



Ermittlung des Zusammenhangs von Infrastruktur und Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs für den Verkehrsträger Straße

Schlussbericht

März 2014

Prof. Dr.-Ing. Justin Geistefeldt

Dipl.-Ing. Sandra Hohmann

Prof. Dr.-Ing. habil. Ning Wu

Forschungsauftrag FE 24.0019/2012
des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Untersuchungsansatz.....	4
3	Theoretische Grundlagen.....	6
4	Untersuchungsmethodik.....	9
4.1	Ermittlung von Reisezeitverlusten durch makroskopische Simulationen	9
4.1.1	Untersuchungsstrecken.....	9
4.1.2	Ganzjahresanalyse.....	10
4.1.3	Ermittlung der Verkehrsnachfrage.....	10
4.1.4	Kapazität.....	12
4.1.5	Umfang der Simulationsrechnungen.....	13
4.2	Empirische Reisezeitverluste von Bundesautobahnen.....	13
4.2.1	Datengrundlage	13
4.2.2	Datenauswertung	14
5	Modellentwicklung anhand makroskopischer Simulationen.....	16
5.1	Elementbezogener Zusammenhang.....	16
5.2	Routenbezogener Zusammenhang	20
6	Validierung anhand empirischer Reisezeiten.....	23
7	Modellspezifikation für die BVWP-Maßnahmenbewertung.....	26
7.1	Eigenschaften der entwickelten Modellfunktion.....	26
7.2	Einfluss der Streckenlänge	27
7.3	Modellspezifikation.....	28
8	Zusammenfassung.....	30
	Literatur.....	32

1 Einleitung

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Investitionen in die Straßeninfrastruktur ist die Veränderung der Reisezeiten eine maßgebende Nutzenkomponente. Konventionelle Bewertungsansätze (z. B. EWS, FGSV, 1997) basieren in der Regel auf einer Beschreibung der im Mittel zu erwartenden Reisezeit in bestimmten Zeitintervallen. In den vergangenen Jahren hat sich allerdings die Erkenntnis durchgesetzt, dass darüber hinaus auch die Zuverlässigkeit eine maßgebende Nutzenkomponente darstellt. Unter der Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs wird im Allgemeinen die Übereinstimmung der tatsächlichen Verkehrsqualität mit den Erwartungen des Verkehrsteilnehmers verstanden. Der Wissenschaftliche Beirat beim BMVBS (2009) definiert die Zuverlässigkeit als „Wahrscheinlichkeit, mit der das betrachtete Verkehrssystem oder eine Teilkomponente eine definierte Mindestqualität gewährleistet“. Die (Un-)Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs wird durch das Ausmaß der Variabilität der Reisezeit repräsentiert. Unabsehbare Reisezeitverzögerungen führen dazu, dass das Reiseziel entweder verspätet erreicht wird oder dass ein Zeitpuffer zusätzlich zur erwarteten Reisezeit eingeplant werden muss, um das Ziel mit einer hohen Wahrscheinlichkeit pünktlich zu erreichen. Sowohl ein unpünktliches Eintreffen am Zielort als auch der zusätzliche Zeitaufwand durch den Reisezeitpuffer verursachen volkswirtschaftliche Kosten, sofern ein termingebundener Anlass der Fahrt vorliegt und ein pünktliches Erreichen des Zielorts erforderlich ist. Dies betrifft z. B. Just-in-Time-Transporte im Güterverkehr sowie Berufspendler mit festen Arbeitszeiten im Personenverkehr.

Für die Bewertung der Maßnahmen im Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2015 soll die Zuverlässigkeit als zusätzliche Nutzenkomponente berücksichtigt werden. Als maßgebende Zuverlässigkeitskenngröße wurde in einer Vorstudie (SIGNIFICANCE et al., 2012) die Standardabweichung der Reisezeit¹ festgelegt. Gegenstand der vorliegenden Untersuchung ist die Ermittlung des Mengengerüsts zur Bewertung der Zuverlässigkeit für den Verkehrsträger Straße. Dabei wird ein Modellansatz zur Ermittlung der Standardabweichung der Reisezeit als Kenngröße der Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs in Abhängigkeit von den relevanten Parametern der Straßeninfrastruktur entwickelt. Der Modellansatz soll einerseits eine möglichst repräsentative Beschreibung der Standardabweichung der Reisezeit als Maß der Zuverlässigkeit ermöglichen. Andererseits ist die Anwendbarkeit des Ansatzes für die Bewertung der Maßnahmen des BVWP zu berücksichtigen, so dass gewisse Vereinfachungen aufgrund der Komplexität des für die Bewertung der BVWP-Maßnahmen verwendeten Verkehrsmodells unumgänglich sind.

Kapitel 2 des vorliegenden Berichts fasst den Untersuchungsansatz zusammen. In Kapitel 3 werden die modelltheoretischen Grundlagen für die Beschreibung der Reisezeit auf Strecken und Routen erläutert. Kapitel 4 stellt die Methodik der Untersuchung dar. In Kapitel 5 werden anhand makroskopischer Simulationen Modellzusammenhänge zur Beschreibung der Zuverlässigkeit der Reisezeit entwickelt. Darüber hinaus wird die statistische Abhängigkeit der Reisezeit in aufeinander folgenden Streckenabschnitten durch eine Korrelationsanalyse untersucht. In Kapitel 6 werden die Modellzusammenhänge durch empirische Reisezeitdaten des hessischen Autobahnnetzes validiert. Kapitel 7 behandelt abschließend die Spezifikation des Modells für die BVWP-Maßnahmenbewertung und erörtert Fragen der Modell-anwendung.

¹ Analog zur Vorstudie wird in der vorliegenden Untersuchung der Begriff „Reisezeit“ synonym zum Begriff „Fahrzeit“ gemäß den *Begriffsbestimmungen – Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb* der FGSV verwendet.

2 Untersuchungsansatz

Die Reisezeit auf Autobahnen setzt sich i. A. aus der Reisezeit im fließenden Verkehr und den Reisezeitverlusten aufgrund von Überlastungen zusammen. Auf Landstraßen sind zusätzlich die Wartezeiten an plangleichen Knotenpunkten zu berücksichtigen. Während die Reisezeit im fließenden Verkehr von der Länge der Strecke abhängig ist, treten Reisezeitverluste punktuell an Engpässen auf. Dabei kann es sich um dauerhafte (bauliche) oder temporäre Engpässe, z. B. an Unfallstellen oder Baustellen, handeln. Hinsichtlich der Standardabweichung der Reisezeit kann analog unterschieden werden zwischen Schwankungen der Reisezeit im fließenden Verkehr und Schwankungen, die sich durch Übergänge vom fließenden in den gestauten Verkehr ergeben. Vor allem auf Autobahnen ist das Ausmaß der Schwankungen der (mittleren) Reisezeit im fließenden Verkehr im Vergleich zu den Auswirkungen von Überlastungen aufgrund permanenter oder temporärer Engpässe gering. Zudem ist die individuelle Reisezeit im fließenden Verkehr durch das Geschwindigkeitsverhalten des einzelnen Verkehrsteilnehmers beeinflussbar. Insofern sind für die modellbasierte Beschreibung der Standardabweichung der Reisezeit als Grundlage für die Bewertung von Investitionsmaßnahmen des BVWP vor allem Verkehrszustände bei hohen Auslastungsgraden mit einem hohen Überlastungsrisiko relevant. Daher wird in der vorliegenden Untersuchung ausschließlich die Variabilität der überlastungsbedingten Reisezeitverluste unter Vernachlässigung der Variabilität der Reisezeit aufgrund von Geschwindigkeitsdifferenzen im fließenden Verkehr betrachtet. Dies hat zudem für die Modellentwicklung und -anwendung den Vorteil, dass für die Ermittlung der Standardabweichung der Reisezeit keine Differenzierung nach Fahrzeugarten erforderlich ist, weil die überlastungsbedingten Reisezeitverluste für Pkw und Lkw – im Gegensatz zu den Reisezeiten im fließenden Verkehr – als gleich groß angesehen werden können.

Überlastungen auf Landstraßen, die nicht planfrei geführt sind, entstehen in der Regel an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage oder vorfahrtrechtlicher Unterordnung. Die Kapazität der Knotenpunkte ist dabei vor allem von der Stärke des Querverkehrs und ggf. der Effizienz der Lichtsignalsteuerung abhängig. Da diese Einflüsse im Rahmen der BVWP-Maßnahmenbewertung nicht im Detail abgebildet und auch bei empirischen Reisezeitanalysen nur mit sehr hohem Aufwand erfasst werden können, wird das Modell zur Beschreibung der Variabilität der Reisezeit in der vorliegenden Untersuchung auf der Grundlage der Verkehrsdaten von Autobahnen entwickelt. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Landstraßen wird in Kapitel 7 erörtert.

Der Untersuchungsansatz geht von einer elementbezogenen Analyse von Reisezeiten auf einzelnen Streckenabschnitten aus. Anhand der elementbezogen ermittelten Standardabweichungen der Reisezeit auf den einzelnen Streckenabschnitten im Verlauf einer Route kann anschließend die routenbezogene Standardabweichung rechnerisch ermittelt werden.

Als Bezugsgröße für das zu entwickelnde Modell zur Beschreibung der Standardabweichung der Reisezeit wird im Hinblick auf die Modellanwendung im Rahmen der BVWP-Maßnahmenbewertung der Auslastungsgrad verwendet. Für die Modellvalidierung und den Vergleich mit anderen Untersuchungen werden zusätzlich die Zusammenhänge zwischen dem Auslastungsgrad und dem Mittelwert der Reisezeitverluste sowie zwischen dem Mittelwert und der Standardabweichung der Reisezeitverluste betrachtet. Der Auslastungsgrad wird als Quotient der Verkehrsnachfrage und der jeweiligen Bemessungskapazität nach HBS (FGSV, 2012) ermittelt. Die Bemessungskapazität bildet dabei die für den Verkehrsablauf relevanten Parameter der Straßeninfrastruktur ab. Somit ist es möglich, die Standardabweichung der Reisezeit durch ein einheitliches Modell ohne Differenzierung der Streckenparameter herzuleiten. Zu beachten ist, dass die Bemessungskapazität eine deterministische Größe darstellt, die nur von systematischen Einflussfaktoren abhängt. Da die tatsächliche Kapazität einer Autobahn u. a. durch die Zufälligkeit des Verkehrsablaufs, der Verkehrszusammensetzung und des individuellen Verhaltens der Fahrzeugführer stochastischen Schwankungen unterworfen ist, können Überlastungen auch bereits bei einem – auf die Bemessungskapazität bezogenen – Auslastungsgrad unter 1 entstehen.

Für die Bewertung der Zuverlässigkeit im Rahmen der Bundesverkehrswegeplanung sind im Wesentlichen die Auswirkungen dauerhafter Engpässe aufgrund einer unzureichenden baulichen Kapazität der Verkehrsinfrastruktur relevant. Darüber hinaus wirken sich aber auch temporäre Engpässe durch Unfälle und Baustellen auf das Überlastungsgeschehen und damit die Variabilität der Reisezeit aus. Im Gegensatz zur baulichen Kapazität der Verkehrsinfrastruktur sind Unfälle und Baustellen als betriebliche Einflüsse anzusehen, deren Auswirkungen nicht oder nur indirekt durch einen Ausbau der Infrastruktur, sondern in erster Linie durch ein effektives Verkehrsmanagement verändert werden können. Wegen der

fehlenden Relevanz für die BVWP-Maßnahmenbewertung werden die Auswirkungen von Unfällen und Baustellen bei der Entwicklung des Modells zur Beschreibung der Zuverlässigkeit der Reisezeit in der vorliegenden Untersuchung nicht mit einbezogen.

Grundlage der Modellentwicklung sind makroskopische Simulationen des Verkehrsablaufs mit dem Programm KAPASIM. Das Programm berechnet die aus Überlastungen resultierenden Reisezeitverluste durch einen Vergleich von Ganglinien der Verkehrsnachfrage und der Kapazität unter Verwendung eines Warteschlangenmodells. Die Verkehrsnachfrage und die Kapazität werden dabei als Zufallsgrößen modelliert. Durch eine große Zahl von Wiederholungen der Simulation mit unterschiedlichen Startzufallszahlen wird die Variabilität der Reisezeitverluste in jeder Stunde des Jahres nachgebildet. Mit dem Modell ist es möglich, die Verkehrsnachfrage, die in der Realität bei einer Überlastung nicht messbar ist, als Bezugsgröße für die Modellierung der Standardabweichung der Reisezeitverluste zugrunde zu legen. Darüber hinaus kann die Verkehrsnachfrage so variiert werden, dass die gesamte Bandbreite möglicher Auslastungsgrade nachgebildet wird.

