0,982	0,994	42,03	23%	1,30%
VII: $t_u$ : 90s, $t_f$ : 55s	0,96	43,77	105,28	141%	1,022	0,995	37,76	-14%	-2,63%
VIII: $t_u$ : 90s, $t_f$ : 55s	0,99	57,13	146,10	156%	1,001	0,994	57,61	1%	-0,63%
IX: $t_u$ : 120s, $t_f$ : 75s	0,94	52,85	92,91	76%	1,056	0,996	37,15	-30%	-5,69%
X: $t_u$ : 120s, $t_f$ : 75s	0,98	69,24	131,65	90%	1,033	0,995	50,96	-26%	-3,67%
Mittelwert		38,81	105,26	188%			38,84	2,61%	-0,41%



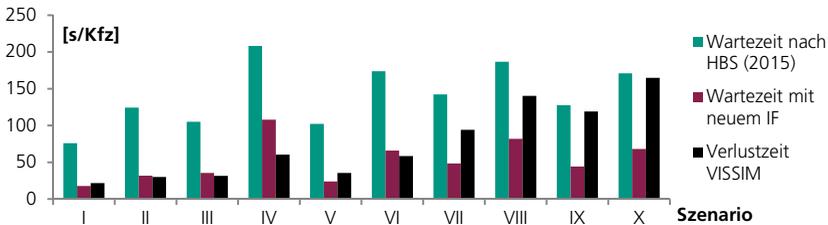
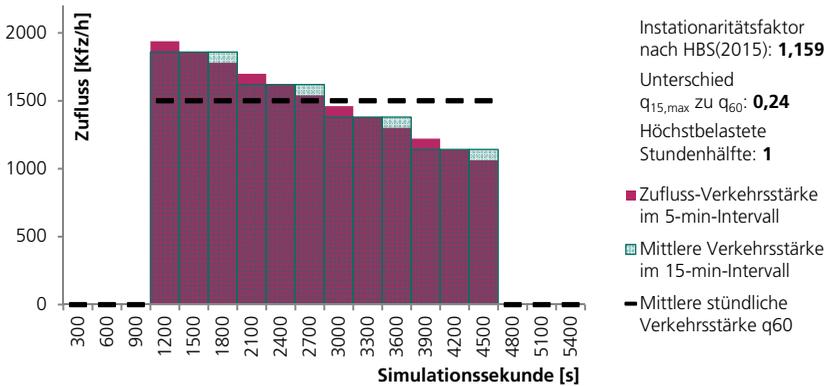
**Tabelle und Abbildungen A-4: Profil 2a – starker Abfall**

Variante	Auslastungsgrad $\alpha$	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{IN}$ ideal	$f_{IN}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{IN}$ ideal zu $f_{IN}$ NEU
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	27,57	103,75	276%	1,051	1,035	20,12	-27%	-1,50%
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	43,04	156,32	263%	1,034	1,034	38,91	-10%	0,00%
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	38,08	133,67	251%	1,031	1,035	39,47	4%	0,42%
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	83,79	242,96	190%	1,000	1,032	126,30	51%	3,21%
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	46,71	132,86	184%	1,069	1,035	27,97	-40%	-3,18%
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	63,49	208,07	228%	1,018	1,033	81,84	29%	1,48%
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	128,01	174,26	36%	1,101	1,034	56,50	-56%	-6,07%
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	160,95	220,93	37%	1,079	1,033	97,78	-39%	-4,26%
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	149,74	158,48	6%	1,136	1,034	49,61	-67%	-8,92%
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	184,74	204,14	11%	1,113	1,033	80,53	-56%	-7,21%
Mittelwert		92,61	173,54	148%			61,90	-21,18%	-2,60%



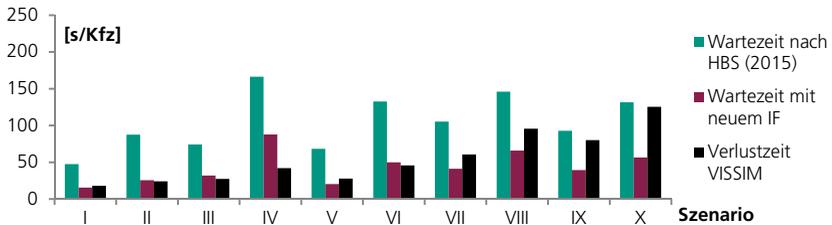
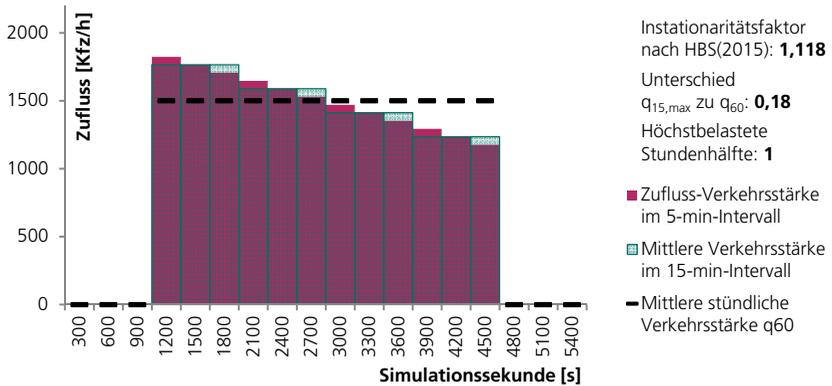
**Tabelle und Abbildungen A-5: Profil 2b – mittlerer Abfall**

Variante	Auslastungsgrad $\alpha$	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{fin}$ ideal	$f_{fin}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{fin}$ ideal zu $f_{fin}$ NEU
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	21,68	76,05	251%	1,024	1,022	17,82	-18%	-0,11%
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	30,11	124,44	313%	1,007	1,021	31,82	6%	1,43%
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	31,64	105,05	232%	1,005	1,022	35,60	13%	1,73%
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	60,48	208,05	244%	0,976	1,019	107,96	78%	4,44%
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	35,54	102,37	188%	1,052	1,022	24,01	-32%	-2,84%
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	58,57	173,70	197%	1,013	1,020	65,88	12%	0,67%
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	94,06	142,30	51%	1,076	1,021	48,42	-49%	-5,12%
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	140,33	186,75	33%	1,066	1,020	81,95	-42%	-4,30%
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	119,13	127,71	7%	1,115	1,022	44,25	-63%	-8,36%
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	164,90	170,87	4%	1,101	1,020	68,18	-59%	-7,34%
Mittelwert		75,64	141,73	152%			52,59	-15,27%	-1,98%



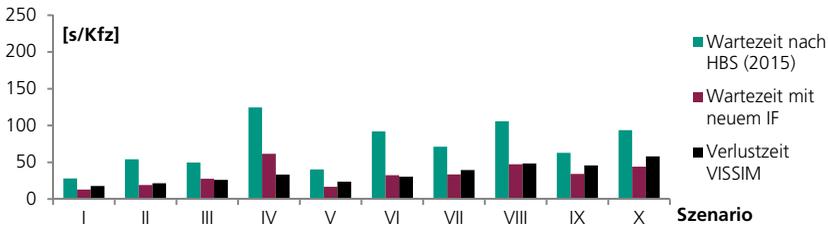
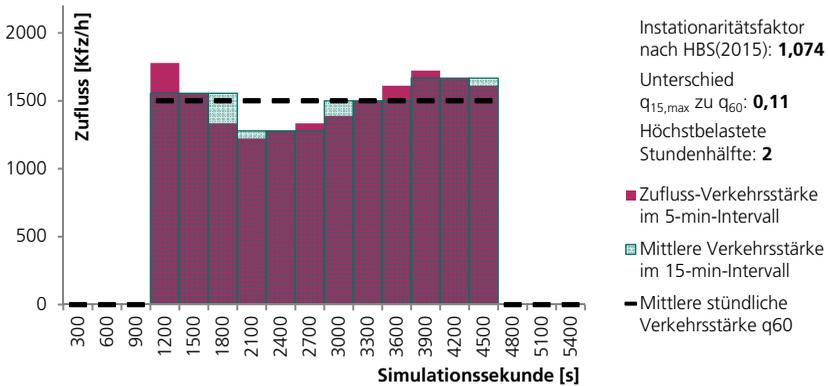
**Tabelle und Abbildungen A-6: Profil 2c – leichter Abfall**

Variante	Auslastungsgrad $\alpha$	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{in}$ ideal	$f_{in}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{in}$ ideal zu $f_{in}$ NEU
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	18,04	47,58	164%	0,995	1,007	15,68	-13%	1,23%
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	24,19	87,60	262%	0,984	1,006	25,63	6%	2,15%
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	27,47	74,15	170%	0,978	1,007	31,98	16%	2,87%
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	42,14	166,38	295%	0,944	1,004	87,89	109%	6,31%
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	27,90	68,25	145%	1,034	1,006	20,52	-26%	-2,73%
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	45,82	132,74	190%	0,999	1,004	49,97	9%	0,51%
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	60,76	105,28	73%	1,046	1,005	41,22	-32%	-3,87%
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	95,64	146,10	53%	1,035	1,004	65,87	-31%	-2,98%
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	80,07	92,91	16%	1,084	1,006	39,48	-51%	-7,24%
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	125,36	131,65	5%	1,076	1,005	56,58	-55%	-6,59%
Mittelwert		54,74	105,26	137%			43,48	-6,84%	-1,04%



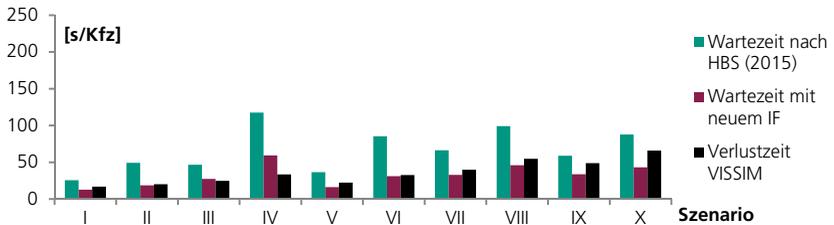
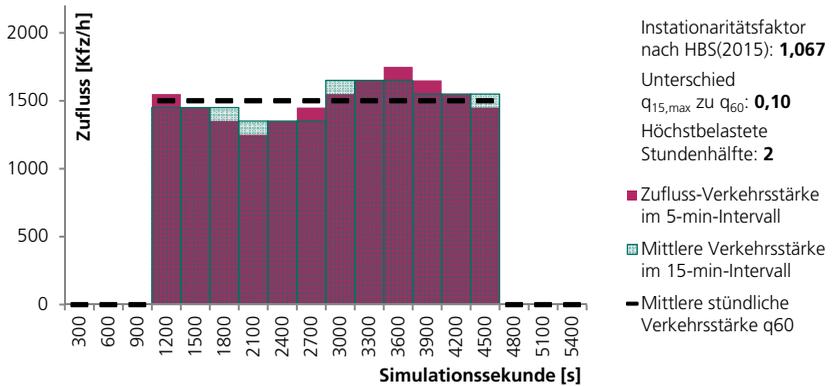
**Tabelle und Abbildungen A-7: Profil 3a – starke Wellenform**

Variante	Auslastungsgrad $\alpha$	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{in}$ ideal	$f_{in}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{in}$ ideal zu $f_{in}$ NEU
I: $t_u$ : 30s, $t_f$ : 20s	0,91	17,76	28,01	58%	0,992	0,980	13,10	-26%	-1,13%
II: $t_u$ : 30s, $t_f$ : 20s	0,95	21,63	54,11	150%	0,970	0,979	19,12	-12%	0,95%
III: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 30s	0,92	26,03	49,86	92%	0,966	0,980	27,70	6%	1,47%
IV: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 30s	1,01	33,43	124,48	272%	0,915	0,977	61,52	84%	6,78%
V: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 45s	0,93	23,62	40,25	70%	1,020	0,980	16,67	-29%	-3,96%
VI: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 45s	0,99	30,44	91,88	202%	0,973	0,978	32,51	7%	0,49%
VII: $t_u$ : 90s, $t_f$ : 55s	0,96	39,48	71,25	80%	1,014	0,979	33,50	-15%	-3,43%
VIII: $t_u$ : 90s, $t_f$ : 55s	0,99	48,39	105,76	119%	0,989	0,978	47,33	-2%	-1,12%
IX: $t_u$ : 120s, $t_f$ : 75s	0,94	45,89	62,96	37%	1,046	0,980	34,21	-25%	-6,34%
X: $t_u$ : 120s, $t_f$ : 75s	0,98	58,10	93,68	61%	1,021	0,978	44,14	-24%	-4,17%
Mittelwert		34,48	72,22	114%			32,98	-3,69%	-1,05%



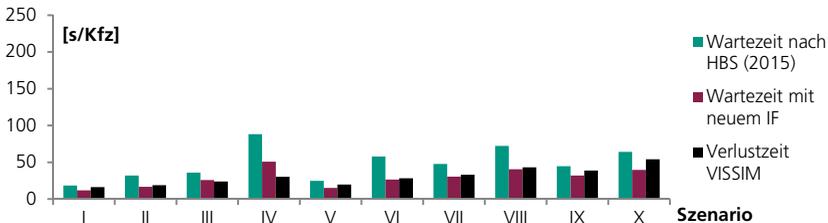
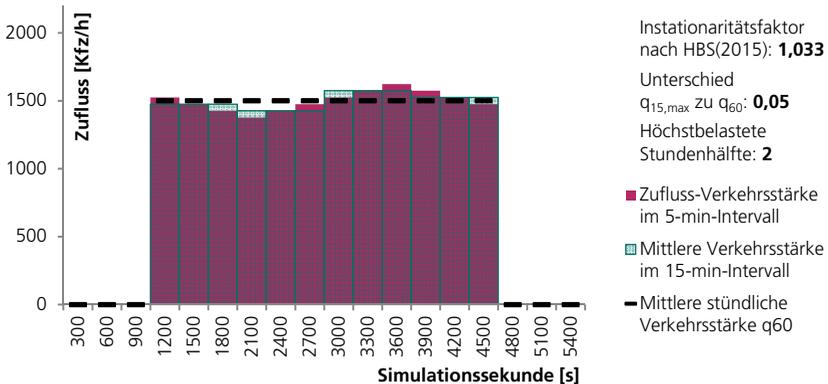
**Tabelle und Abbildungen A-8: Profil 3b – mittlere Wellenform**