Die Anwendung des Simulationsprogramms KAPASIM erfolgt für 50 Strecken von Autobahnen, die bereits in einer früheren Untersuchung für die Entwicklung eines Modells zur Ermittlung von Reisezeitverlusten für die zukünftigen Richtlinien für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (RWS) analysiert wurden (vgl. GEISTEFELDT et al., 2012). Das für die RWS entwickelte Modell basiert auf einer Analyse des Mittelwertes der Summe der Reisezeitverluste, die durch Überlastungen in einzelnen Stunden-Intervallen verursacht werden (einschließlich der Auswirkungen der Überlastung auf nachfolgende Intervalle). In der vorliegenden Untersuchung werden dagegen der Mittelwert und die Standardabweichung der in den Intervallen angefallenen Reisezeitverluste bezogen auf ein einzelnes Fahrzeug betrachtet. Die in einer Stunde angefallenen Reisezeitverluste können dabei auch auf Staus zurückzuführen sein, die durch eine zu hohe Verkehrsnachfrage in einer der vorangegangenen Stunden ausgelöst wurden und sich noch nicht wieder vollständig abgebaut haben. Dies bedeutet, dass auch bei mittleren Auslastungsgraden Reisezeitverluste auftreten können, die auf Überlastungen in den vorangegangenen Stunden zurückzuführen sind.

Zur Validierung des entwickelten Modells werden empirische Reisezeitverluste von Autobahnen aus dem System ASDA/FOTO ausgewertet, die auf der Grundlage der Daten von Dauerzählstellen abschnittsbezogen ermittelt wurden. Diese Daten liegen für das gesamte Netz der Bundesautobahnen in Hessen über einen Zeitraum von einem Jahr vor. Zusätzlich werden Baustellen- und Unfalldaten herangezogen, um temporäre Einflüsse auf die Kapazität und das Überlastungsgeschehen möglichst weitgehend aus der Analyse auszuschließen.

3 Theoretische Grundlagen

Die Reisezeit über eine Route setzt sich aus den Reisezeiten der Teilstrecken zusammen (vgl. Bild 3-1).

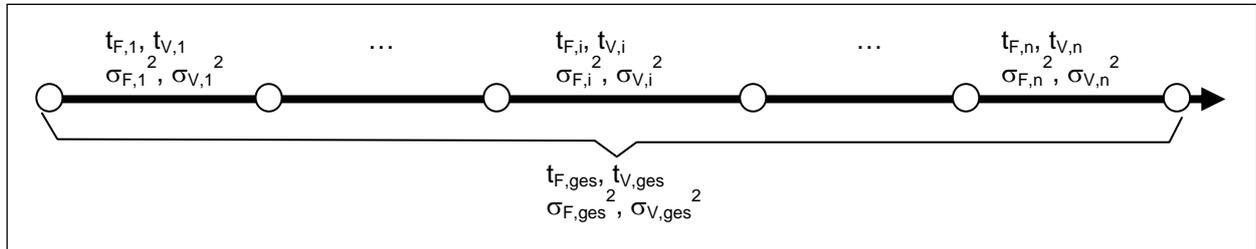


Bild 3-1: Zusammensetzung der Reisezeit und der Varianz über eine Route mit mehreren Teilstrecken

Die Reisezeit t_R innerhalb einer Teilstrecke kann i. A. als Summe der Reisezeit im fließenden Verkehr t_F und der Verlustzeit t_V betrachtet werden. Die Reisezeit im fließenden Verkehr t_F ist von der Länge L der Strecke und der Reisegeschwindigkeit V_0 abhängig. Die Verlustzeit t_V ist von der Verkehrsstärke q und von der Kapazität C der betrachteten Strecke abhängig. Es gilt:

$$t_R = t_F + t_V \quad (3-1)$$

Dabei sind t_R , t_F und t_V als Zufallsgrößen zu betrachten.

Die Reisezeit im fließenden Verkehr t_F entspricht dem Kehrwert der Reisegeschwindigkeit V_0 . Sie kann als erlang- oder normalverteilt betrachtet werden. Die Verlustzeit t_V entspricht ungefähr der Wartezeit nach der Warteschlangentheorie. Sie kann mit einer Exponential- oder einer Erlang-Verteilung beschrieben werden. Die Reisezeit t_R als Summe der Reisezeit im fließenden Verkehr t_F und der Verlustzeit t_V kann ebenfalls als erlang- oder normalverteilt betrachtet werden.

Es gilt für eine Route mit n Teilstrecken (vgl. Bild 3-1) für die Summe der Reisezeit:

$$t_{R,ges} = \sum_{i=1}^n t_{R,i} = \sum_{i=1}^n (t_{F,i} + t_{V,i}) \quad (3-2)$$

mit:

$t_{R,ges}$ = Reisezeit über die Gesamtroute

$t_{R,i}$ = Reisezeit auf der Teilstrecke i

$t_{F,i}$ = Reisezeit im fließenden Verkehr auf der Teilstrecke i

$t_{V,i}$ = Verlustzeit auf der Teilstrecke i

Für die einzelnen Teilstrecken sind die Reisezeit im fließenden Verkehr t_F und die Verlustzeit t_V entweder normal-, exponentiell- oder erlang-verteilt. Dann ist gemäß der Theorie der Wahrscheinlichkeitsrechnung und der Statistik die Varianz der Reisezeit $\sigma_{R,ges}^2$ über die Gesamtroute gleich der Summe der Varianzen aller Teilelemente $\sigma_{R,i}^2$, wenn die Teilstrecken als voneinander unabhängig betrachtet werden, d. h.:

$$\sigma_{R,ges}^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_{R,i}^2 = \sum_{i=1}^n (\sigma_{F,i}^2 + \sigma_{V,i}^2) \quad (3-3)$$

mit:

$\sigma_{R,ges}^2$ = Varianz der Reisezeit über die Gesamtroute

$\sigma_{R,i}^2$ = Varianz der Reisezeit auf der Teilstrecke i

$\sigma_{F,i}^2$ = Varianz der Reisezeit im fließenden Verkehr auf der Teilstrecke i

$\sigma_{V,i}^2$ = Varianz der Verlustzeit auf der Teilstrecke i

Die Reisezeiten t_R oder ihre Komponenten t_F und t_V zweier benachbarter Teilstrecken sind nicht immer voneinander unabhängig. Im Falle abhängiger benachbarter Teilstrecken gilt:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{R,ges}^2 &= \sum_{i=1}^n \sigma_{R,i}^2 + \sum_{i=1}^{n-1} (k_{R,i,i+1} \cdot \sigma_{R,i} \cdot \sigma_{R,i+1}) \\
 &= \sum_{i=1}^n \sigma_{F,i}^2 + \sum_{i=1}^{n-1} (k_{F,i,i+1} \cdot \sigma_{F,i} \cdot \sigma_{F,i+1}) + \sum_{i=1}^n \sigma_{V,i}^2 + \sum_{i=1}^{n-1} (k_{V,i,i+1} \cdot \sigma_{V,i} \cdot \sigma_{V,i+1}) \\
 &= \sum_{i=1}^n (\sigma_{F,i}^2 + \sigma_{V,i}^2) + \sum_{i=1}^{n-1} (k_{F,i,i+1} \cdot \sigma_{F,i} \cdot \sigma_{F,i+1} + k_{V,i,i+1} \cdot \sigma_{V,i} \cdot \sigma_{V,i+1})
 \end{aligned} \tag{3-4}$$

mit:

$k_{R,i,i+1}$ = Korrelationskoeffizient der Reisezeiten auf zwei benachbarten Teilstrecken

$k_{F,i,i+1}$ = Korrelationskoeffizient der Reisezeiten im fließenden Verkehr auf zwei benachbarten Teilstrecken

$k_{V,i,i+1}$ = Korrelationskoeffizient der Verlustzeiten auf zwei benachbarten Teilstrecken

Die Werte von $k_{R,i,i+1}$, $k_{F,i,i+1}$ und $k_{V,i,i+1}$ sind in der Regel sehr klein und können möglicherweise vernachlässigt werden.

Die Gesamtreisezeit $t_{R,ges}$ muss ebenfalls einer erlang-ähnlichen Verteilung entsprechen. Bei sehr großer Anzahl der Streckenabschnitte n ($n > 10$) kann sie auch in eine Normalverteilung übergehen. Die Werte der hier angeführten Zeiten t_R , t_F , t_V und deren Varianzen σ_R^2 , σ_F^2 , σ_V^2 können für die einzelnen Teilstrecken theoretisch modelliert oder durch Messungen oder Simulationen ermittelt werden. Dabei sind sowohl t_F als auch t_V vom Straßentyp der Teilstrecke und dem Auslastungsgrad abhängig. Durch die zusätzliche Betrachtung von Wartezeiten t_W an Knotenpunkten (analog zur Verlustzeit) kann auch der Einfluss von Knotenpunkten auf die Reisezeit berücksichtigt werden.

Die Varianz der Reisezeit σ_R^2 stellt ein Maß der (Un-) Zuverlässigkeit der Reisezeit dar. Die (Un-) Zuverlässigkeit kann in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke q , dem Auslastungsgrad $x = q / C$ oder der mittleren Reisezeit t_R beschrieben werden. Wenn die Reisezeiten und deren Varianzen der einzelnen Teilstrecken bekannt sind, kann die Reisezeit und deren Varianz der Gesamtroute durch Summenbildung berechnet werden.

Um das Verhalten der Gesamtreisezeit der Route gegenüber den Reisezeiten der einzelnen Teilstrecken zu untersuchen, werden N Teilstrecken mit einer Einheitslänge $L = 1$ und identischen t_R und σ_R^2 betrachtet. Daraus folgt:

$$t_{R,ges} = \sum_{i=1}^N t_{R,i} = N \cdot t_R \tag{3-5}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{R,ges}^2 &= \sum_{i=1}^N \sigma_{R,i}^2 + \sum_{i=1}^{N-1} (k_{R,i,i+1} \cdot \sigma_{R,i} \cdot \sigma_{R,i+1}) \\
 &= N \cdot \sigma_R^2 + (N-1) \cdot k_R \cdot \sigma_R^2 \\
 &= [N + (N-1) \cdot k_R] \cdot \sigma_R^2 \\
 &\approx (1 + k_R) \cdot N \cdot \sigma_R^2 \quad (\text{bei großem } N)
 \end{aligned} \tag{3-6}$$

N kann hier als die Gesamtlänge der Route interpretiert werden. Daraus folgt:

$$\frac{\sigma_{R,ges}^2}{t_{R,ges}} = \frac{(1 + k_R) \cdot N \cdot \sigma_R^2}{N \cdot t_R} = \frac{(1 + k_R) \cdot \sigma_R^2}{t_R} = K = \text{const.} \tag{3-7}$$

oder

$$\sigma_{R,ges}^2 = K \cdot t_{R,ges} \tag{3-8}$$

Die Gesamtvarianz $\sigma_{R,ges}^2$ der Reisezeit ist somit proportional zur der Gesamtreisezeit $t_{R,ges}$. Demnach gilt:

$$\sigma_{R,ges} = \sqrt{K} \cdot \sqrt{t_{R,ges}} = \sqrt{\frac{1+k_R}{t_R}} \cdot \sigma_R \cdot \sqrt{t_{R,ges}} \quad (3-9)$$

Danach ist die Standardabweichung $\sigma_{R,ges}$ eine konkave Funktion der Gesamtreisezeit $t_{R,ges}$. Diese Form der Funktion $\sigma_{R,ges} = f(t_{R,ges})$ wird auch in der Literatur angegeben (vgl. Bild 3-2).

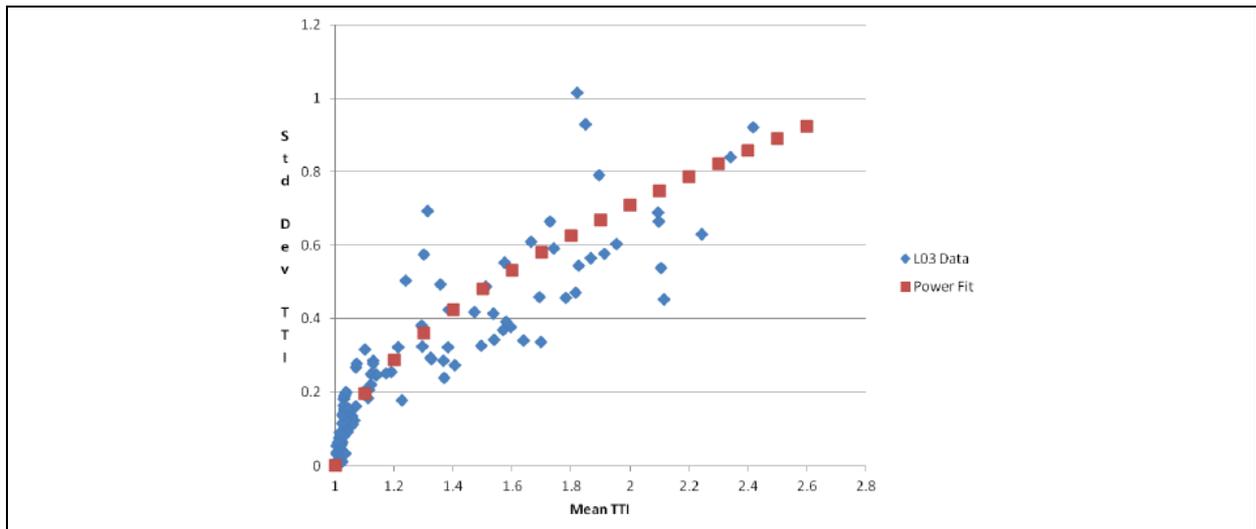


Bild 3-2: Abhängigkeit der Standardabweichung vom Mittelwert des Travel Time Index (Quelle: TRB, 2013)

In der Literatur wird oft eine lineare Beziehung zwischen der Standardabweichung σ_R und der Reisezeit t_R pro Längeneinheit vorgeschlagen. D. h.:

$$\sigma_R = a + b \cdot t_R \quad (3-10)$$

mit

a, b = Regressionsparameter

Diese lineare Funktion widerspricht allerdings den theoretischen Grundlagen. Auch in der in Bild 3-3 dargestellten Auswertung passt sich eine konkave Funktion besser an die empirischen Daten an als die dort verwendete lineare Funktion.