Variante	Auslastungsgrad $\alpha$	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{in}$ ideal	$f_{in}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{in}$ ideal zu $f_{in}$ NEU
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	16,89	25,78	53%	0,982	0,978	12,88	-24%	-0,41%
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	20,20	49,31	144%	0,960	0,977	18,62	-8%	1,73%
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	24,78	46,76	89%	0,953	0,977	27,35	10%	2,54%
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	33,46	117,65	252%	0,916	0,975	59,34	77%	6,46%
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	22,42	36,69	64%	1,015	0,977	16,36	-27%	-3,76%
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	32,62	85,31	162%	0,978	0,975	31,25	-4%	-0,30%
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	39,83	66,28	66%	1,015	0,976	32,91	-17%	-3,78%
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	54,81	99,29	81%	0,998	0,975	45,93	-16%	-2,27%
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	48,98	58,90	20%	1,051	0,977	33,79	-31%	-7,03%
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	65,98	87,78	33%	1,029	0,976	43,21	-35%	-5,23%
Mittelwert		36,00	67,37	96%			32,16	-7,42%	-1,20%



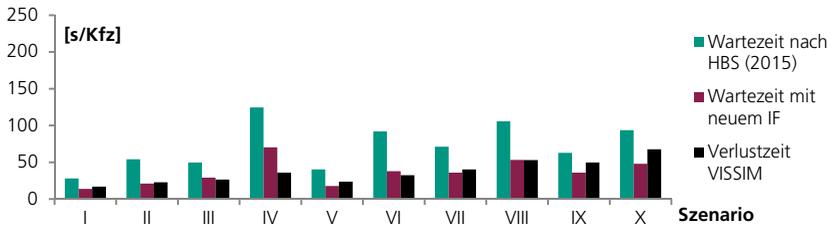
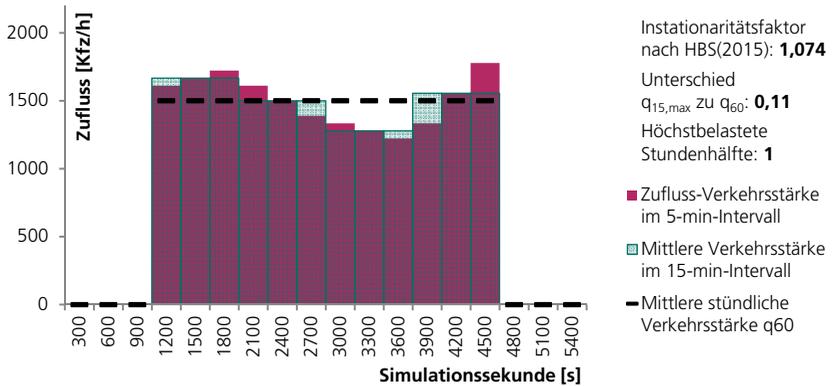
**Tabelle und Abbildungen A-9: Profil 3c – leichte Wellenform**

Variante	Auslastungsgrad $\alpha$	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{in}$ ideal	$f_{in}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{in}$ ideal zu $f_{in}$ NEU
I: $t_u$ : 30s, $t_f$ : 20s	0,91	16,26	18,51	14%	0,973	0,965	11,99	-26%	-0,87%
II: $t_u$ : 30s, $t_f$ : 20s	0,95	18,86	31,97	70%	0,948	0,964	16,65	-12%	1,63%
III: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 30s	0,92	23,85	36,01	51%	0,942	0,965	25,89	9%	2,40%
IV: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 30s	1,01	30,21	88,23	192%	0,899	0,962	50,78	68%	7,06%
V: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 45s	0,93	19,82	24,88	26%	1,002	0,964	15,12	-24%	-3,78%
VI: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 45s	0,99	28,35	57,88	104%	0,968	0,963	26,51	-6%	-0,55%
VII: $t_u$ : 90s, $t_f$ : 55s	0,96	33,17	47,81	44%	0,998	0,963	30,57	-8%	-3,42%
VIII: $t_u$ : 90s, $t_f$ : 55s	0,99	43,29	72,26	67%	0,981	0,963	40,57	-6%	-1,86%
IX: $t_u$ : 120s, $t_f$ : 75s	0,94	38,83	44,69	15%	1,033	0,964	32,11	-17%	-6,64%
X: $t_u$ : 120s, $t_f$ : 75s	0,98	54,15	64,22	19%	1,016	0,963	39,64	-27%	-5,25%
Mittelwert		30,68	48,65	60%			28,98	-4,97%	-1,13%



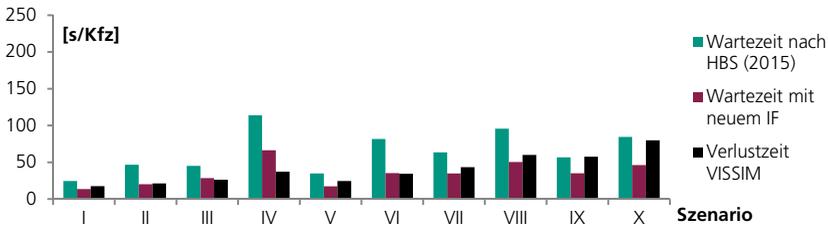
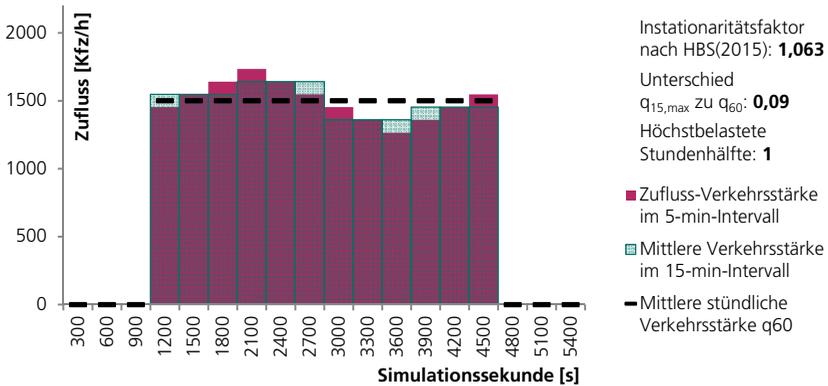
**Tabelle und Abbildungen A-10: Profil 4a – starke Wellenform**

Variante	Auslastungsgrad $\alpha$	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{IN}$ ideal	$f_{IN}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{IN}$ ideal zu $f_{IN}$ NEU
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	17,02	28,01	65%	0,983	0,990	13,96	-18%	0,74%
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	22,74	54,11	138%	0,977	0,989	21,16	-7%	1,28%
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	26,50	49,86	88%	0,970	0,990	29,12	10%	2,05%
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	36,02	124,48	246%	0,926	0,987	70,31	95%	6,65%
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	23,66	40,25	70%	1,020	0,990	17,91	-24%	-2,99%
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	32,38	91,88	184%	0,978	0,988	37,87	17%	1,06%
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	40,45	71,25	76%	1,016	0,989	35,93	-11%	-2,64%
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	53,02	105,76	99%	0,996	0,988	53,17	0%	-0,76%
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	49,78	62,96	26%	1,052	0,990	35,90	-28%	-5,92%
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	67,60	93,68	39%	1,031	0,988	48,00	-29%	-4,14%
Mittelwert		36,92	72,22	103%			36,33	0,50%	-0,47%



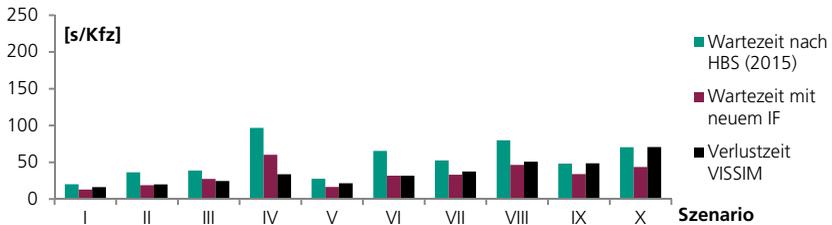
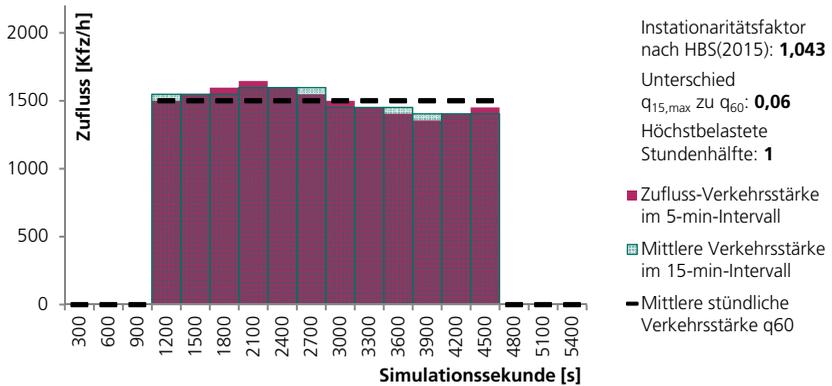
**Tabelle und Abbildungen A-11: Profil 4b – mittlere Wellenform**

Variante	Auslastungsgrad $\alpha$	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{fin}$ ideal	$f_{fin}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{fin}$ ideal zu $f_{fin}$ NEU
I: $t_u$ : 30s, $t_f$ : 20s	0,91	17,51	24,64	41%	0,989	0,986	13,57	-22%	-0,28%
II: $t_u$ : 30s, $t_f$ : 20s	0,95	21,41	46,76	118%	0,969	0,985	20,22	-6%	1,68%
III: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 30s	0,92	26,31	45,14	72%	0,969	0,986	28,48	8%	1,79%
IV: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 30s	1,01	37,20	113,86	206%	0,930	0,983	66,31	78%	5,71%
V: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 45s	0,93	24,56	34,85	42%	1,024	0,986	17,34	-29%	-3,74%
VI: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 45s	0,99	34,40	81,69	137%	0,982	0,984	35,37	3%	0,20%
VII: $t_u$ : 90s, $t_f$ : 55s	0,96	43,46	63,62	46%	1,022	0,985	34,81	-20%	-3,62%
VIII: $t_u$ : 90s, $t_f$ : 55s	0,99	60,07	95,73	59%	1,004	0,984	50,47	-16%	-2,03%
IX: $t_u$ : 120s, $t_f$ : 75s	0,94	57,70	56,76	-2%	1,062	0,985	35,13	-39%	-7,24%
X: $t_u$ : 120s, $t_f$ : 75s	0,98	80,04	84,56	6%	1,042	0,984	46,21	-42%	-5,59%
Mittelwert		40,27	64,76	73%			34,79	-8,54%	-1,31%



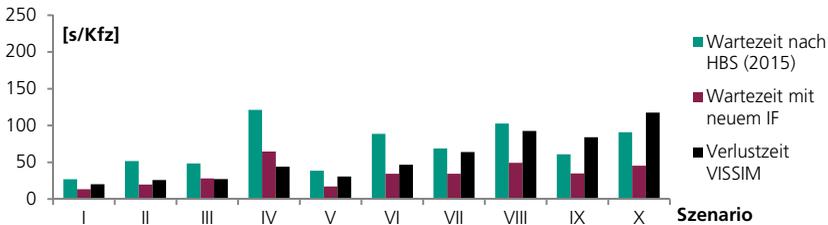
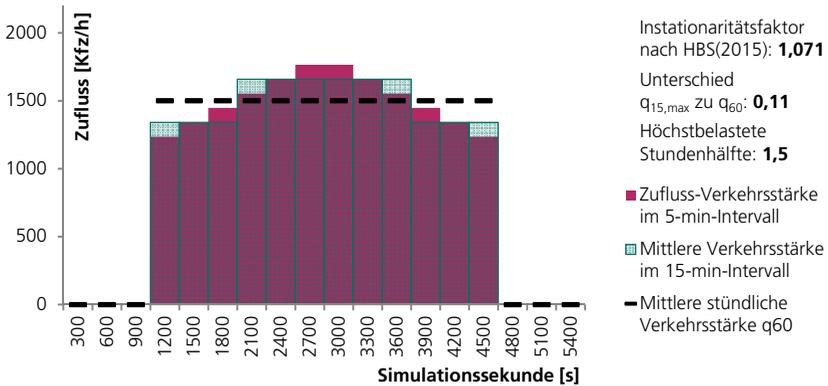
**Tabelle und Abbildungen A-12: Profil 4c – leichte Wellenform**