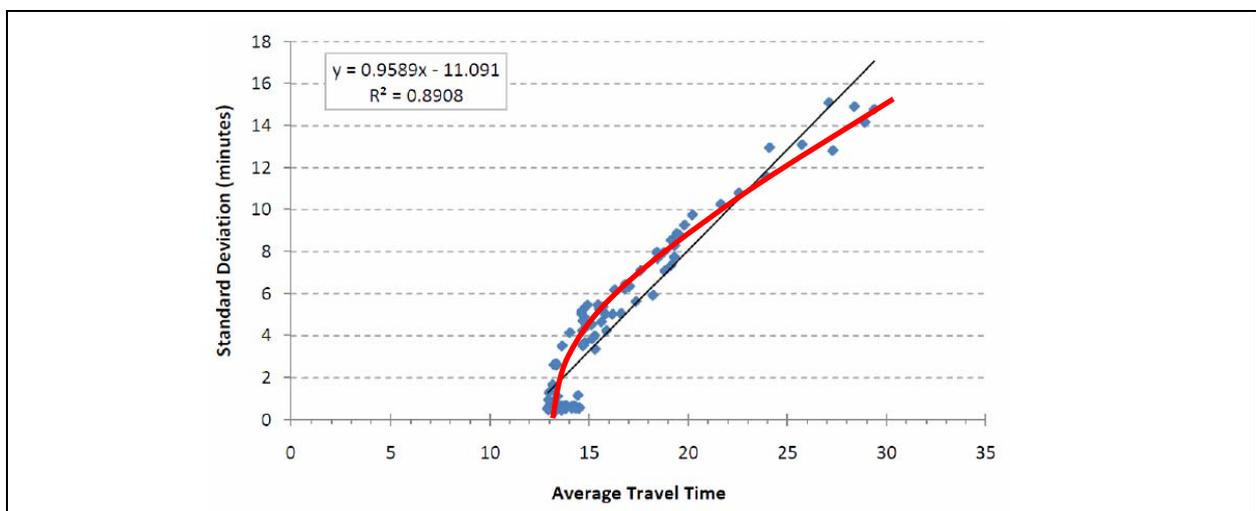


Bild 3-3: Abhängigkeit der Standardabweichung der Reisezeit von der mittleren Reisezeit (Daten: Autobahn Den Haag-Utrecht, Quelle: HELLINGA, 2011; rote Linie: eigene Eintragung)

4 Untersuchungsmethodik

4.1 Ermittlung von Reisezeitverlusten durch makroskopische Simulationen

4.1.1 Untersuchungsstrecken

Für die simulationsbasierte Analyse des Mittelwertes und der Standardabweichung der überlastungsbedingten Reisezeitverluste wurde der Verkehrsablauf auf 50 Strecken (zwischen benachbarten Knotenpunkten) von Autobahnen in Hessen, Bayern, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern nachgebildet. 15 Untersuchungsstrecken wurden aufgrund einer Änderung der Fahrstreifenanzahl, der Längsneigung oder der Geschwindigkeitsregelung in zwei Teilstrecken unterteilt, die anderen Untersuchungsstrecken weisen konstante Streckenparameter auf und wurden somit als Einzelstrecken modelliert. Für die Ermittlung der Verkehrsnachfrage wurden Daten von je einer Dauerzählstelle im Verlauf der Strecke verwendet. Die Untersuchungsstrecken umfassen dabei ein breites Spektrum verschiedener Fahrzweckzusammensetzungen und Streckencharakteristika.

Um zu gewährleisten, dass die gewählten Querschnitte sowohl Strecken mit einem sehr hohen Anteil an Urlaubs- und Ausflugsverkehr als auch Strecken mit vorwiegend Berufsverkehr abbilden, wurde vorab der Dauerlinientyp für die infrage kommenden Messstellen bestimmt, aus dem sich Rückschlüsse auf die Fahrzweckzusammensetzung ziehen lassen. Die bislang gebräuchliche Typisierung für richtungsgemeinsame Dauerlinien anhand des d_{30} -Faktors wurde hier nicht vorgenommen, da die Werte richtungsgetreunt untersucht wurden. Um in diesem Fall eine Zuordnung zum Dauerlinientyp vorzunehmen, muss primär der Verlauf der Dauerlinien in den ersten Stunden betrachtet werden. Dies geschieht, indem das Verhältnis der Verkehrsstärken der Ränge 50, 100, 150 und 200 zum Wert der Verkehrsstärke des Rangs 30 bestimmt wird. Diese Verhältnisse können gemäß der Einteilung nach ARNOLD und BÖTTCHER (2005) einem Dauerlinientyp zugeordnet werden. ARNOLD und BÖTTCHER haben in ihrer Untersuchung von knapp 3.500 Messstellen an Bundesautobahnen einen hohen Anteil des Dauerlinientyps D aufgezeigt. Daher wurde bei der Auswahl der Messstellen ebenfalls darauf geachtet, eine große Zahl an Beispielen für diesen Dauerlinientyp einzubeziehen (vgl. Tab. 4-1).

Dauerlinientyp	Niveau	Verlauf	Anteil nach ARNOLD und BÖTTCHER	Anteil in der Untersuchung	Charakteristische Verkehrszusammensetzung
A	sehr hoch	konvex	3,9 %	4 %	sehr hohe Anteile von Urlaubs- und Ausflugsverkehren
B	hoch	konvex	11,6 %	12 %	überdurchschnittlich hohe Anteile von Urlaubs-, Ausflugs- oder Wochenpendlerverkehren
C	niedrig	konvex	19,0 %	12 %	Verkehre mit starker Vermischung der Fahrtzwecke
D	niedrig	gerade	34,4 %	60 %	regelmäßige Werktagsverkehre ohne ausgeprägte Überlastungsspitzen
E	hoch	gerade	26,8 %	10 %	regelmäßige Werktagsverkehre mit ausgeprägten Morgen- oder Nachmittagspitzen im Berufsverkehr
F	sehr hoch	konkav	4,2 %	2 %	einseitig geprägt von regelmäßigen Berufsverkehren, die sich auf eine Stunde während der morgendlichen Hauptverkehrszeit konzentrieren

Tab. 4-1: Charakteristika richtungsgetrennter Dauerlinien (nach ARNOLD und BÖTTCHER, 2005) und Anteil der in der Untersuchung verwendeten Dauerlinientypen

4.1.2 Ganzjahresanalyse

Die Quantifizierung der Auswirkungen von Überlastungen auf den Untersuchungsstrecken erfolgte anhand von makroskopischen Simulationen nach dem Prinzip der Ganzjahresanalyse des Verkehrsablaufs (vgl. BRILON und ZURLINDEN, 2003; BRILON et al., 2004). Dabei wird das Ausmaß der im Laufe eines Jahres auftretenden Überlastungen durch eine Gegenüberstellung von Jahresganglinien der Verkehrsnachfrage und der Kapazität in 5-Minuten-Intervallen nachgebildet (vgl. Bild 4-1). Sowohl die Verkehrsnachfrage als auch die Kapazität werden als Zufallsgrößen unter Einbeziehung systematischer und zufälliger Schwankungen modelliert. Für die intervallgenaue Ermittlung der überlastungsbedingten Reisezeitverluste wird ein deterministisches Warteschlangenmodell verwendet. Dabei wird die Stelle mit der geringsten Kapazität betrachtet, die den maßgebenden Engpass der Strecke darstellt. Somit wird die Autobahn als eine Abfolge von Engpässen, die als Bedienungsschalter im Sinne der Warteschlangentheorie aufgefasst werden, modelliert.

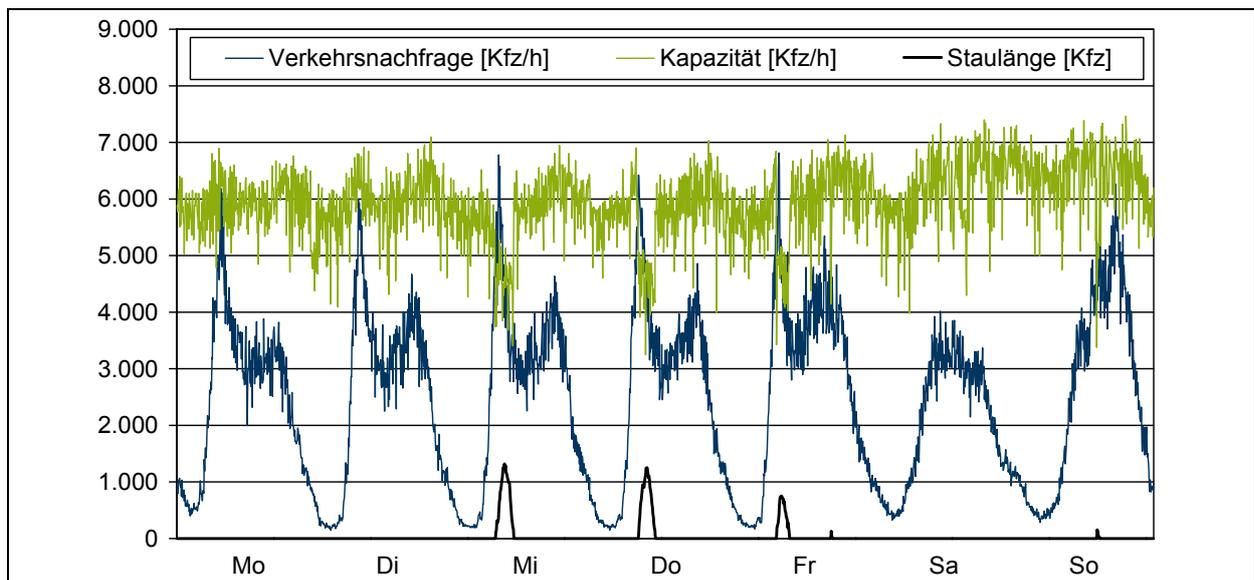


Bild 4-1: Gegenüberstellung von Ganglinien der Verkehrsnachfrage und der Kapazität nach dem Prinzip der Ganzjahresanalyse

Die Umsetzung der stochastischen Ganzjahresanalyse erfolgte mit dem Programm KAPASIM, das am Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum entwickelt wurde. Die Realitätsnähe der Simulationsergebnisse wurde bereits in zahlreichen Anwendungen aufgezeigt (u. a. BRILON et al., 2004; BRILON et al., 2006; GEISTEFELDT et al., 2012).

4.1.3 Ermittlung der Verkehrsnachfrage

Für die Ermittlung der Verkehrsnachfrage wurden Daten automatischer Dauerzählstellen verwendet. Bei der Betrachtung von lokal gemessenen Verkehrsstärken muss berücksichtigt werden, dass bei einer Überlastung einer Strecke die abfließende Verkehrsstärke durch die Kapazität der Verkehrsanlage begrenzt wird. Dabei kommt es zu einer zeitlichen (und unter Umständen auch zu einer räumlichen) Verlagerung des Verkehrs (vgl. Bild 4-2). Bei Daten von Dauerzählstellen ergibt sich somit das Problem, dass die Verkehrsnachfrage im Bereich von Überlastungen nicht direkt aus den an Dauerzählstellen erfassten Verkehrsstärken abgeleitet werden kann.

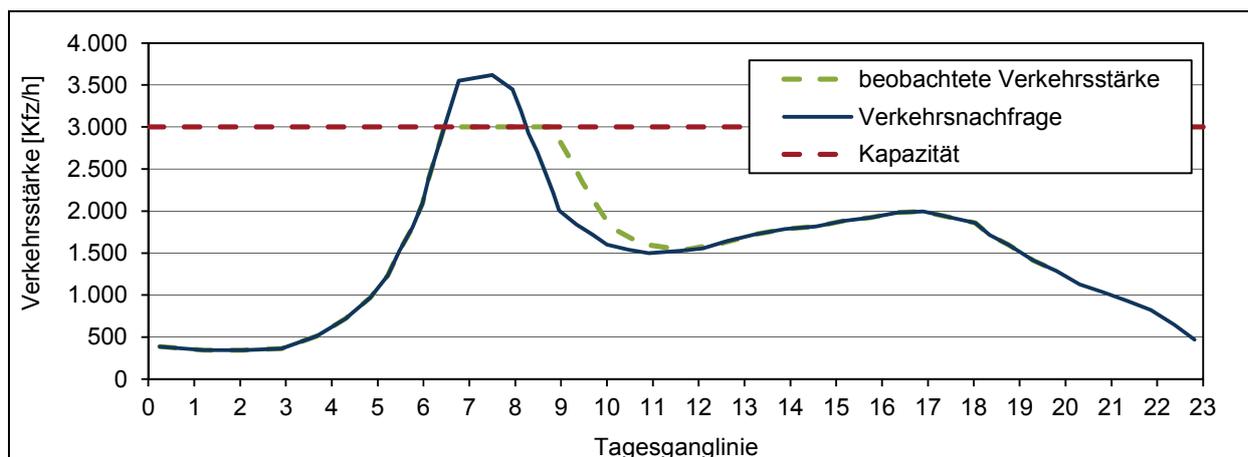


Bild 4-2: Zeitliche Verschiebung der Verkehrsstärke durch Überlastung

Da bei der Ermittlung des Ausmaßes von Überlastungen vor allem eine genaue Abbildung der Verkehrsspitzen erforderlich ist, wurde für die Modellierung der Ganglinien der Verkehrsnachfrage das Verfahren der tagesindividuellen Typganglinien (vgl. GEISTEFELDT, 2008) verwendet. Dabei werden die einzelnen Werte der Ganglinie der Verkehrsnachfrage durch Überlagerung realer Tageswerte der Verkehrsstärke mit tagesindividuellen Typganglinien erzeugt. Für jeden Tag werden individuelle Typganglinien nachgebildet, wodurch die Variabilität der zeitlichen Verteilung der Verkehrsnachfrage über den Tag Berücksichtigung findet. Die in Stunden-Intervallen erzeugte Ganglinie der Verkehrsnachfrage wird anschließend in 5-Minuten-Intervalle transformiert. Dabei werden zufällige Schwankungen der Verkehrsnachfrage mithilfe einer Normalverteilung mit verkehrsstärkeabhängiger Standardabweichung nachgebildet (vgl. Bild 4-3).

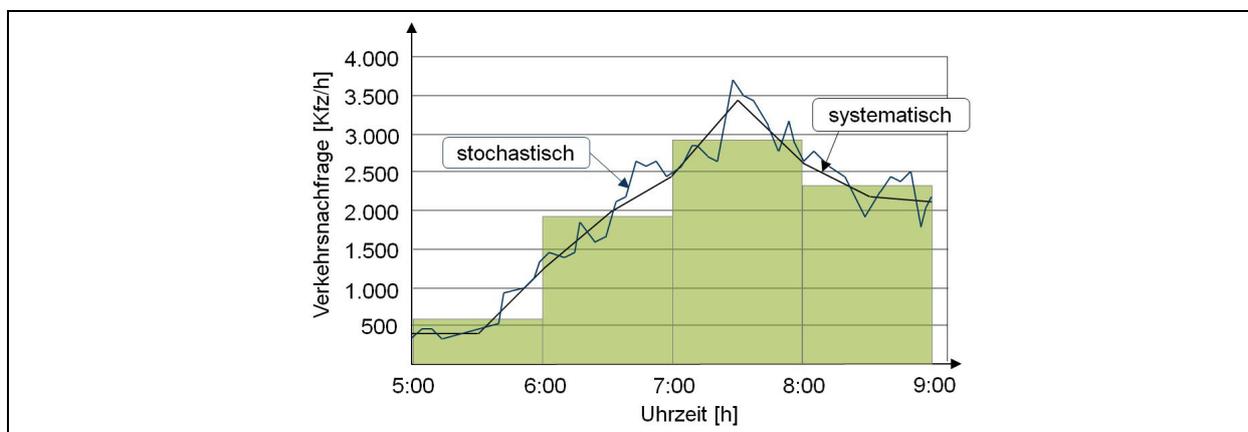


Bild 4-3: Systematische und zufällige Schwankungen der Verkehrsnachfrage (nach BRILON und ZURLINDEN, 2003)

Die Verkehrsnachfrage liegt auf einigen der 50 betrachteten Untersuchungsstrecken auch in den ersten Stunden der Dauerlinie zum Teil deutlich unter der Kapazität. Da für die Analyse und Modellierung der Variabilität der überlastungsbedingten Reisezeitverluste jedoch gerade im Bereich hoher Auslastungsgrade eine möglichst hohe Anzahl an Werten erforderlich ist, wurden fiktive Datensätze erzeugt und als Eingangswerte für die Simulationsrechnungen verwendet. Dabei wurden für jeden Messquerschnitt Faktoren bestimmt, mit denen die Nachfragewerte proportional so variiert wurden, dass die Verkehrsnachfrage in der n -ten Stunde der Kapazität nach HBS (FGSV, 2012) entspricht. Als n -te Stunde wurde die 30. und 50. Stunde gewählt. Die auf diese Weise ermittelten Datensätze werden mit N_{30} bzw. N_{50} bezeichnet. Die Datensätze mit realer Verkehrsnachfrage wurden nicht berücksichtigt, da die Szenarien mit variiertem Verkehrsnachfrage den relevanten Auslastungsbereich hinreichend abdecken.

Die Methodik der Erhöhung ist in Bild 4-4 am Beispiel des Querschnitts MQ9051RiG (Autobahn A 95 zwischen Anschlussstelle Murnau/Kochel und Eschenlohe) dargestellt. Bei dem Querschnitt liegt die in der Realität auftretende Verkehrsnachfrage von maximal 1.251 Kfz/h deutlich unter der Kapazität von 3.700 Kfz/h einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn mit der vorliegenden Streckencharakteristik.

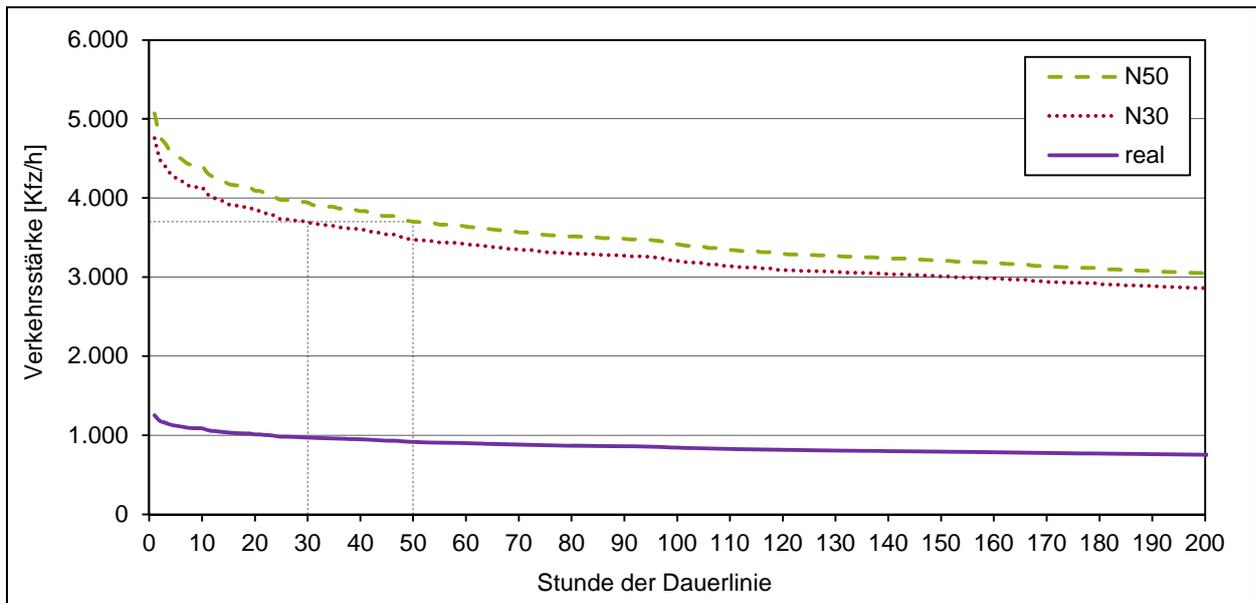


Bild 4-4: Erhöhung der Verkehrsnachfrage (Beispielquerschnitt: MQ9051RiG)

4.1.4 Kapazität

Die Kapazität einer Strecke ergibt sich im Wesentlichen aus der Streckengeometrie, dem Verkehrsteilnehmerkollektiv und den Steuerungsbedingungen. Die nach HBS (FGSV, 2001, 2012) maßgebenden Streckenparameter von Autobahnen sind die Fahrstreifenanzahl, die Längsneigung, der Schwerverkehrsanteil, der Anteil ortskundiger Fahrer, repräsentiert durch die Lage der Strecke im Netz (innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen), sowie die Anordnung von Geschwindigkeitsbeschränkungen (statisch oder dynamisch durch eine Streckenbeeinflussungsanlage). Darüber hinaus wirken sich auch die Umfeldbedingungen (z. B. Witterung) auf die Kapazität aus.

Die Generierung von Ganglinien der Kapazität erfolgt im Programm KAPASIM anhand von Verteilungsfunktionen. Die Kapazität wird dabei nicht als deterministischer Wert, sondern gemäß jüngeren Erkenntnissen (z. B. MINDERHOUD et al., 1997; BRILON, ZURLINDEN, 2003; GEISTEFELDT, BRILON, 2009) als stochastische Größe aufgefasst. Damit wird berücksichtigt, dass die Kapazität auch unabhängig von systematischen Einflussgrößen zufälligen Schwankungen unterworfen ist, die u. a. auf die Zufälligkeit des Verkehrsablaufs, der Verkehrszusammensetzung und des individuellen Verhaltens der Fahrzeugführer zurückzuführen sind. Die am besten geeignete Verteilungsfunktion zur Beschreibung der Kapazität von Autobahnen ist die Weibull-Verteilung. Die Verteilungsfunktion der Kapazität $F_C(q)$ lautet:

$$F_C(q) = 1 - e^{-\left(\frac{q}{b}\right)^a} \quad (4-1)$$

mit:

q = Verkehrsstärke [Kfz/h]

a = Formparameter [-]

b = Maßstabsparameter [Kfz/h]

Der Formparameter beschreibt die Streuung der Verteilungsfunktion und beträgt bei Autobahnen ungefähr $a = 15$, bei Abschnitten mit Streckenbeeinflussungsanlage $a = 18$ (BRILON et al., 2006). Der Maßstabsparameter b kann in Abhängigkeit von der Kapazität C nach HBS (FGSV, 2001, 2012) über den Zusammenhang $b = 1,275 \cdot C$ geschätzt werden (BRILON et al., 2006). Durch Variation des Maßstabsparameters werden alle systematischen Einflüsse auf die Kapazität erfasst. Der Capacity Drop, d. h. die verringerte Kapazität im gestauten Verkehr nach einem Zusammenbruch des Verkehrsflusses, wird durch einen pauschalen Abminderungsfaktor von 15 % berücksichtigt. Temporäre Einflüsse auf die Kapazität wie Regenereignisse sowie Pannen und Unfälle können im Programm KAPASIM ebenfalls berücksichtigt

werden. Für die Analyse der Zuverlässigkeit in der vorliegenden Untersuchung wurde der Einfluss von Pannen und Unfällen jedoch nicht nachgebildet, da deren Auswirkungen auf den Verkehrsfluss nur in geringem Maße als Merkmal der Verkehrsinfrastruktur angesehen werden können. Der Einfluss der Witterungsbedingungen auf den Verkehrsablauf wird in KAPASIM durch die zufällige Generierung von Regenereignissen nachgebildet. Bei Regen wird eine Verringerung der Kapazität um 12 % berücksichtigt.

4.1.5 Umfang der Simulationsrechnungen

Mit jedem Simulationslauf wird durch die Variation der Zufallskomponenten der Verkehrsnachfrage und der Kapazität die Variabilität des Überlastungsgeschehens nachgebildet. Die Berechnung repräsentiert somit den Verkehrszustand für eine Realisierung dieser Zufallsgrößen. Durch mehrfache Wiederholung der Berechnung im Sinne einer Monte-Carlo-Simulation kann ein Schätzwert des Mittelwertes und der Standardabweichung der Reisezeitverluste ermittelt werden. In der vorliegenden Untersuchung wurden für jedes der beiden Verkehrsnachfrageszenarien jeder Untersuchungsstrecke 1000 Wiederholungen durchgeführt. Da die systematischen Einflüsse auf die Kapazität und die Ganglinie der Verkehrsnachfrage in Stunden-Intervallen konstant gehalten werden, ist der Auslastungsgrad in jeder Stunde in allen Simulationsläufen konstant. Im Ergebnis der Simulation werden für jede Stunde des Jahres der Mittelwert und die Standardabweichung der Reisezeitverluste ausgewiesen und dem jeweiligen Auslastungsgrad gegenübergestellt.