Variante	Auslastungsgrad $\alpha$	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{IN}$ ideal	$f_{IN}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{IN}$ ideal zu $f_{IN}$ NEU
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	16,36	20,28	24%	0,975	0,979	12,97	-21%	0,39%
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	20,02	36,38	82%	0,958	0,978	18,82	-6%	2,01%
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	24,55	38,71	58%	0,951	0,979	27,49	12%	2,91%
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	33,87	96,73	186%	0,917	0,976	60,21	78%	6,37%
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	21,45	27,74	29%	1,011	0,978	16,48	-23%	-3,23%
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	31,75	65,60	107%	0,976	0,976	31,75	0%	0,01%
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	37,53	52,61	40%	1,009	0,977	33,14	-12%	-3,18%
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	50,76	79,88	57%	0,993	0,976	46,49	-8%	-1,63%
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	48,63	48,25	-1%	1,050	0,978	33,96	-30%	-6,88%
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	70,66	70,64	0%	1,034	0,977	43,58	-38%	-5,53%
Mittelwert		35,56	53,68	58%			32,49	-4,87%	-0,88%



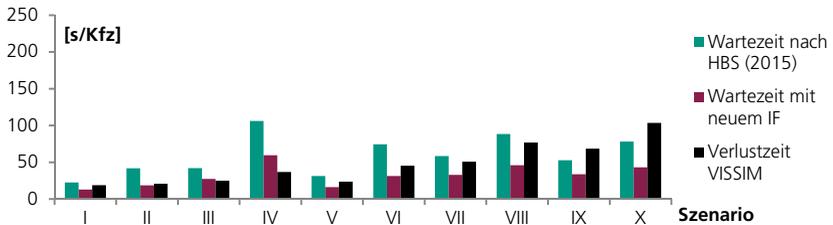
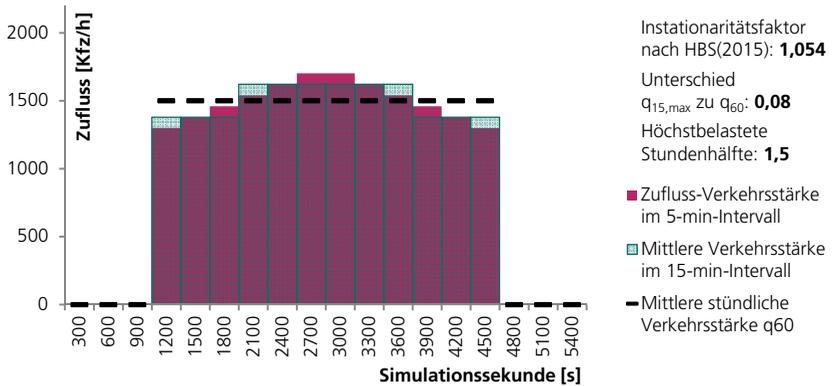
**Tabelle und Abbildungen A-13: Profil 5a – starke Spitze**

Variante	Auslastungsgrad x	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{in}$ ideal	$f_{in}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{in}$ ideal zu $f_{in}$ NEU
I: $t_u$ : 30s, $t_f$ : 20s	0,91	20,13	26,92	34%	1,013	0,984	13,40	-33%	-2,84%
II: $t_u$ : 30s, $t_f$ : 20s	0,95	26,02	51,81	99%	0,993	0,983	19,82	-24%	-0,97%
III: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 30s	0,92	27,12	48,36	78%	0,976	0,984	28,20	4%	0,84%
IV: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 30s	1,01	44,07	121,26	175%	0,949	0,981	64,59	47%	3,41%
V: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 45s	0,93	30,78	38,53	25%	1,042	0,984	17,10	-44%	-5,59%
VI: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 45s	0,99	46,65	88,77	90%	1,000	0,982	34,33	-26%	-1,86%
VII: $t_u$ : 90s, $t_f$ : 55s	0,96	64,03	68,88	8%	1,049	0,983	34,34	-46%	-6,35%
VIII: $t_u$ : 90s, $t_f$ : 55s	0,99	92,71	102,70	11%	1,033	0,982	49,33	-47%	-4,98%
IX: $t_u$ : 120s, $t_f$ : 75s	0,94	84,11	61,01	-27%	1,088	0,983	34,80	-59%	-9,62%
X: $t_u$ : 120s, $t_f$ : 75s	0,98	117,66	90,87	-23%	1,070	0,982	45,46	-61%	-8,25%
Mittelwert		55,33	69,91	47%			34,14	-29,07%	-3,62%



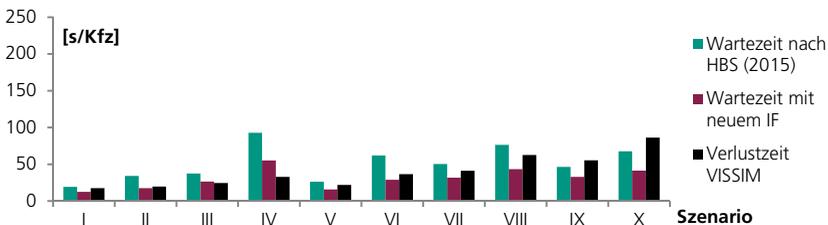
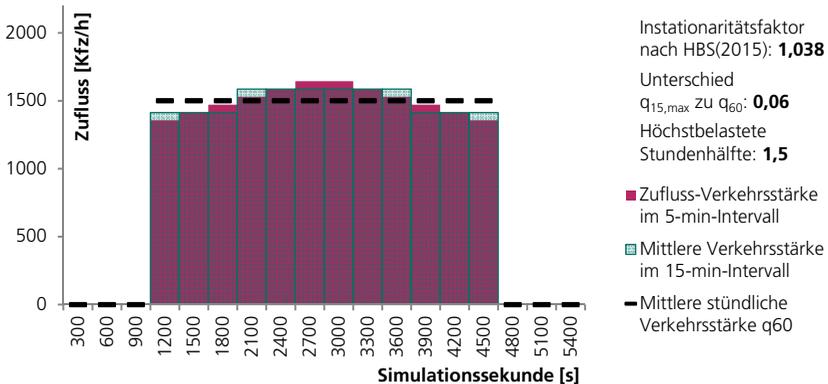
**Tabelle und Abbildungen A-14: Profil 5b – mittlere Spitze**

Variante	Auslastungsgrad $\alpha$	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{in}$ ideal	$f_{in}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{in}$ ideal zu $f_{in}$ NEU
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	19,01	22,54	19%	1,004	0,978	12,90	-32%	-2,58%
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	20,85	41,86	101%	0,965	0,977	18,66	-11%	1,24%
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	25,09	42,08	68%	0,957	0,978	27,38	9%	2,20%
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	36,78	106,17	189%	0,929	0,975	59,50	62%	4,99%
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	23,80	31,41	32%	1,021	0,977	16,38	-31%	-4,28%
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	45,48	74,40	64%	0,999	0,976	31,34	-31%	-2,34%
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	50,75	58,46	15%	1,033	0,976	32,95	-35%	-5,51%
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	76,82	88,55	15%	1,020	0,976	46,03	-40%	-4,39%
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	68,49	52,71	-23%	1,074	0,977	33,82	-51%	-9,01%
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	103,54	78,17	-25%	1,061	0,976	43,28	-58%	-7,99%
Mittelwert		47,06	59,64	45%			32,22	-21,79%	-2,77%



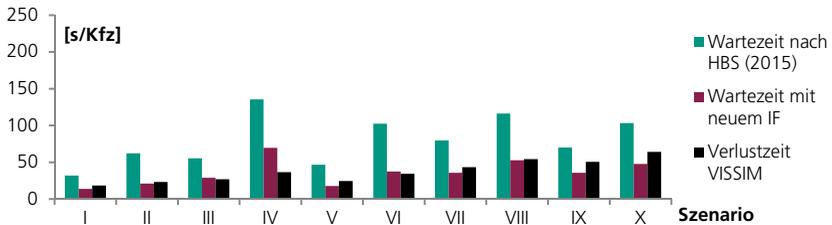
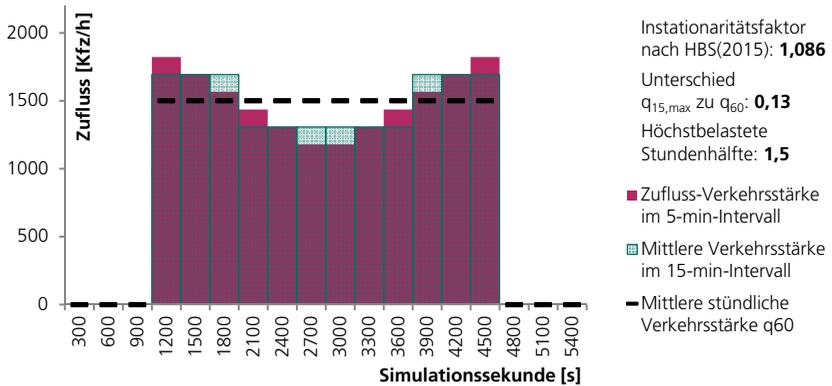
**Tabelle und Abbildungen A-15: Profil 5c – leichte Spitze**

Variante	Auslastungsgrad $\alpha$	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{fin}$ ideal	$f_{fin}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{fin}$ ideal zu $f_{fin}$ NEU
I: $t_u$ : 30s, $t_f$ : 20s	0,91	17,49	19,44	11%	0,989	0,972	12,47	-29%	-1,68%
II: $t_u$ : 30s, $t_f$ : 20s	0,95	19,87	34,28	73%	0,957	0,971	17,69	-11%	1,42%
III: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 30s	0,92	24,58	37,43	52%	0,951	0,972	26,67	9%	2,19%
IV: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 30s	1,01	32,84	92,81	183%	0,913	0,969	55,29	68%	6,17%
V: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 45s	0,93	21,90	26,37	20%	1,013	0,971	15,78	-28%	-4,09%
VI: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 45s	0,99	36,54	62,01	70%	0,986	0,970	28,97	-21%	-1,63%
VII: $t_u$ : 90s, $t_f$ : 55s	0,96	41,21	50,34	22%	1,017	0,971	31,80	-23%	-4,60%
VIII: $t_u$ : 90s, $t_f$ : 55s	0,99	62,58	76,35	22%	1,007	0,970	43,36	-31%	-3,68%
IX: $t_u$ : 120s, $t_f$ : 75s	0,94	55,33	46,56	-16%	1,059	0,971	33,00	-40%	-8,31%
X: $t_u$ : 120s, $t_f$ : 75s	0,98	86,31	67,63	-22%	1,047	0,970	41,51	-52%	-7,40%
Mittelwert		39,87	51,32	42%			30,65	-15,73%	-2,16%



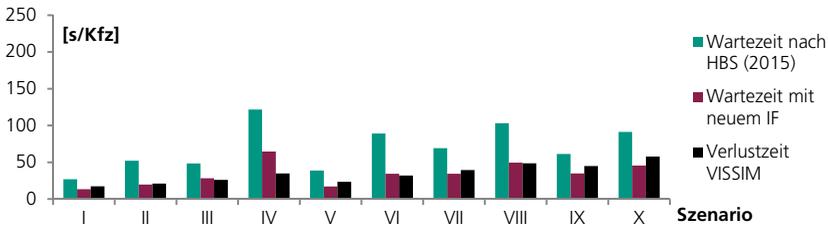
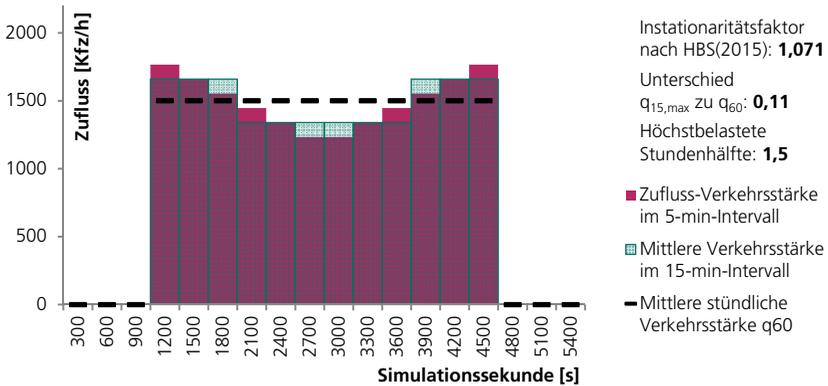
**Tabelle und Abbildungen A-16: Profil 6a – starke Wannenform**

Variante	Auslastungsgrad $\alpha$	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{IN}$ ideal	$f_{IN}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{IN}$ ideal zu $f_{IN}$ NEU
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	18,55	32,11	73%	1,000	0,990	13,90	-25%	-0,99%
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	23,27	62,27	168%	0,980	0,989	21,02	-10%	0,91%
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	26,94	55,36	105%	0,974	0,990	29,02	8%	1,60%
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	36,70	135,42	269%	0,928	0,987	69,71	90%	6,30%
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	24,63	46,62	89%	1,024	0,989	17,82	-28%	-3,40%
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	34,54	102,48	197%	0,982	0,987	37,49	9%	0,55%
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	43,41	79,62	83%	1,022	0,988	35,76	-18%	-3,25%
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	54,42	116,20	114%	0,997	0,987	52,76	-3%	-1,00%
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	50,72	70,02	38%	1,053	0,989	35,78	-29%	-6,09%
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	64,20	103,34	61%	1,028	0,988	47,73	-26%	-3,88%
Mittelwert		37,74	80,34	120%			36,10	-3,20%	-0,93%



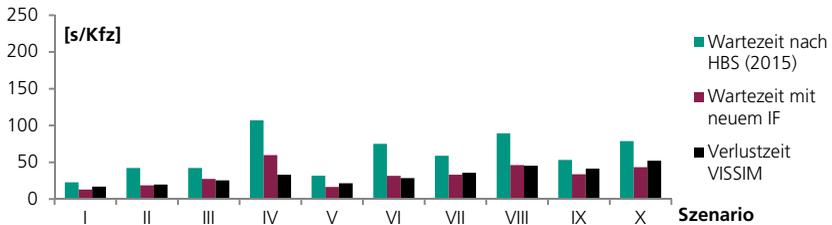
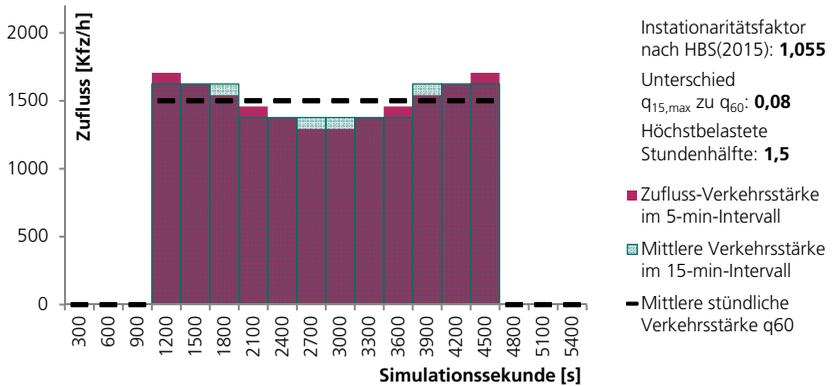
**Tabelle und Abbildungen A-17: Profil 6b – mittlere Wannenförmung**

Variante	Auslastungsgrad $\alpha$	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{fin}$ ideal	$f_{fin}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{fin}$ ideal zu $f_{fin}$ NEU
I: $t_u$ : 30s, $t_f$ : 20s	0,91	17,48	27,06	55%	0,989	0,984	13,42	-23%	-0,43%
II: $t_u$ : 30s, $t_f$ : 20s	0,95	21,12	52,10	147%	0,967	0,983	19,86	-6%	1,70%
III: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 30s	0,92	26,14	48,55	86%	0,967	0,984	28,22	8%	1,77%
IV: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 30s	1,01	34,95	121,66	248%	0,922	0,981	64,73	85%	6,45%
V: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 45s	0,93	23,48	38,74	65%	1,020	0,984	17,12	-27%	-3,53%
VI: $t_u$ : 60s, $t_f$ : 45s	0,99	31,92	89,16	179%	0,977	0,982	34,42	8%	0,54%
VII: $t_u$ : 90s, $t_f$ : 55s	0,96	39,49	69,17	75%	1,014	0,983	34,38	-13%	-3,06%
VIII: $t_u$ : 90s, $t_f$ : 55s	0,99	48,64	103,08	112%	0,990	0,982	49,43	2%	-0,77%
IX: $t_u$ : 120s, $t_f$ : 75s	0,94	44,99	61,25	36%	1,044	0,983	34,82	-23%	-5,83%
X: $t_u$ : 120s, $t_f$ : 75s	0,98	57,77	91,22	58%	1,021	0,982	45,52	-21%	-3,76%
Mittelwert		34,60	70,20	106%			34,19	-1,04%	-0,69%



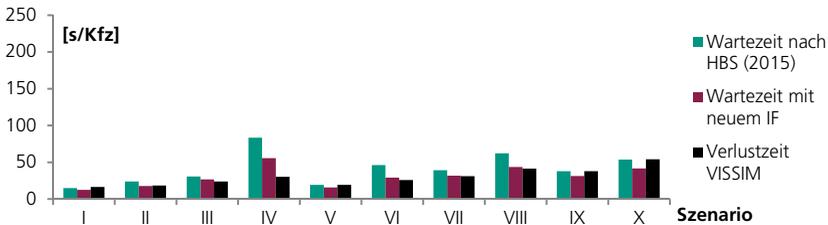
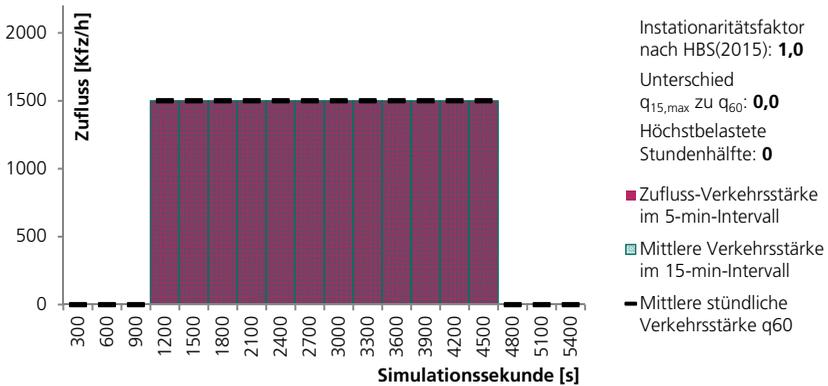
**Tabelle und Abbildungen A-18: Profil 6c – leichte Wannenumform**

Variante	Auslastungsgrad $\alpha$	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{in}$ ideal	$f_{in}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{in}$ ideal zu $f_{in}$ NEU
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	17,04	22,77	34%	0,984	0,978	12,93	-24%	-0,54%
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	19,81	42,41	114%	0,957	0,977	18,72	-6%	2,12%
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	25,40	42,41	67%	0,960	0,978	27,42	8%	1,89%
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	33,13	107,06	223%	0,914	0,975	59,79	81%	6,68%
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	21,53	31,79	48%	1,011	0,978	16,42	-24%	-3,32%
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	28,59	75,23	163%	0,969	0,976	31,51	10%	0,76%
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	35,67	59,04	66%	1,005	0,977	33,03	-7%	-2,78%
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	45,29	89,37	97%	0,984	0,976	46,22	2%	-0,86%
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	41,53	53,16	28%	1,038	0,977	33,88	-18%	-5,85%
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	52,17	78,89	51%	1,014	0,976	43,40	-17%	-3,70%
Mittelwert		32,02	60,21	89%			32,33	0,47%	-0,56%

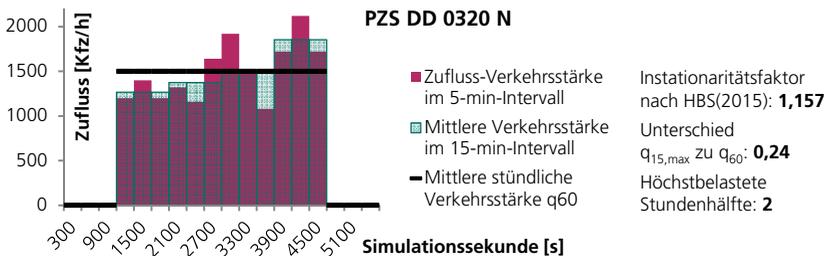
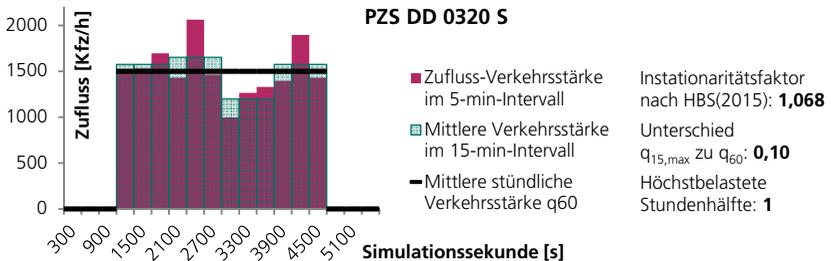
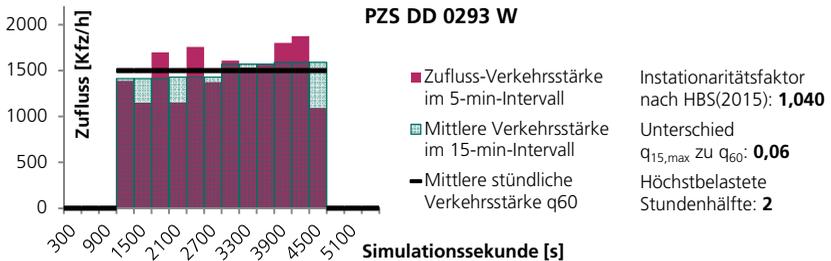
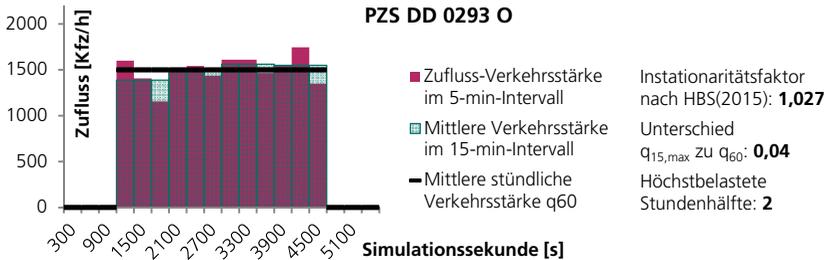


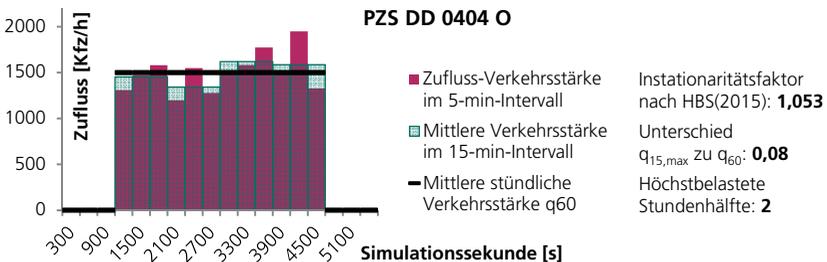
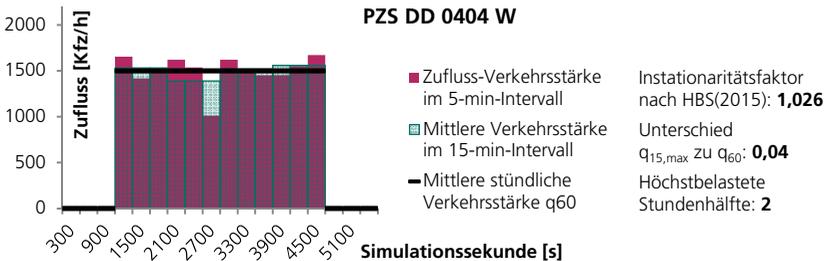
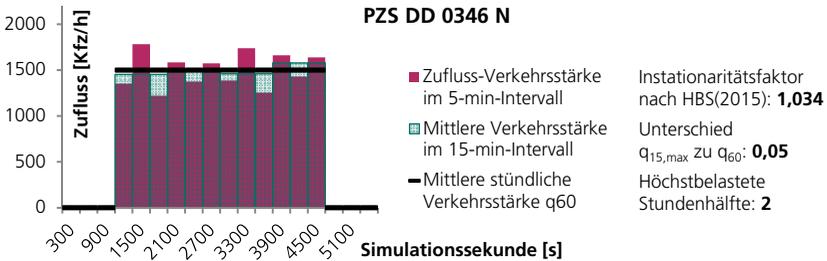
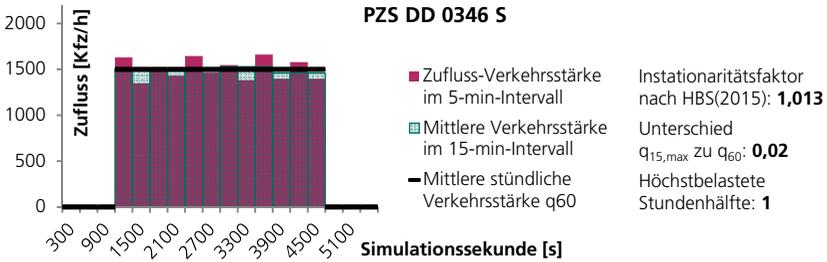
**Tabelle und Abbildungen A-19: Profil 7 – konstant**