4.2 Empirische Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen

4.2.1 Datengrundlage

Für die vorliegende Untersuchung standen Verkehrsdaten von Dauerzählstellen sowie abschnittsbezogene Reisezeitverluste aus dem ASDA/FOTO-System von sämtlichen Autobahnen in Hessen für das Jahr 2012 zur Verfügung, die von der Verkehrszentrale Hessen bereitgestellt wurden. Das Modell ASDA/FOTO, mit dem die Daten ermittelt wurden, basiert auf der sog. 3-Phasen-Theorie (vgl. KERNER, 2009) und identifiziert Stauformationen auf den Autobahnen auf der Grundlage lokal erfasster Daten von Dauerzählstellen. Anhand der modellbasierten Rekonstruktion des Verkehrszustands über Weg und Zeit werden die staubedingten Reisezeitverluste ermittelt. Die Daten bilden u. a. die Grundlage der Routenempfehlungen im Rahmen der Alternativroutensteuerung mit dWiSta-Tafeln auf Bundesautobahnen in Hessen und wurden in verschiedenen Tests validiert.

Die ASDA/FOTO-Daten enthalten für jedes 1-Minuten-Intervall und jeden Abschnitt zwischen benachbarten Traffic Message Channel (TMC) Locations die – abschnittsweise konstante – Reisezeit im fließenden Verkehr und die überlastungsbedingten Reisezeitverluste in Sekunden. Die TMC Locations umfassen neben Anschlussstellen, Autobahnkreuzen und -dreiecken auch Parkplätze sowie Tank- und Rastanlagen, so dass sich Streckenabschnitte zwischen zwei Knotenpunkten teilweise aus mehreren TMC-Abschnitten zusammensetzen. Für solche Streckenabschnitte wurden die Reisezeitverluste der zugehörigen TMC-Abschnitte im Zuge der Datenaufbereitung zusammengefasst.

Um die Einflüsse von Unfällen und Baustellen auf die Variabilität der Reisezeit soweit wie möglich aus der Analyse auszuschließen, wurden zusätzlich Baustellendaten aus dem Slotmanagementsystem des Landes Hessen sowie Unfalldaten aus der polizeilichen Unfalldatenbank herangezogen. Die Zuordnung erfolgte ausgehend von der Kilometrierung der Baustelle oder Unfallstelle unter Berücksichtigung einer Vorlaufstrecke für die Stauausbreitung von 3 km bei Baustellen und Unfällen mit leichtem Sachschaden (Unfallkategorien 5 und 6) sowie 5 km bei Unfällen mit schwerem Sachschaden oder Personenschaden (Unfallkategorien 1 bis 4). Die Vorlaufstrecke wird dabei nur dann maßgebend, wenn sich die Unfallstelle bzw. die Baustelle stromabwärts des betrachteten Streckenabschnitts befindet. Für die zeitliche Zuordnung von Baustellen wurden der Anfangs- und Endzeitpunkt aus dem Slotmanagementsystem verwendet, bei Unfällen ein Zeitraum von 1 Stunde nach dem Unfallzeitpunkt bei Unfällen mit leichtem Sachschaden sowie 2 Stunden bei Unfällen mit schwerem Sachschaden oder Personenschaden. Darüber hinaus wurden alle Daten der Nachtstunden zwischen 22 und 6 Uhr aus der Analyse ausgeschlossen, da davon ausgegangen werden kann, dass in diesem Zeitraum aufgetretene Reisezeitverluste ausschließlich durch temporäre Einflüsse wie Unfälle oder Pannen verursacht worden sind.

4.2.2 Datenauswertung

Als Bezugsgröße für die Analyse der Standardabweichung der Reisezeitverluste wurde der Auslastungsgrad als Quotient der Verkehrsnachfrage und der Kapazität des jeweiligen Streckenabschnitts ermittelt. Da die gemessene Verkehrsstärke bei einer Überlastung nicht der Verkehrsnachfrage entspricht, wurde die Verkehrsnachfrage mit dem in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Verfahren der tagesindividuellen Typganglinien (GEISTEFELDT, 2008) rekonstruiert. Als Grundlage für die Modellierung der Verkehrsnachfrage wurden Verkehrsstärkeganglinien aus den Daten der Dauerzählstellen ermittelt. Dazu wurde für jeden Streckenabschnitt ein repräsentativer Querschnitt ausgewählt. Sofern keine Dauerzählstelle im Streckenabschnitt verfügbar war, wurde eine Zählstelle aus einem benachbarten Abschnitt verwendet. Aufgrund der hohen Zählstellendichte auf den hoch belasteten Autobahnen in Hessen betrifft dies jedoch nur schwächer ausgelastete Abschnitte außerhalb von Ballungsräumen, die aufgrund des geringen Stauaufkommens für die vorliegende Untersuchung nur von untergeordneter Bedeutung sind.

Die Kapazität wurde anhand der Bemessungswerte für Strecken von Autobahnen der fortgeschriebenen Fassung des HBS (FGSV, 2012) in Abhängigkeit von den jeweiligen Weg- und Verkehrsbedingungen ermittelt. Die Kapazitätswerte des HBS gelten für Stunden-Intervalle. Die Bemessungskapazität nach HBS kann im Einzelfall erheblich von der tatsächlichen Kapazität der Autobahn abweichen. Da jedoch auch im BVWP-Bewertungsmodell die Kapazitäten des HBS zugrunde gelegt werden, ist die Vorgehensweise für die Entwicklung des Modellzusammenhangs zur Beschreibung der Standardabweichung der Reisezeitverluste mit der Modellanwendung konsistent.

Durch die Verwendung der Kapazitätswerte des HBS ist für die Ermittlung des Auslastungsgrades die Berechnung in Stunden-Intervallen vorgegeben. Die Reisezeitverluste können aber auch innerhalb einer Stunde erheblich schwanken. Demnach ist für die Ermittlung der Standardabweichung ein kleineres Bezugsintervall sinnvoll. Allerdings sollte das Bezugsintervall nicht wesentlich kleiner als die durchschnittliche Zeit für das Durchfahren eines Streckenabschnitts im Stau sein, da andernfalls die Schwankungen der abschnittsbezogenen Reisezeitverluste gemäß den ASDA/FOTO-Daten nicht die Variabilität der individuellen Reisezeitverluste repräsentiert. Zur Analyse des Einflusses der Intervalldauer wurden die Auswertungen der Reisezeitverluste daher in 5-Minuten-, 15-Minuten- und Stunden-Intervallen durchgeführt.

Im Gegensatz zur makroskopischen Simulation gemäß Kapitel 4.1, bei der die Standardabweichung der Reisezeitverluste in jeder Stunde des Jahres durch (nahezu) beliebig viele Wiederholungen der Simulation berechnet und dem über alle Simulationsläufe konstanten Auslastungsgrad der jeweiligen Stunde zugeordnet werden kann, liegt bei der empirischen Analyse für jede Stunde nur ein Wert der tatsächlich aufgetretenen Reisezeitverluste vor. Um eine ausreichend große Zahl an Einzelwerten für die Ermittlung der Standardabweichung der Reisezeitverluste zu erhalten, ist daher eine zusammenfassende Betrachtung von Stunden mit ähnlichem Auslastungsgrad erforderlich. Dafür wurden alle Stunden in Klassen des Auslastungsgrades der Breite 0,05 eingeteilt. Zu Kontrollzwecken wurde zusätzlich eine Auswertung mit einer Klassenbreite von 0,10 durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurden die Zusammenhänge zwischen dem Auslastungsgrad sowie dem Mittelwert und der Standardabweichung der Reisezeitverluste für jeden Streckenabschnitt zwischen Knotenpunkten ausgewertet, d. h. es wurden die auf dem jeweiligen Streckenabschnitt angefallenen Reisezeitverluste dem Auslastungsgrad des Abschnitts zugeordnet. Mit dieser Vorgehensweise konnten jedoch in der Regel keine verwertbaren Zusammenhänge ermittelt werden. Die wesentlichen Gründe dafür sind:

- Bei Engpässen, die sich aufgrund von Rückstau auf die Reisezeit in stromaufwärts (d. h. vor dem Engpass) liegenden Streckenabschnitten auswirken, repräsentieren die im Engpassabschnitt selbst angefallenen Reisezeitverluste nicht das gesamte Ausmaß der durch den Engpass verursachten Reisezeitverluste. Zudem führen Rückstau zu einem verzerrten Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad und dem Mittelwert bzw. der Standardabweichung der Reisezeitverluste in den stromaufwärts liegenden Streckenabschnitten.
- Hohe Auslastungsgrade, die für die Ermittlung der Standardabweichung der Reisezeitverluste besonders relevant sind, werden nur in relativ wenigen Streckenabschnitten erreicht. In geringer ausgelasteten Streckenabschnitten fallen betriebliche Einflüsse, die nicht auf eine unzureichende bauliche Kapazität der Autobahn zurückzuführen sind, stärker ins Gewicht. Diese Einflüsse können durch den durchgeführten Abgleich mit Unfall- und Baustellendaten nicht vollständig ausgeschlossen werden, da z. B. Pannen und teilweise auch Bagatellunfälle nicht erfasst werden.

Aus diesem Grund wurden in einem zweiten Auswertungsschritt wesentliche Engpassbereiche im hessischen Autobahnnetz zusammenfassend betrachtet. Dazu wurde in jedem Intervall die Summe der Reisezeitverluste in den Streckenabschnitten im Zulauf auf den Engpass ermittelt und in Bezug zum Auslastungsgrad des Engpassabschnitts gesetzt. Die Zuordnung der Streckenabschnitte zu Engpässen erfolgte auf der Grundlage der Reisezeitverteilungen der einzelnen Abschnitte. Die Engpässe zeichnen sich dadurch aus, dass der Anteil der Intervalle, in denen Reisezeitverluste aufgetreten sind, im Zulauf auf den Engpass aufgrund von Rückstaus immer größer wird und im Abschnitt stromabwärts des Engpasses deutlich zurückgeht. Insgesamt wurden auf diese Weise 17 Engpässe identifiziert, die in Tab. 4-2 angegeben sind. Dabei ist zu beachten, dass sich das Ausmaß der Überlastungen an den einzelnen Engpässen deutlich voneinander unterscheidet. Um eine möglichst große Vielfalt unterschiedlicher Engpassituationen analysieren zu können, wurden auch schwach ausgeprägte Engpässe auf Autobahnen außerhalb des Ballungsraums Rhein/Main (z. B. Engpass A3 N - 4 im Zuge der A 3 zwischen AS Camberg und AS Limburg-Süd) in die Auswahl einbezogen. Darüber hinaus können sich in einigen Fällen die Auswirkungen von aufeinander folgenden Engpässen überlagern. Auch bestehen teilweise Einflüsse von Engpässen innerhalb von Autobahnknotenpunkten.

Kurzbez.	Von Knoten	Nach Knoten	Maßgebender Engpass
A3 N - 1	AS Seligenstadt	AS Obertshausen	Abschnitt Hanau – Obertshausen
A3 N - 2	AS Ffm.-Flughafen	Mönchhof-Dreieck	Abschnitt Kelsterbach – Mönchhof-Dreieck
A3 N - 3	AS Raunheim	TR Medenbach	Steigung Wiesbadener Kreuz – Medenbach
A3 N - 4	AS Niedernhausen	AS Limburg-Süd	Abschnitt Bad Camberg – Limburg-Süd
A3 S - 1	Wiesbadener Kreuz	AS Kelsterbach	Abschnitt Mönchhof-Dreieck – Kelsterbach
A3 S - 2	Frankfurter Kreuz	AS Obertshausen	Abschnitt Offenbach – Obertshausen
A5 N - 1	AS Seeheim-Jugenh.	Darmstädter Kreuz	Abschnitt DA-Eberstadt – Darmstädter Kreuz
A5 N - 2	AS Ffm.-Westhafen	Nordwestkreuz Ffm.	Abschnitt Westkreuz – Nordwestkreuz
A5 N - 3	Nordwestkreuz Ffm.	PWC Spießwald	Abschnitt Bad Homburger Kreuz – Spießwald
A5 N - 4	PWC Schäferborn	TR Wetterau	Ende der temporären Seitenstreifenfreigabe an der AS Friedberg
A5 N - 5	AS Grünberg	P Krachgarten	Fahrstreifenreduktion hinter AS Homberg (Ohm)
A5 S - 1	AS Butzbach	T+R Wetterau	Steigung Wetterau
A5 S - 2	PWC Spießwald	Nordwestkreuz Ffm.	Sortierraum am Nordwestkreuz: Ende der temp. Seitenstreifenfreigabe und starker Ausfahrtstrom
A5 S - 3	AD Darmstadt	AS DA-Eberstadt	Abschnitt Darmstädter Kreuz – DA-Eberstadt
A66 O - 1	AS WI-Frauenstein	AS WI-Biebrich	Abschnitt Schiersteiner Kreuz – WI-Biebrich
A66 W - 1	Wiesbadener Kreuz	AS WI-Erbenheim	Fahrstreifenabstraktion Wiesbaden-Erbenheim
A66 W - 2	AS WI-Erbenheim	Schiersteiner Kreuz	Abschnitt WI-Biebrich – Schiersteiner Kreuz

Tab. 4-2: Analysierte Engpassbereiche

In der Regel sind die Abstände zwischen den analysierten Engpässen einer Autobahn-Richtungsfahrbahn sehr groß. Bei den wenigen dicht aufeinander folgenden Engpässen ist aufgrund möglicher Rückstaus vom stromabwärts liegenden Engpass nicht immer eine eindeutige Zuordnung der entstandenen Reisezeitverluste zu einem der beiden Engpässe möglich. Daher ist im Rahmen der empirischen Modellvalidierung ausschließlich eine jeweils auf den einzelnen Engpass bezogene Auswertung sinnvoll. Die Korrelation der Reisezeitverluste in aufeinander folgenden Streckenabschnitten kann anhand der empirischen Daten nicht mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden.