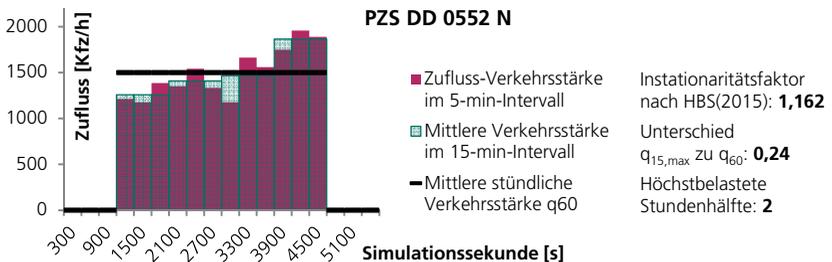
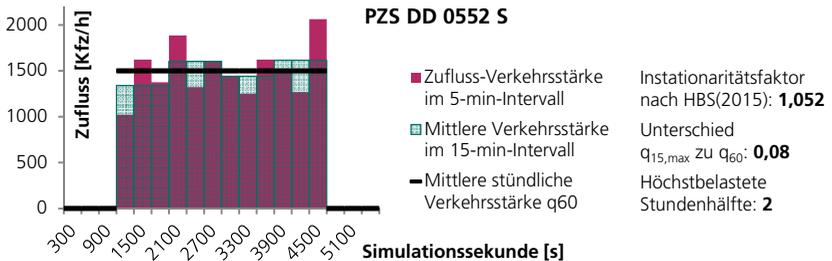
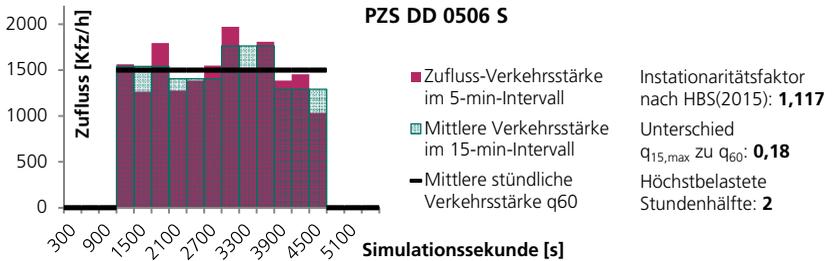
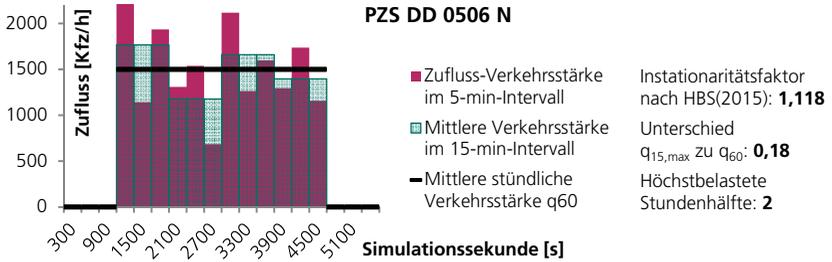
Variante	Auslastungsgrad $\alpha$	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS(2015) [s/Kfz]	Abweichung HBS(2015) gegenüber Simulation	$f_{fin}$ ideal	$f_{fin}$ NEU	Wartezeit nach HBS(2015) NEU [s/Kfz]	Abweichung BS – Sim NEU	Abweichung $f_{fin}$ ideal zu $f_{fin}$ NEU
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	16,40	14,87	-9%	0,976	0,973	12,50	-24%	-0,31%
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	18,40	23,93	30%	0,944	0,972	17,79	-3%	2,93%
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	23,95	30,76	28%	0,944	0,972	26,74	12%	3,06%
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	30,21	83,35	176%	0,899	0,970	55,71	84%	7,91%
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	19,27	19,43	1%	0,999	0,972	15,84	-18%	-2,70%
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	25,96	46,34	79%	0,961	0,970	29,20	12%	1,00%
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	31,22	39,25	26%	0,991	0,971	31,92	2%	-2,01%
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	41,33	62,15	50%	0,977	0,970	43,63	6%	-0,71%
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	37,90	38,04	0%	1,031	0,972	31,30	-17%	-5,70%
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	54,18	53,73	-1%	1,016	0,971	41,68	-23%	-4,50%
Mittelwert		29,88	41,18	38%			30,63	3,09%	-0,10%

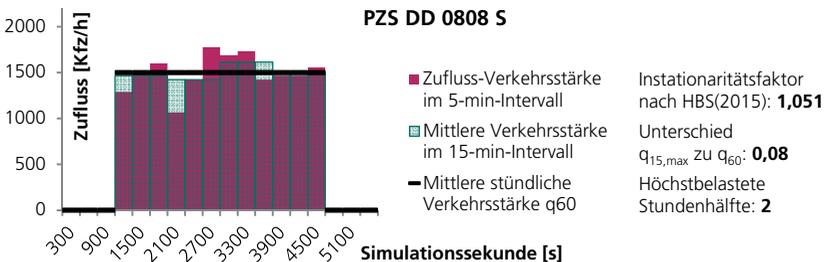
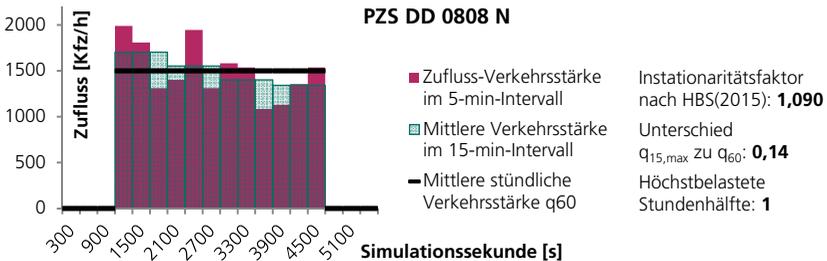
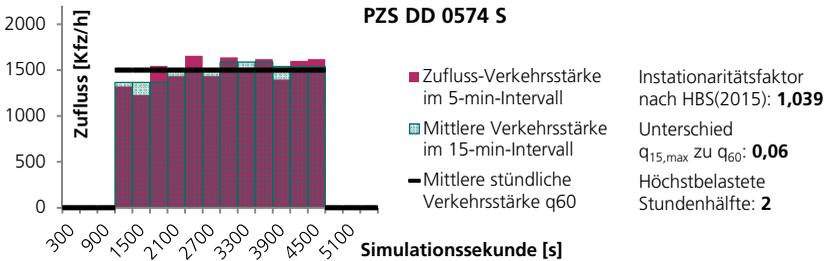
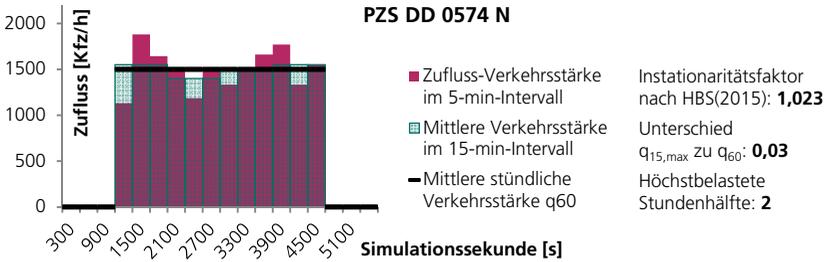


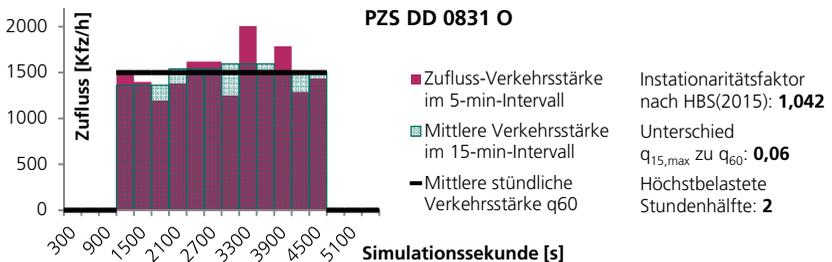
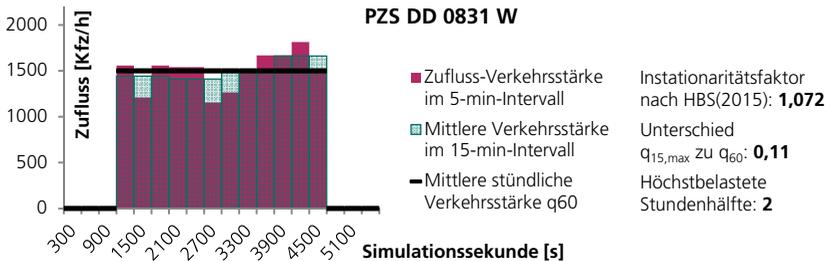
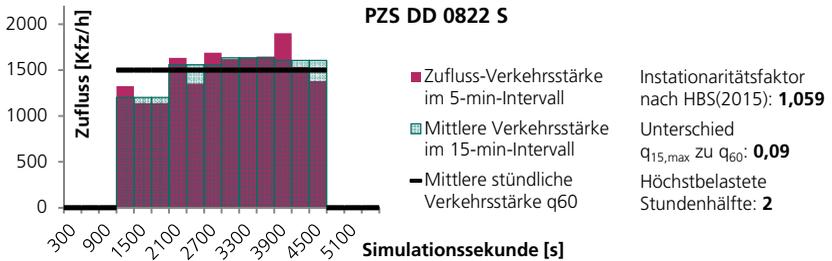
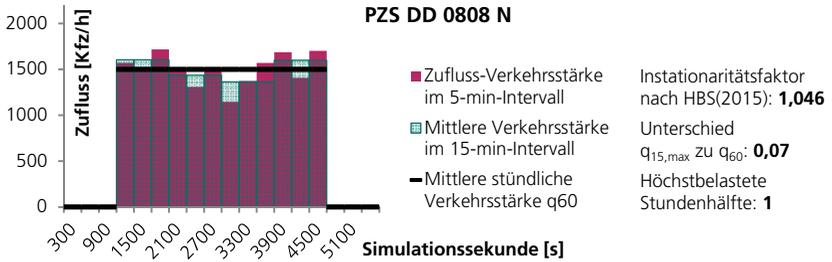
Abbildungen A-20 bis A-53: Zuflussprofile der Pegelzählstellen Dresden, normiert auf eine stündliche Verkehrsstärke von 1500 Kfz/h

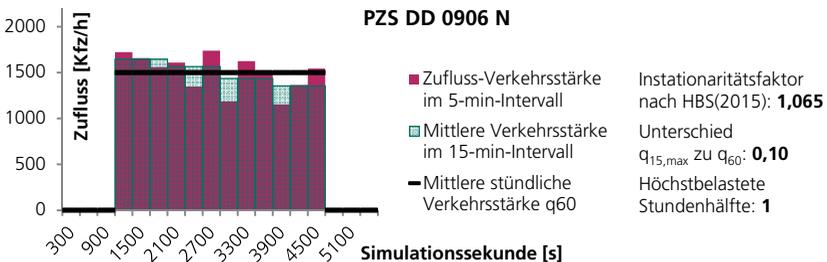
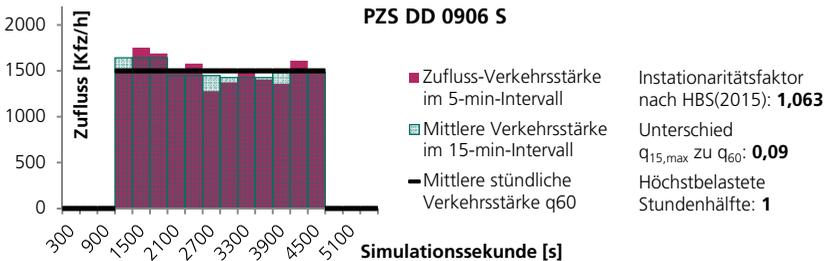
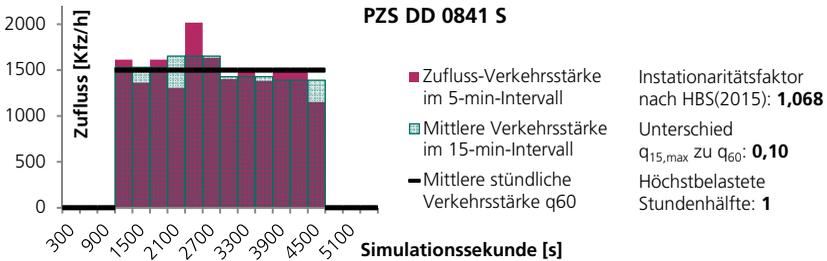
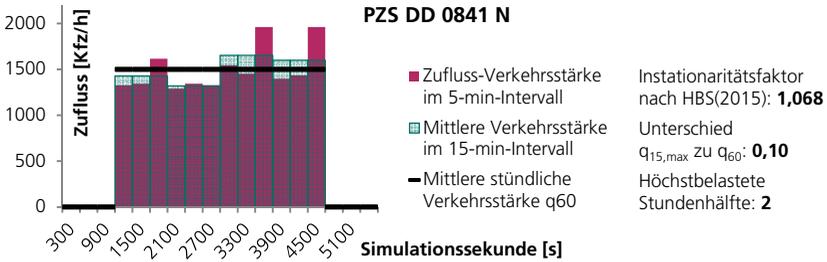


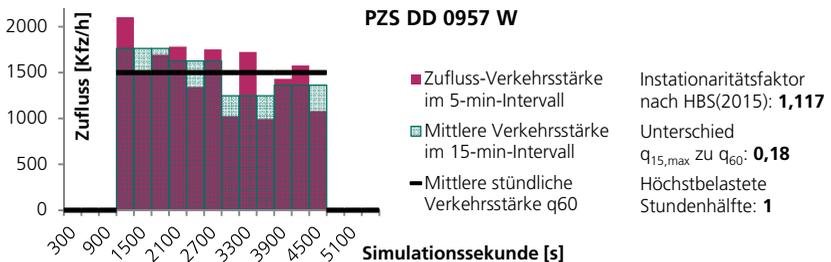
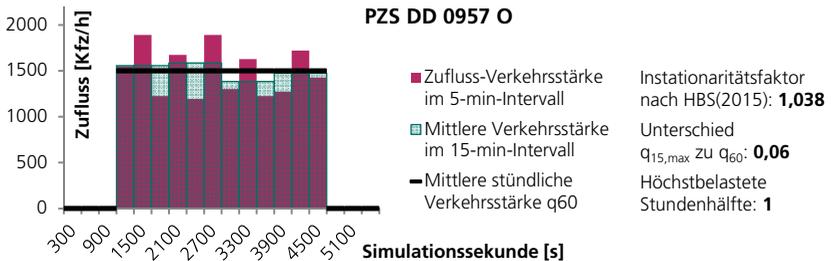
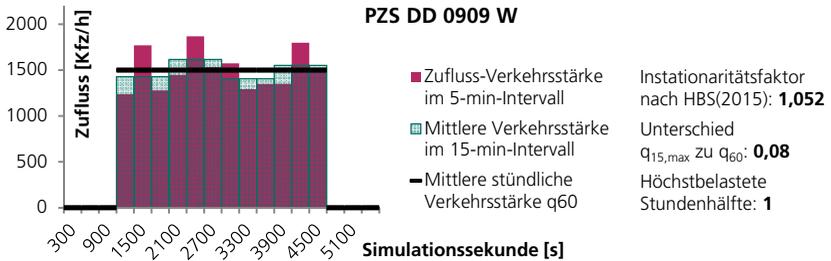
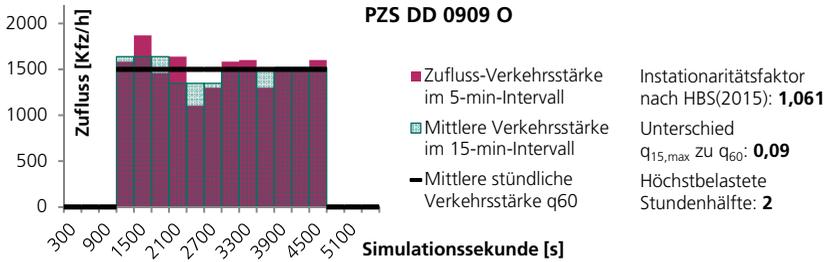


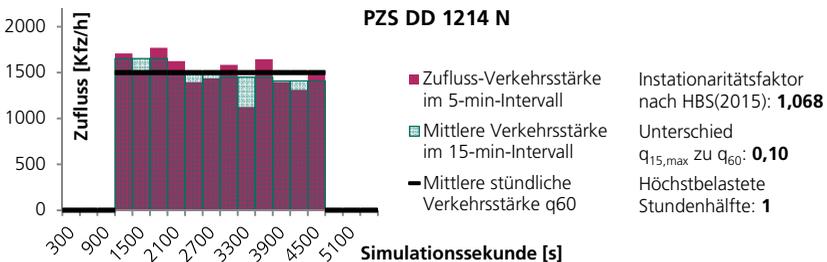
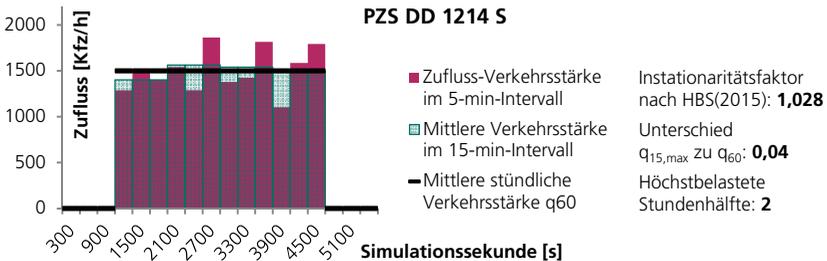
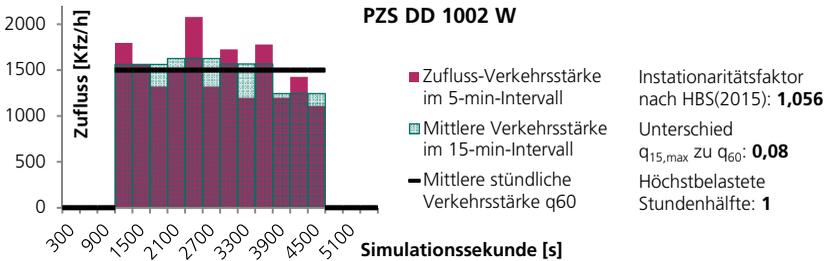
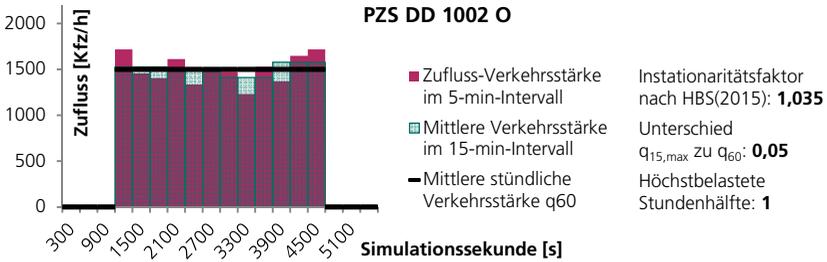


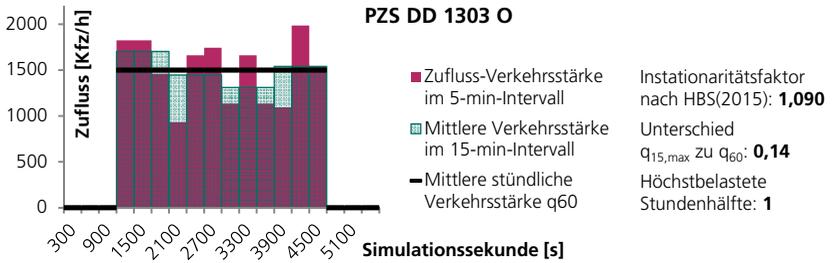
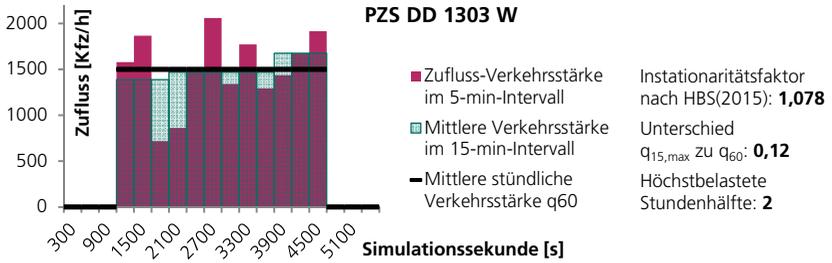




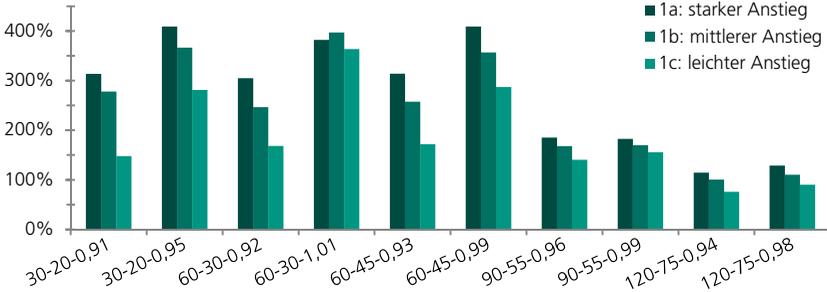




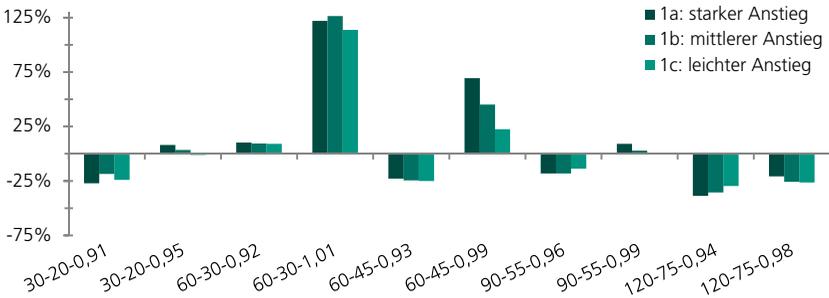




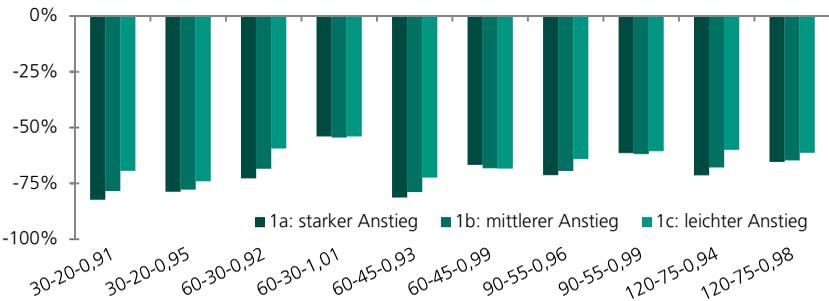
### Abweichungen der Wartezeiten für die Profiltypen 1 (Anstieg)



### Abweichungen der Wartezeit nach HBS (2015) zu den Verlustzeiten aus der Simulation

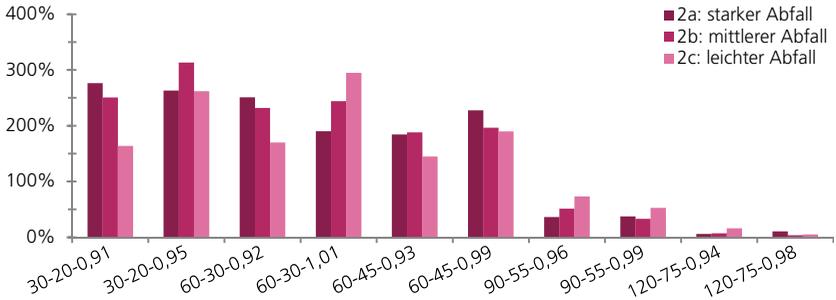


### Abweichungen der Wartezeiten mit dem neuen IF zu den Verlustzeiten aus der Simulation

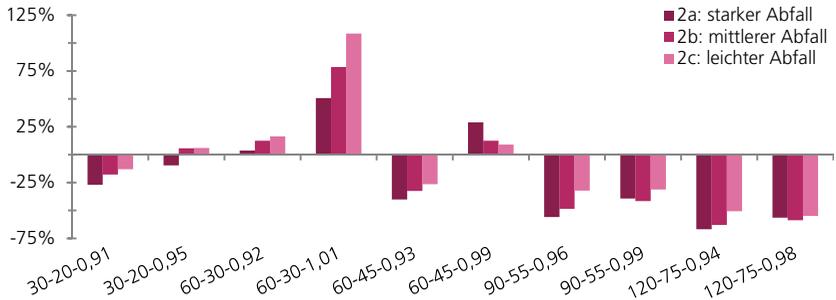


### Abweichungen der Wartezeiten mit dem neuen IF zu denjenigen nach HBS (2015)

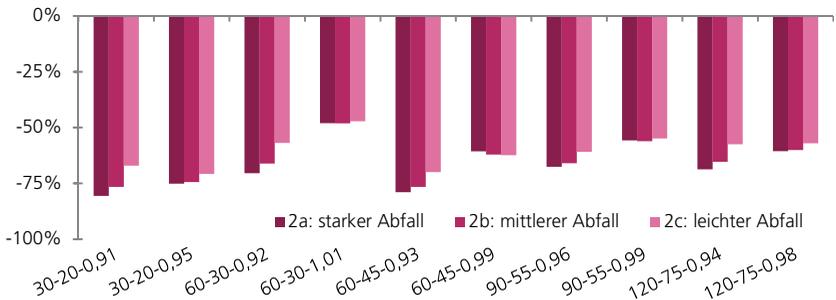
### Abweichungen der Wartezeiten für die Profiltypen 2 (Abfall)



### Abweichungen der Wartezeit nach HBS (2015) zu den Verlustzeiten aus der Simulation

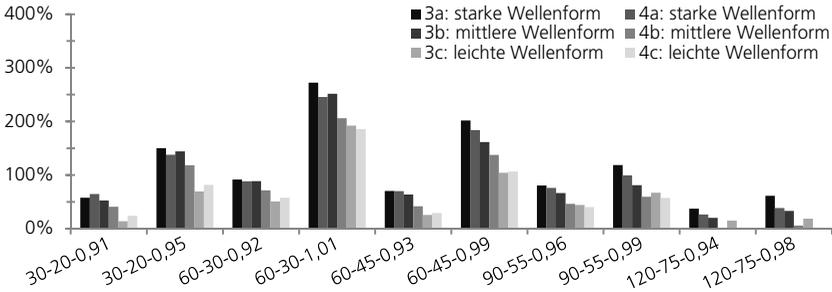


### Abweichungen der Wartezeiten mit dem neuen IF zu den Verlustzeiten aus der Simulation

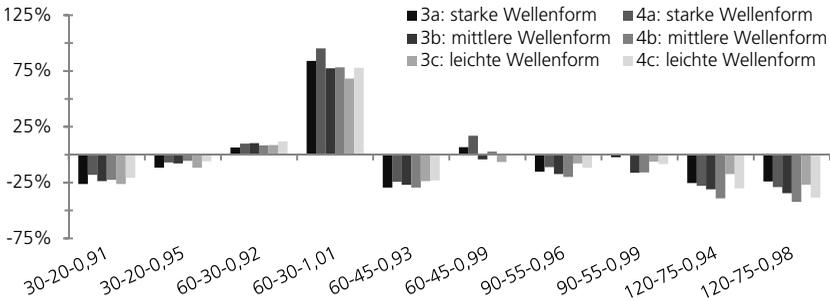


### Abweichungen der Wartezeiten mit dem neuen IF zu denjenigen nach HBS (2015)

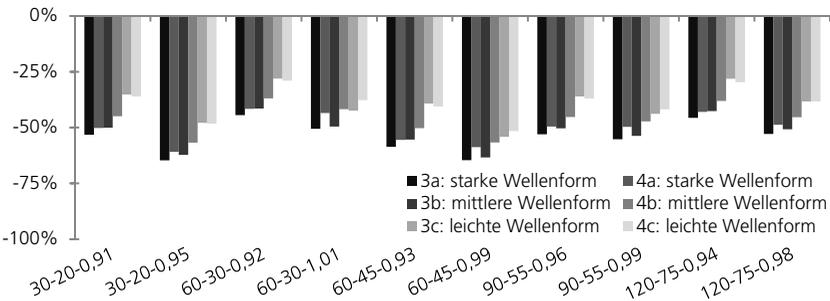
### Abweichungen der Wartezeiten für die Profiltypen 3 und 4 (Wellenprofil)