5 Modellentwicklung anhand makroskopischer Simulationen

5.1 Elementbezogener Zusammenhang

Im Ergebnis der makroskopischen Simulationen im Sinne einer Ganzjahresanalyse mit dem Programm KAPASIM lagen für jede Untersuchungsstrecke und jedes Verkehrsnachfrageszenario 8760 Einzelwerte des Mittelwertes und der Standardabweichung der Reisezeitverluste sowie des Auslastungsgrades vor. Um eine gleichmäßige Modellanpassung über die gesamte Bandbreite möglicher Auslastungsgrade zu erreichen, wurden die Werte in Klassen des Auslastungsgrades mit einer Breite von 0,05 eingeteilt. Für jede Klasse wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen der Reisezeitverluste über alle Untersuchungsstrecken gemittelt. Die Anpassung der Modellfunktionen an die Klassenmittelwerte wurde auf Auslastungsgrade im Bereich $0,75 \leq x \leq 1,15$ beschränkt. Bei Auslastungsgraden unter 0,75 – dies entspricht einer Qualität des Verkehrsablaufs der Stufe C oder besser nach HBS – treten nur in seltenen Fällen nennenswerte Reisezeitverluste auf, so dass der Mittelwert und die Standardabweichung der Reisezeitverluste in diesem Bereich vernachlässigbar klein sind. Stündliche Auslastungsgrade über 1,15 wurden nur in wenigen Simulationsszenarien erreicht und sind mit extrem hohen Reisezeitverlusten verbunden, die in einer so großen Bandbreite liegen, dass einzelne Ausreißerwerte die Modellanpassung erheblich beeinflussen können.

Nachfolgend werden die Zusammenhänge zwischen den drei Kenngrößen Auslastungsgrad sowie Mittelwert und Standardabweichung der Reisezeitverluste analysiert. Dabei werden jeweils die Ergebnisse für das Verkehrsnachfrageszenario N_{50} für drei Beispielstrecken mit unterschiedlicher Streckencharakteristik und Fahrtzweckzusammensetzung (siehe Tab. 5-1) sowie die Anpassung der Modellfunktion an die Klassenmittelwerte sämtlicher Simulationsszenarien dargestellt. Zu beachten ist, dass die Herleitungen der Modellfunktionen auf Mittelwerten bzw. Standardabweichungen der Reisezeitverluste in der Einheit [h] basieren, die Achsenbeschriftungen in den Diagrammen aufgrund der besseren Nachvollziehbarkeit aber immer in [s] angegeben sind.

MQ	Lage	Fstr.	Längsneig.	SV-Anteil	v_{zul}	Dauerlinientyp
A3_13IDN	außerhalb von Ballungsr.	3	3,8 %	14 %	unbeschränkt	D
A5_Q26GS	innerhalb von Ballungsr.	3	0,0 %	14 %	unbeschränkt	D
A45_1EHS	außerhalb von Ballungsr.	2	0,0 %	19 %	100 km/h	C

Tab. 5-1: Streckencharakteristik und Fahrtzweckzusammensetzung der drei Beispielstrecken

Mittelwert der Reisezeitverluste und Auslastungsgrad

Bild 5-1 zeigt für das Nachfrageszenario N_{50} den ermittelten Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad und dem Mittelwert der Reisezeitverluste in Stunden-Intervallen für die drei Beispielstrecken gemäß Tab. 5-1. Erkennbar sind deutliche Unterschiede in der Höhe der mittleren Reisezeitverluste bei gleichem Auslastungsgrad, die jedoch nicht eindeutig auf bestimmte Verkehrs-, Strecken- und Umfeldbedingungen zurückzuführen sind.

Bei der Darstellung des Mittelwertes der Reisezeitverluste in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad sind bei einigen Untersuchungsstrecken mehrere scheinbar voneinander unabhängige Äste erkennbar. Werden die Datensätze jedoch in ihrem zeitlichen Zusammenhang gesehen, wird deutlich, dass in der Regel auf einen Punkt im vorderen Ast ein Punkt im hinteren Ast folgt (vgl. Bild 5-2). Dies ist auf Überlastungen infolge gravierender Verkehrsspitzen zurückzuführen, die sich auf zwei oder mehr aufeinander folgende Stunden-Intervalle auswirken. Für die Modellierung der Variabilität der Reisezeitverluste sind somit auch diese Werte relevant. Das Beispiel zeigt, dass der Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad und den mittleren Reisezeitverlusten durch den Verlauf der Verkehrsnachfrageganglinie im Bereich von Verkehrsspitzen maßgeblich beeinflusst wird. Das in Bild 5-2 dargestellte Phänomen zweier Äste beim Zusammenhang zwischen dem Mittelwert der Reisezeitverluste und dem Auslastungsgrad betrifft vor allem solche Simulationsszenarien, bei denen in einigen Stunden eine Verkehrsnachfrage erreicht wird, die deutlich über der Kapazität nach HBS liegt.

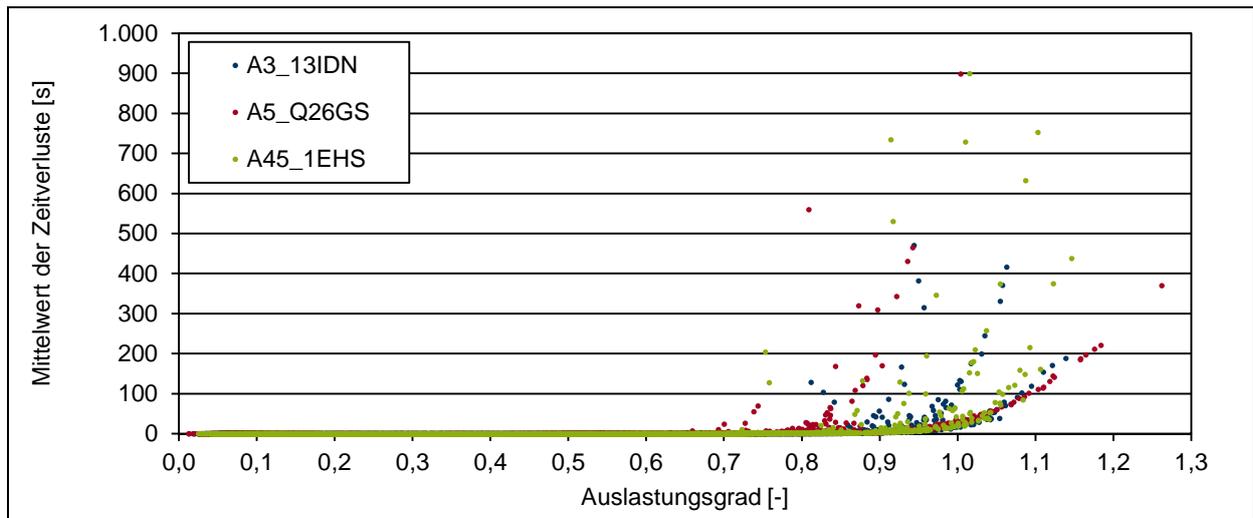


Bild 5-1: Mittelwert der Reisezeitverluste in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad für drei Beispielstrecken

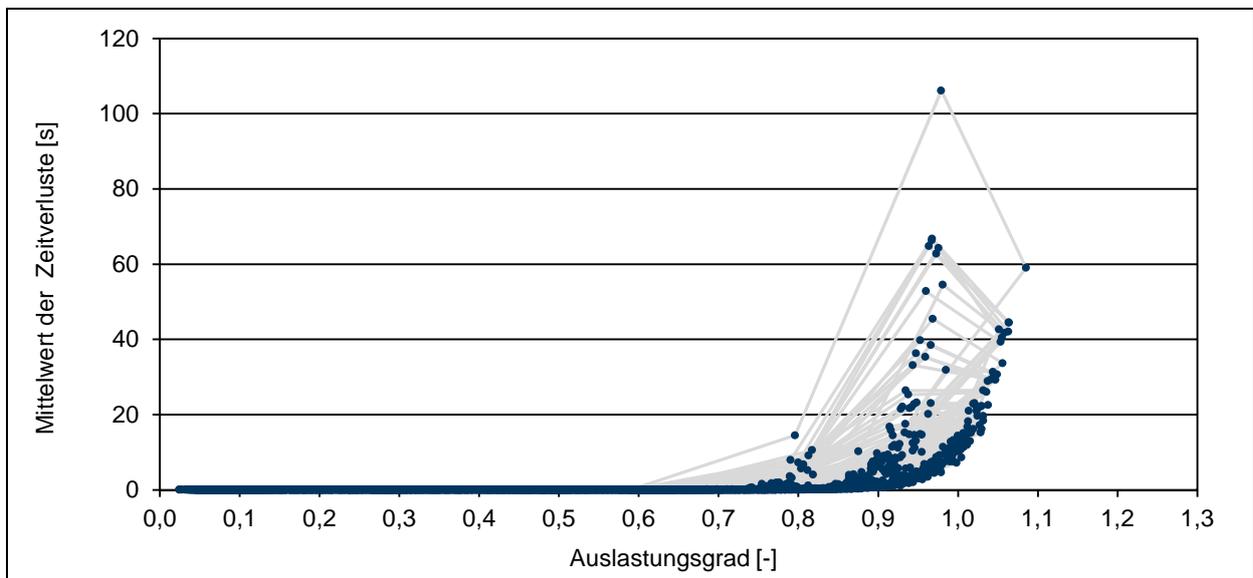


Bild 5-2: Dynamische Darstellung der Reisezeitverluste in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad für eine Beispielstrecke (MQ A3_53GS zwischen AS Frankfurt Süd und AK Offenbacher Kreuz)

Für die Modellanpassung wurden verschiedene Typen von Potenz- und Exponentialfunktionen durch Minimierung der Fehlerquadrate an die simulierten Werte angepasst. Für alle Untersuchungsstrecken wurden eine sehr gute Übereinstimmung im Verlauf und damit eine geringe Fehlerquadratsumme mit einer verschobenen Potenzfunktion erreicht:

$$t_v(x) = \begin{cases} a_1 \cdot (x - 0,75)^{a_2} & \text{für } x \geq 0,75 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5-1)$$

mit:

t_v = Mittelwert der Reisezeitverluste [h]

x = Auslastungsgrad

a_1, a_2 = Modellparameter

Dieser Ansatz erfüllt die Bedingung, dass der Funktionswert und die Steigung der Modellfunktion für $x = 0,75$ jeweils null sind.

Die Anpassung der Modellfunktion an die Klassenmittelwerte im Bereich $0,75 \leq x \leq 1,15$ ergab die Modellparameter $a_1 = 1,54$ und $a_2 = 2,99$. Die resultierende Modellfunktion lautet somit:

$$t_v(x) = \begin{cases} 1,54 \cdot (x - 0,75)^{2,99} & \text{für } x \geq 0,75 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5-2)$$

Bild 5-3 zeigt die Klassenmittelwerte der 50 Beispielstrecken für die beiden Verkehrsnachfrageszenarien N_{30} und N_{50} und die Modellfunktion nach Gleichung (5-2).

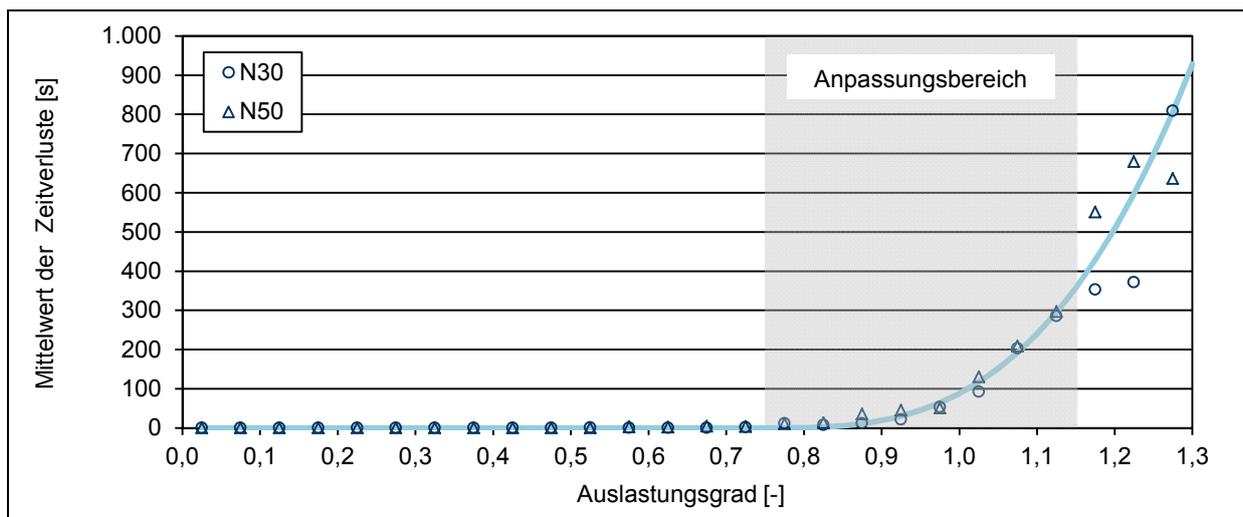


Bild 5-3: Klassenmittelwerte der Verkehrsnachfrageszenarien N_{30} und N_{50} sowie angepasste Modellfunktion zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen dem Auslastungsgrad und dem Mittelwert der Reisezeitverluste

Standardabweichung der Reisezeitverluste und Auslastungsgrad

Den ermittelten Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad und der Standardabweichung der Reisezeitverluste in Stunden-Intervallen zeigt Bild 5-4 für das Verkehrsnachfrageszenario N_{50} der drei Beispielstrecken. Wie bereits beim Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad und dem Mittelwert der Reisezeitverluste in Bild 5-1 ist auch hier eine große Streuung der Einzelwerte mit mehreren Ästen im Bereich hoher Auslastungsgrade zu erkennen.

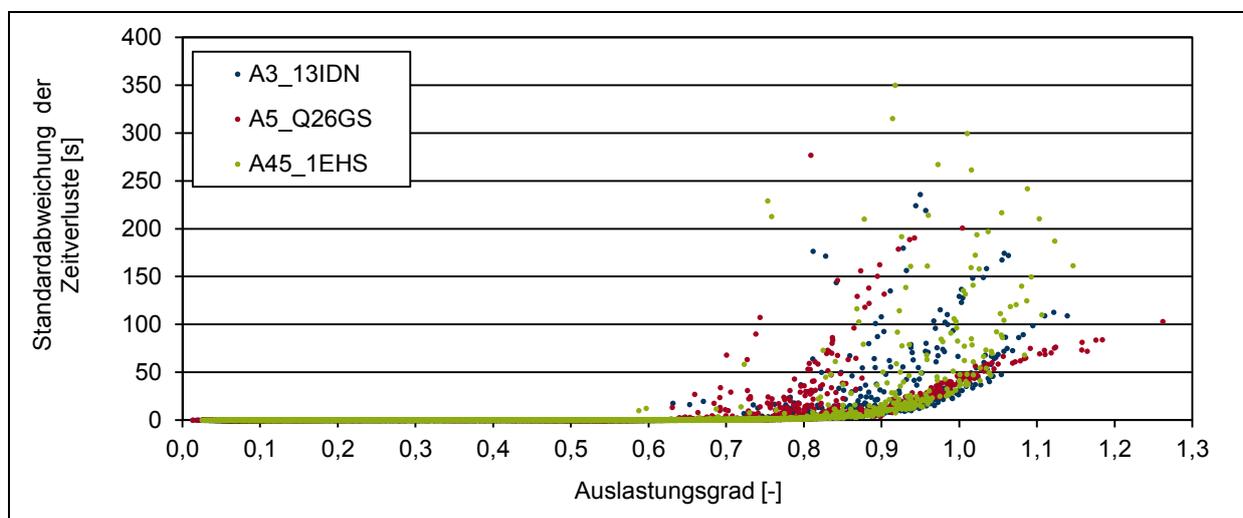


Bild 5-4: Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad und der Standardabweichung der Reisezeitverluste für drei Beispielquerschnitte

Analog zur Beschreibung der mittleren Reisezeitverluste wurde auch bei der Modellierung des Zusammenhangs zwischen dem Auslastungsgrad und der Standardabweichung der Reisezeitverluste für alle Untersuchungstrecken eine gute Übereinstimmung im Verlauf und damit eine geringe Fehlerquadratsumme mit einer verschobenen Potenzfunktion erreicht:

$$s_{tv}(x) = \begin{cases} b_1 \cdot (x - 0,75)^{b_2} & \text{für } x \geq 0,75 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5-3)$$

mit:

s_{tv} = Standardabweichung der Reisezeitverluste [h]

x = Auslastungsgrad

b_1, b_2 = Modellparameter

Die Anpassung der Modellfunktion an die Klassenmittelwerte sämtlicher Simulationsszenarien ergab die Modellparameter $b_1 = 0,18$ und $b_2 = 1,73$. Somit ergibt sich als Modellfunktion der Zusammenhang:

$$s_{tv}(x) = \begin{cases} 0,18 \cdot (x - 0,75)^{1,73} & \text{für } x \geq 0,75 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5-4)$$

Bild 5-5 zeigt die resultierende Modellfunktion nach Gleichung (5-4) und die Klassenmittelwerte der 50 Beispielstrecken für die beiden Verkehrsnachfrageszenarien N_{30} und N_{50} .

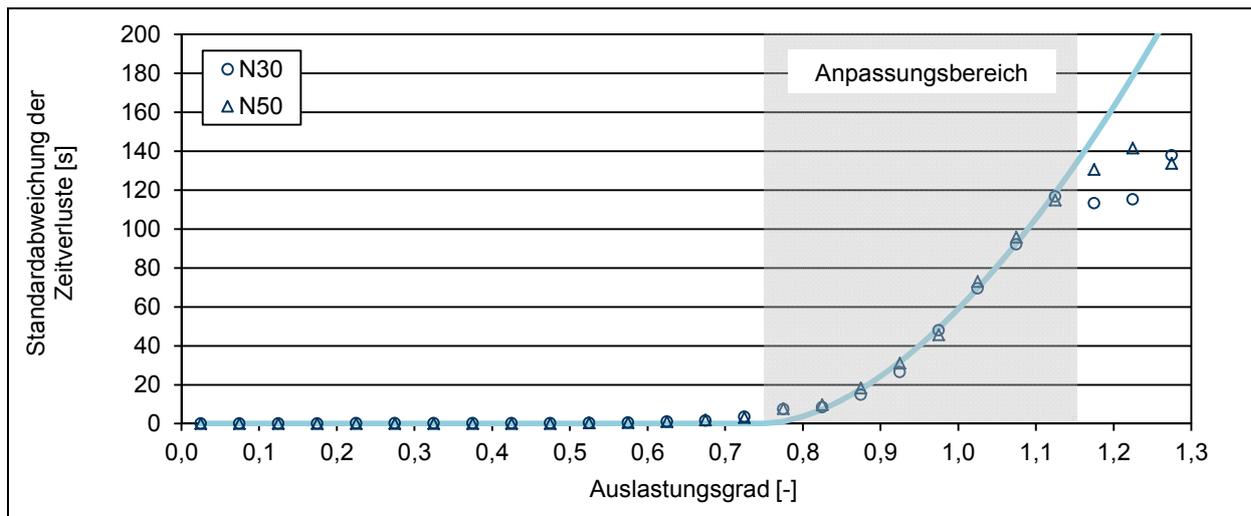


Bild 5-5: Klassenmittelwerte der Verkehrsnachfrageszenarien N_{30} und N_{50} sowie angepasste Modellfunktion zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen dem Auslastungsgrad und der Standardabweichung der Reisezeitverluste

Standardabweichung und Mittelwert der Reisezeitverluste

In Übereinstimmung mit den theoretischen Herleitungen in Kapitel 3 ergibt sich für den Zusammenhang zwischen dem Mittelwert und der Standardabweichung der Reisezeitverluste wie in Bild 5-6 dargestellt eine konkave Form, die mit einer Wurzelfunktion beschrieben werden kann. Zu beachten ist, dass die einzelnen Wertepaare analog zu den vorangegangenen Auswertungen jeweils Mittelwerte in Klassen des Auslastungsgrades repräsentieren.

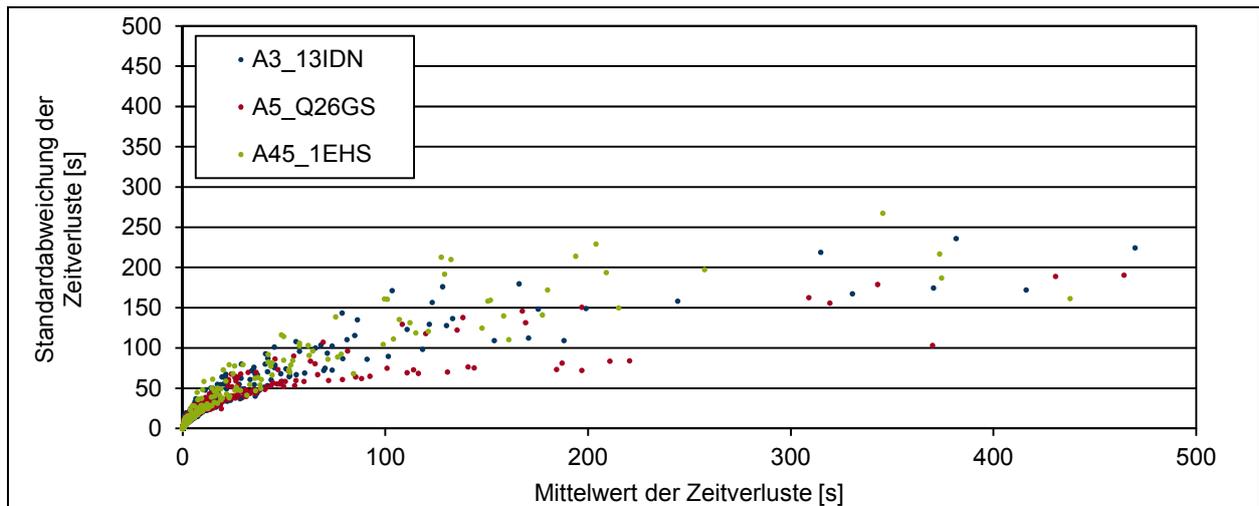


Bild 5-6: Zusammenhang zwischen dem Mittelwert und der Standardabweichung der Reisezeitverluste für drei Beispielquerschnitte

Anhand der funktionalen Zusammenhänge zwischen dem Auslastungsgrad und dem Mittelwert bzw. der Standardabweichung der Reisezeitverluste (Gleichung (5-1) bzw. (5-3)) kann der funktionale Zusammenhang zwischen dem Mittelwert und der Standardabweichung analytisch hergeleitet werden. Dies ergibt:

$$s_{tv}(t_v) = b_1 \cdot a_1^{-\frac{b_2}{a_2}} \cdot t_v^{\frac{b_2}{a_2}} = c_1 \cdot t_v^{c_2} \quad (5-5)$$

mit:

s_{tv} = Standardabweichung der Reisezeitverluste [h]

t_v = Mittelwert der Reisezeitverluste [h]

$c_1 = b_1 \cdot a_1^{-\frac{b_2}{a_2}}$ = Modellparameter

$c_2 = \frac{b_2}{a_2}$ = Modellparameter

a_1, a_2 = Modellparameter aus Gleichung (5-1)

b_1, b_2 = Modellparameter aus Gleichung (5-3)

Aus der Umrechnung ergibt sich $c_1 = 0,14$ und $c_2 = 0,58$. Somit lautet der Zusammenhang:

$$s_{tv}(t_v) = 0,14 \cdot t_v^{0,58} \quad (5-6)$$

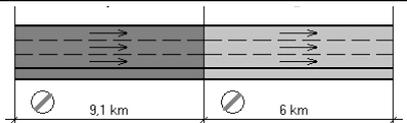
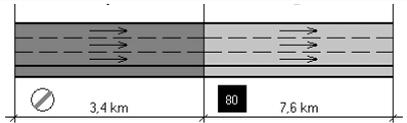
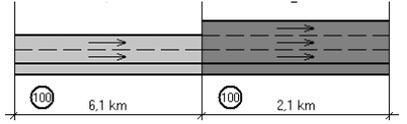
Die direkte Modellanpassung ergibt mit den Parametern $c_1 = 0,15$ und $c_2 = 0,60$ praktisch denselben Funktionsverlauf.

5.2 Routenbezogener Zusammenhang

Um den Zusammenhang der Reisezeitverluste in aufeinander folgenden Streckenabschnitten zu untersuchen, wurde die statistische Abhängigkeit der Reisezeitverteilung durch eine Korrelationsanalyse bestimmt.

Mit dem Programm KAPASIM wurden 50 Strecken von Autobahnen zwischen zwei Anschlussstellen untersucht. Davon wurden 15 Strecken aufgrund der Änderung der Fahrstreifenanzahl, der Längsneigung oder der Geschwindigkeitsregelung in zwei Teilstrecken unterteilt. Dabei befindet sich der Engpass in acht Fällen auf der ersten Teilstrecke und in sieben Fällen auf der zweiten Teilstrecke. Für die drei Beispielquerschnitte werden im Folgenden sowohl die Streckenaufteilung (Tab. 5-2) als auch die Ergebnisse der Korrelationsanalyse für das Verkehrsnachfrageszenario N_{50} (Bild 5-7 bis Bild 5-9) dargestellt.