### Abweichungen der Wartezeit nach HBS (2015) zu den Verlustzeiten aus der Simulation

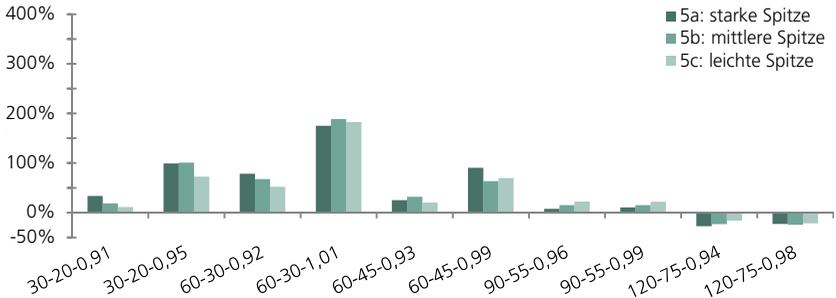


### Abweichungen der Wartezeiten mit dem neuen IF zu den Verlustzeiten aus der Simulation

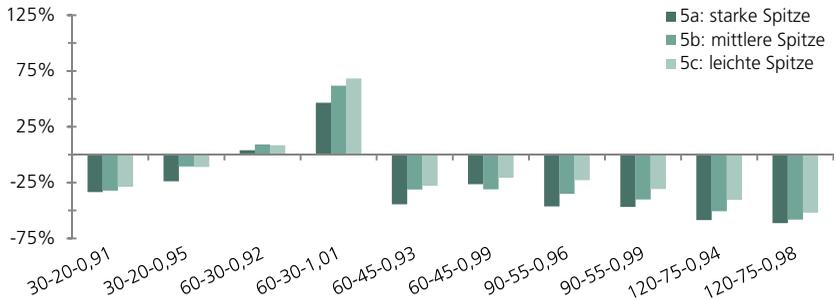


### Abweichungen der Wartezeiten mit dem neuen IF zu denjenigen nach HBS (2015)

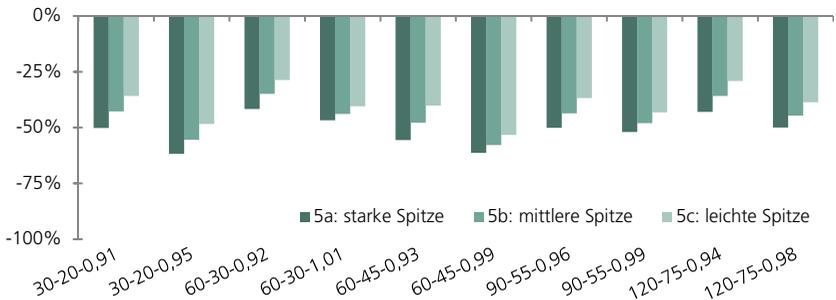
### Abweichungen der Wartezeiten für die Profiltypen 5 (Spitze)



### Abweichungen der Wartezeit nach HBS (2015) zu den Verlustzeiten aus der Simulation

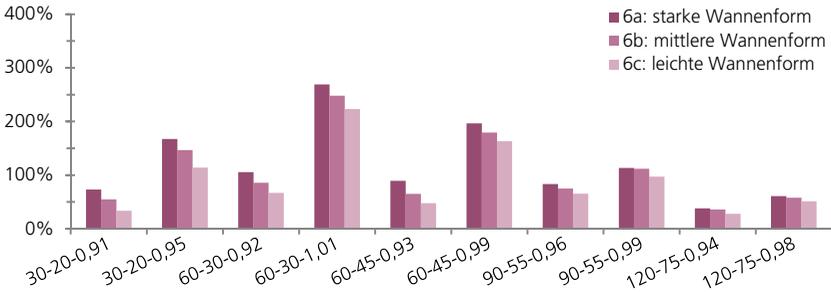


### Abweichungen der Wartezeiten mit dem neuen IF zu den Verlustzeiten aus der Simulation

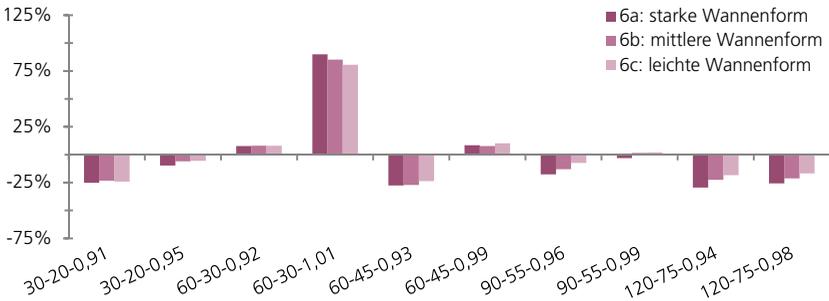


### Abweichungen der Wartezeiten mit dem neuen IF zu denjenigen nach HBS (2015)

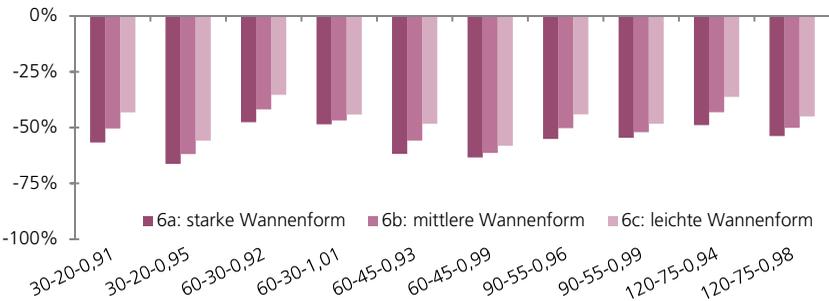
### Abweichungen der Wartezeiten für die Profiltypen 6 (Wannenform)



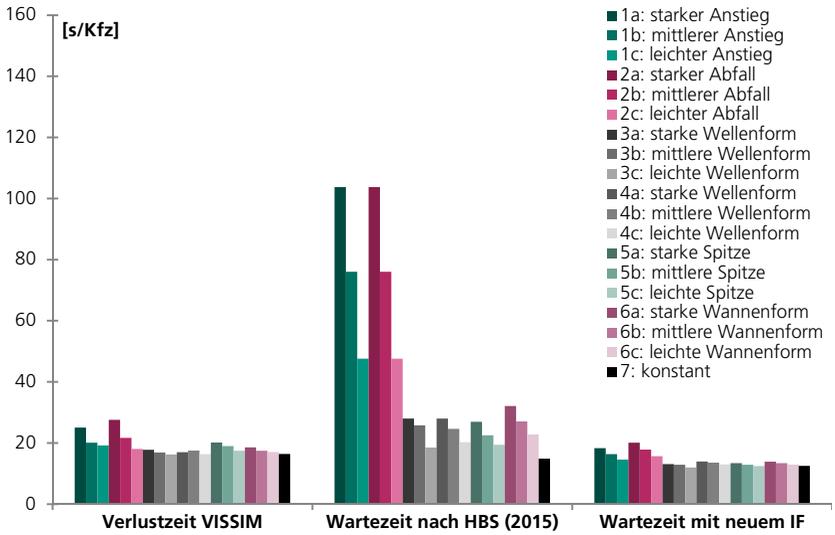
### Abweichungen der Wartezeit nach HBS (2015) zu den Verlustzeiten aus der Simulation



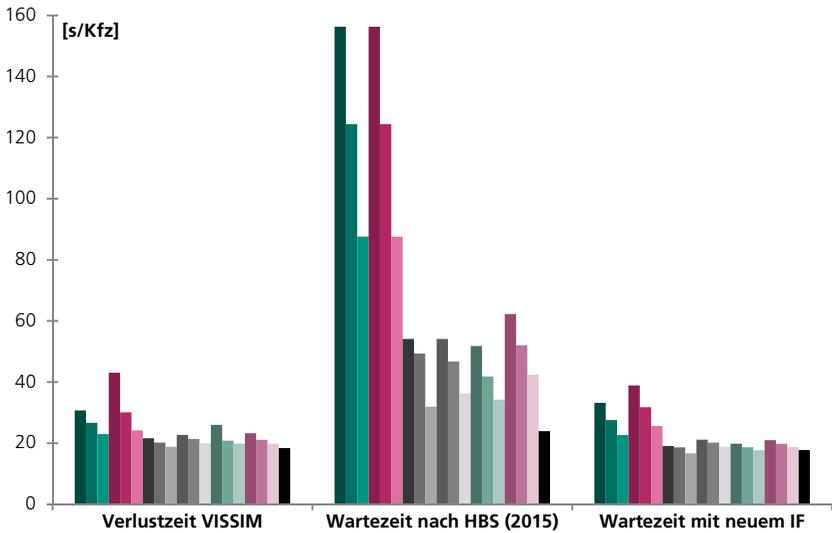
### Abweichungen der Wartezeiten mit dem neuen IF zu den Verlustzeiten aus der Simulation



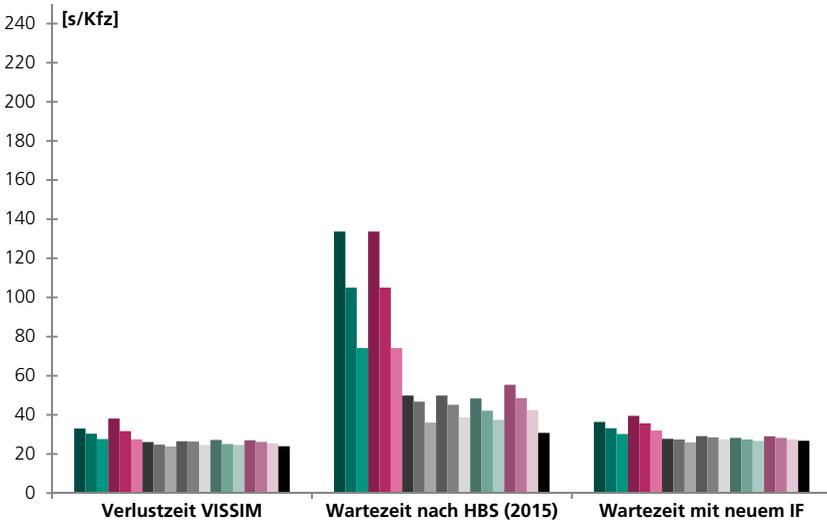
### Abweichungen der Wartezeiten mit dem neuen IF zu denjenigen nach HBS (2015)



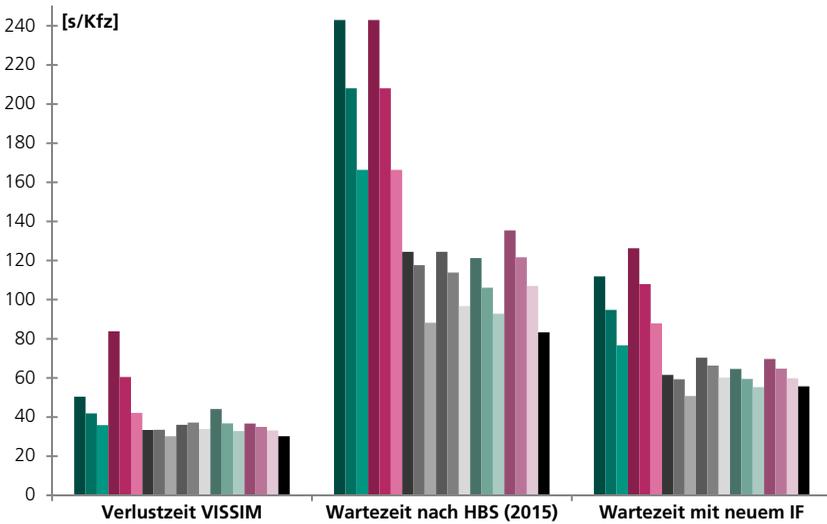
Warte- und Verlustzeiten, Szenario I (30-20-0,91)



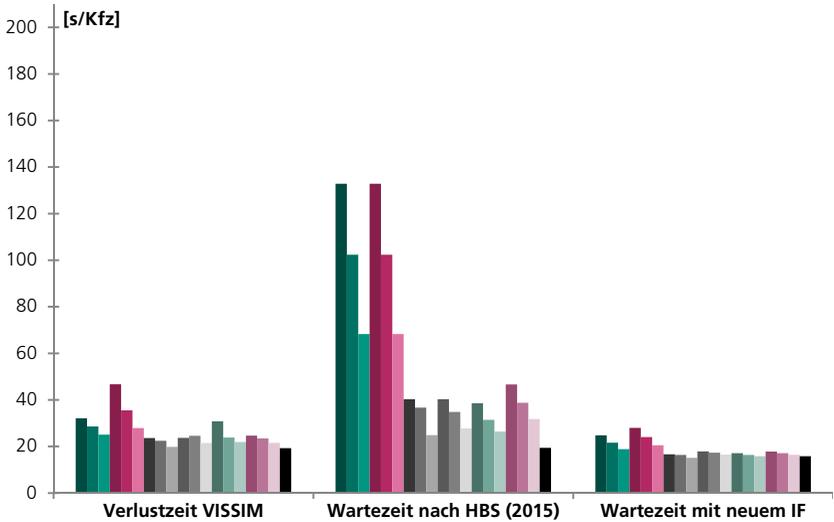
Warte- und Verlustzeiten, Szenario II (30-20-0,95)



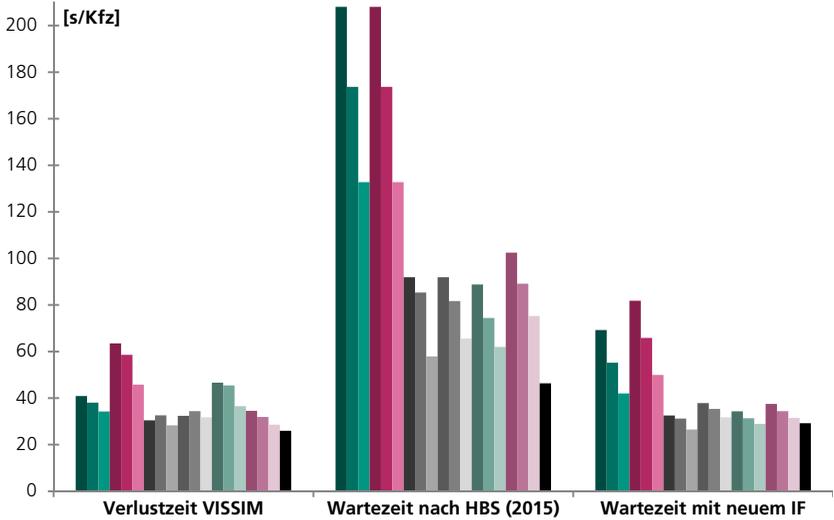
Warte- und Verlustzeiten, Szenario III (60-30-0,92)



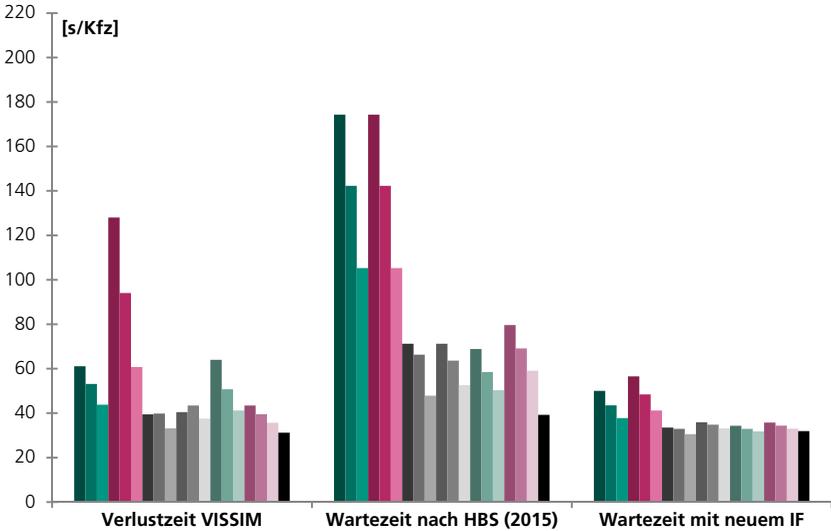
Warte- und Verlustzeiten, Szenario IV (60-30-1,01)



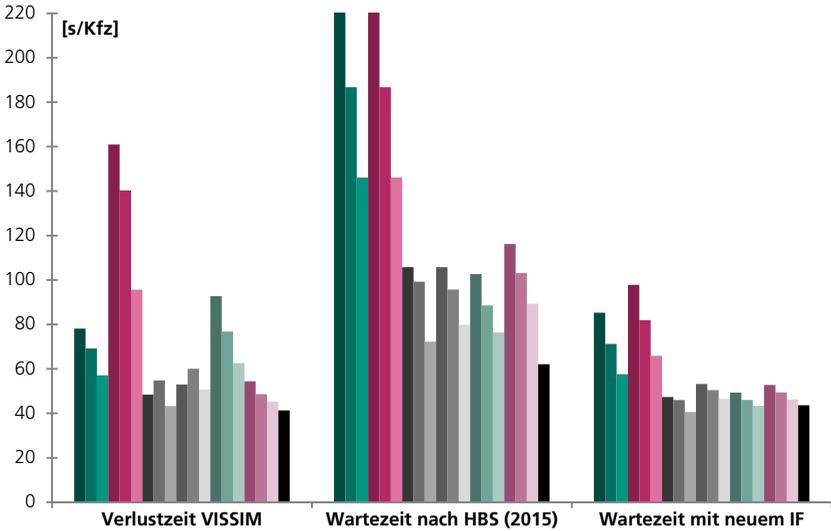
Warte- und Verlustzeiten, Szenario V (60-45-0,93)



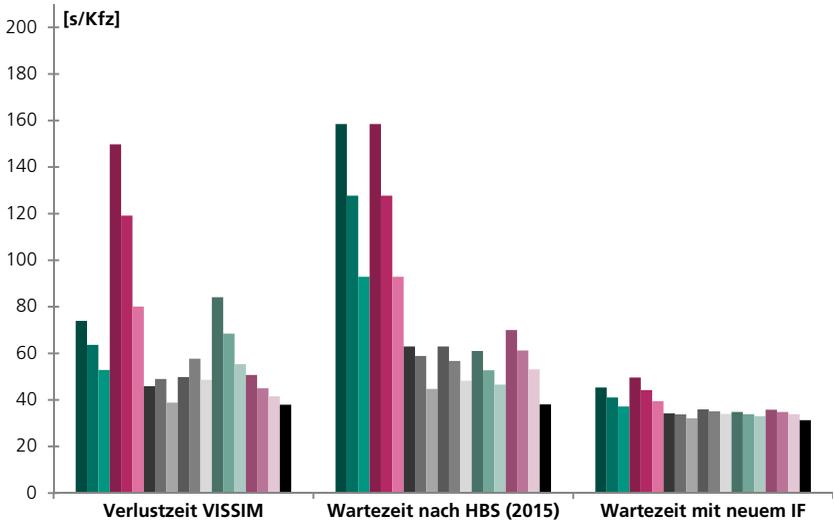
Warte- und Verlustzeiten, Szenario VI (60-45-0,99)



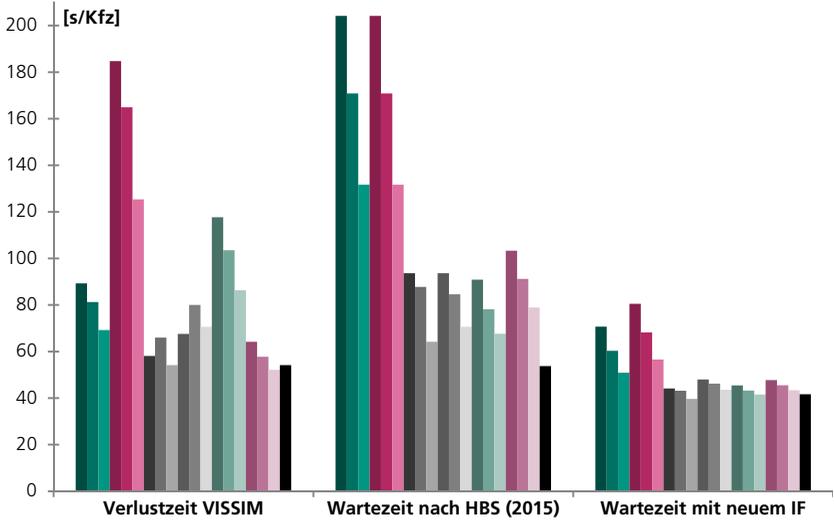
Warte- und Verlustzeiten, Szenario VII (90-45-0,96)



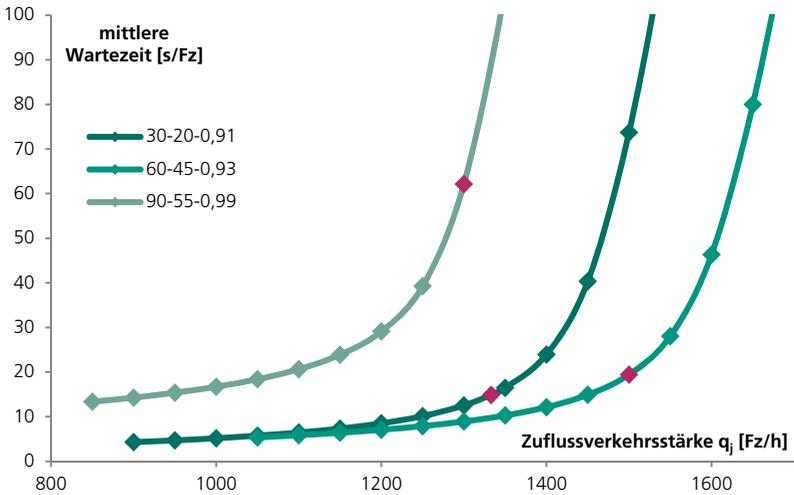
Warte- und Verlustzeiten, Szenario VIII (90-45-0,99)



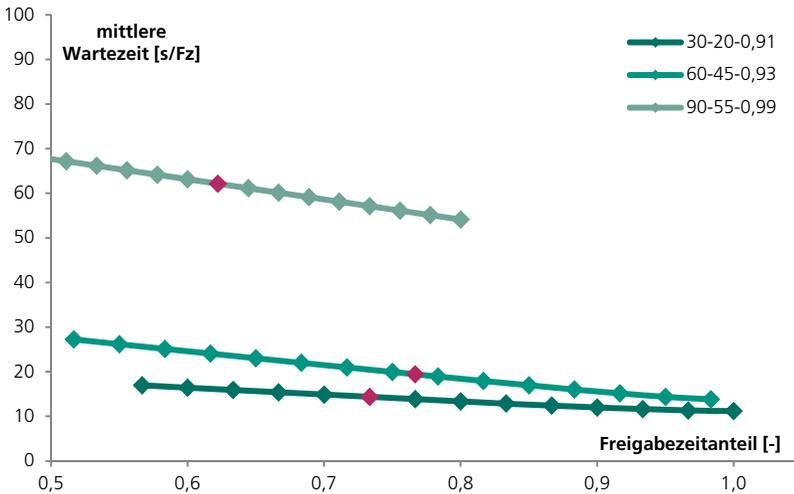
Warte- und Verlustzeiten, Szenario IX (120-75-0,94)



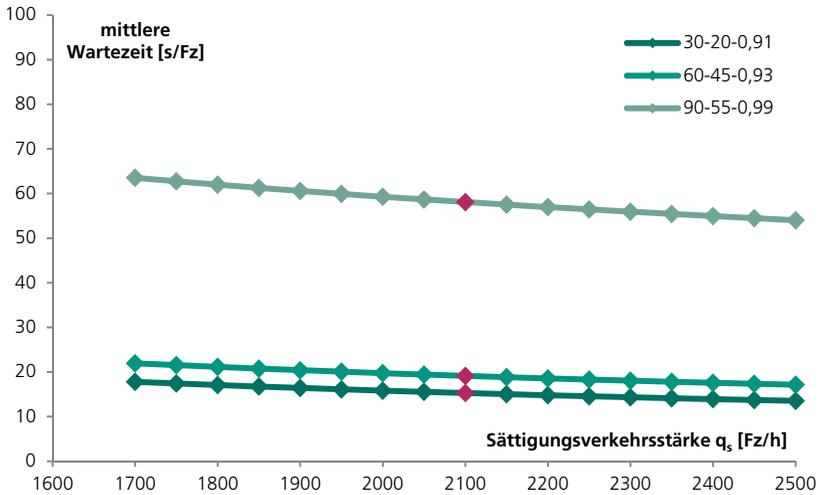
Warte- und Verlustzeiten, Szenario X (120-75-0,98)



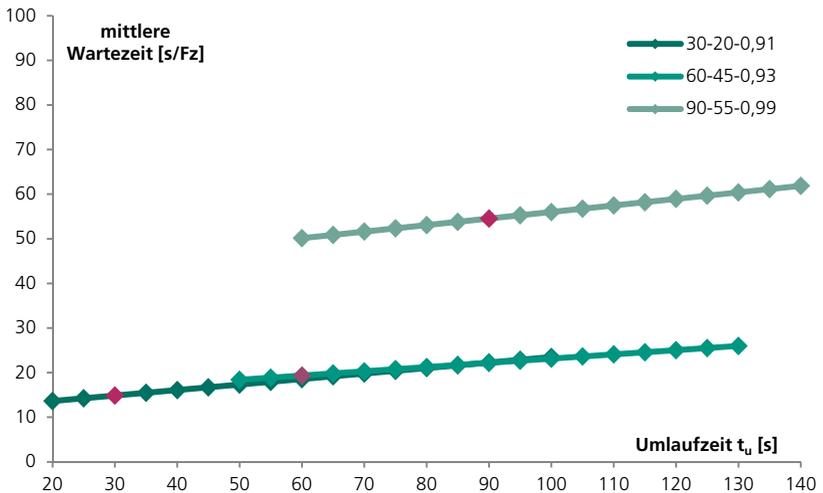
Elastizitätskurven der Wartezeit nach HBS (2015) in Abhängigkeit von der Zuflussverkehrsstärke (markiert: „Startpunkt“ des jeweiligen Szenario)



Elastizitätskurven der Wartezeit nach HBS (2015) in Abhängigkeit vom Freigabezeitanteil (markiert: „Startpunkt“ des jeweiligen Szenario)



Elastizitätskurven der Wartezeit nach HBS (2015) in Abhängigkeit von der Sättigungsverkehrsstärke (markiert: „Startpunkt“ des jeweiligen Szenario)



Elastizitätskurven der Wartezeit nach HBS (2015) in Abhängigkeit von der Umlaufzeit (markiert: „Startpunkt“ des jeweiligen Szenario)