Die Korrelation beschreibt die Stärke des Zusammenhangs zweier Merkmale. Der Korrelationskoeffizient nimmt dabei Werte im Bereich von +1 bis -1 an. Ein Wert von +1 bedeutet eine perfekte positive Korrelation, d. h. dass bei steigenden Werten des ersten Merkmals die des zweiten Merkmals linear steigen und umgekehrt. Übertragen auf den vorliegenden Fall bedeutet das, dass hohe Reisezeitverluste in einem Streckenabschnitt mit hohen Reisezeitverlusten in dem stromauf- oder stromabwärts gelegenen Streckenabschnitt einhergehen. Analog dazu bedeutet ein Wert von -1 eine perfekte negative Korrelation, d. h. dass bei steigenden Werten des einen Merkmals die des anderen Merkmals linear sinken. Wenn kein Zusammenhang zwischen den Merkmalen besteht, nimmt der Korrelationskoeffizient den Wert 0 an. Werte im Bereich von -0,3 bis +0,3 werden in der Regel als sogenannter kleiner Zusammenhang gesehen. In Bild 5-7 bis Bild 5-9 (links) sind diese Bereiche bei der Darstellung der Häufigkeiten der Werte daher hervorgehoben. Für die drei Beispielquerschnitte liegen lediglich 7 %, 2 % bzw. 1 % der Werte außerhalb dieser Grenzen. Zudem ist kein funktionaler Zusammenhang des Korrelationskoeffizienten vom Auslastungsgrad erkennbar (rechte Darstellung in den Bildern). Somit kann auf der Grundlage dieser Analyse davon ausgegangen werden, dass kein ausgeprägter Zusammenhang zwischen den von Engpässen in aufeinander folgenden Streckenabschnitten ausgehenden Reisezeitverlusten besteht. Die Reisezeitverluste in aufeinander folgenden Streckenabschnitten können daher näherungsweise als statistisch unabhängig voneinander aufgefasst werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse der makroskopischen Simulationen alle Reisezeitverluste dem jeweils maßgebenden Engpass zuordnen und nicht die in der Realität unter Umständen auftretenden Wechselwirkungen zwischen aufeinander folgenden Engpässen aufgrund von Rückstau nachbilden.

MQ	Grund für die Änderung der Kapazität	Maßgebender Engpass	Darstellung der Strecke
A3/13IDN	Änderung der Längsneigung	Teilstrecke 2	
A5/Q26GS	Änderung der Geschwindigkeitsbeschränkung	Teilstrecke 1	
A45/1EHS	Änderung der Fahrstreifenanzahl	Teilstrecke 1	

Tab. 5-2: Charakteristik der Streckenabschnitte der drei Beispielstrecken

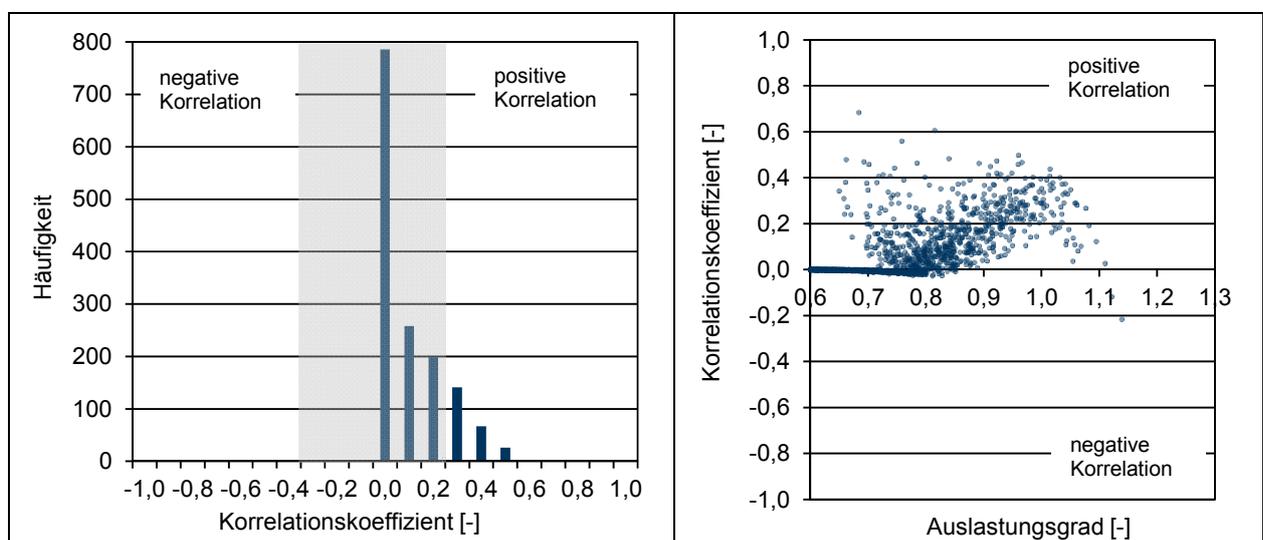


Bild 5-7: Korrelationskoeffizient für das Verkehrsnachfrageszenario N_{50} der Beispielstrecke MQ A3/13IDN

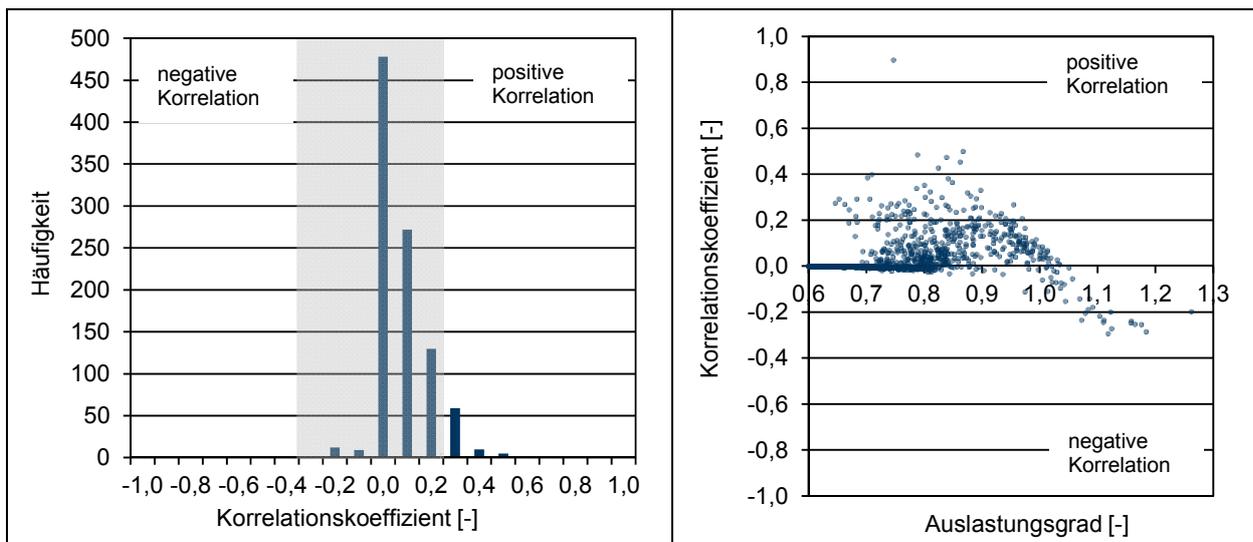


Bild 5-8: Korrelationskoeffizient für das Verkehrsnachfrageszenario N_{50} der Beispilstrecke MQ A5/Q26GS

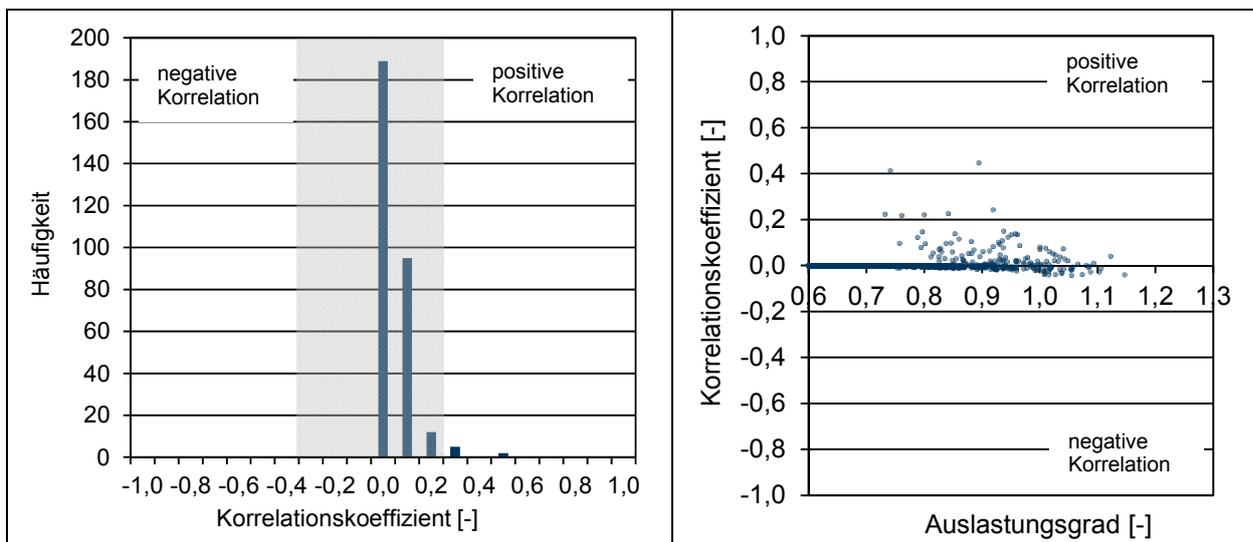


Bild 5-9: Korrelationskoeffizient für das Verkehrsnachfrageszenario N_{50} der Beispilstrecke MQ A45/1EHS

6 Validierung anhand empirischer Reisezeiten

Die Auswertung der ASDA/FOTO-Reisezeitdaten für 17 Engpässe des hessischen Autobahnnetzes (vgl. Tab. 4-2) ergab bereits bei mittleren Auslastungsgraden erhebliche Streuungen der Einzelwerte. Bild 6-1 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad und dem Mittelwert der Reisezeitverluste, in Bild 6-2 ist der Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad und der Standardabweichung der Reisezeitverluste dargestellt. Die Darstellungen beziehen sich auf die Auswertung des Mittelwertes und der Standardabweichung der Reisezeitverluste in 5-Minuten-Intervallen und eine Eingruppierung der Werte in Klassen des Auslastungsgrades der Breite 0,05. Zusätzlich sind die Modellfunktionen gemäß Gleichung (5-2) bzw. (5-4) dargestellt.

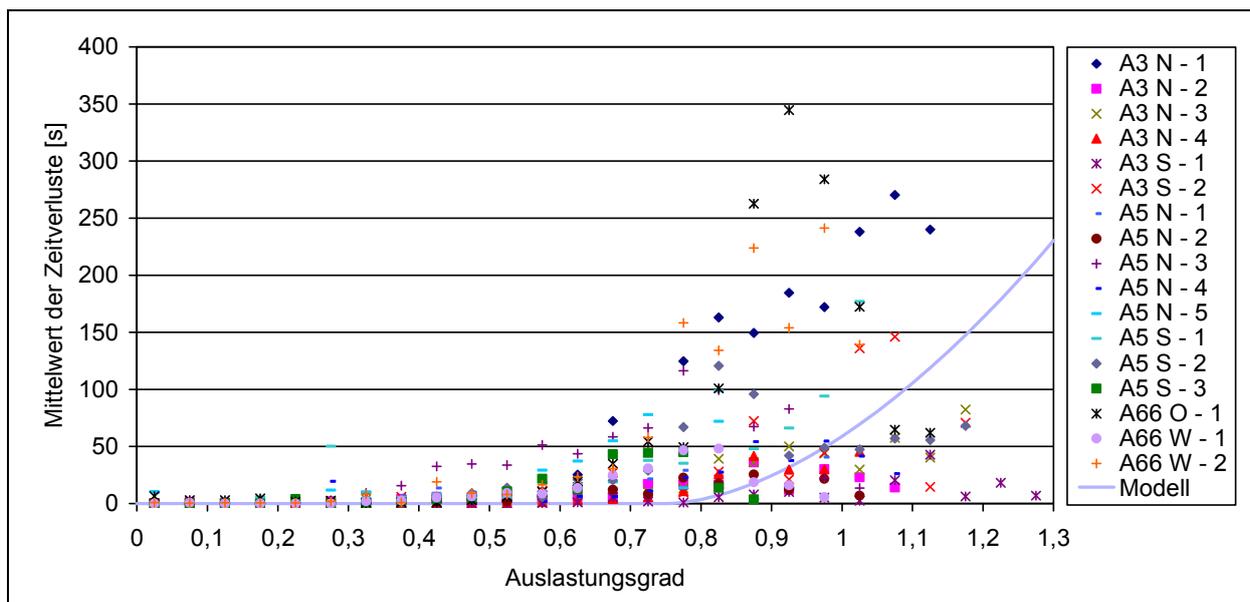


Bild 6-1: Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad und dem Mittelwert der Reisezeitverluste in 5-Minuten-Intervallen für die 17 analysierten Engpässe gemäß Tab. 4-2

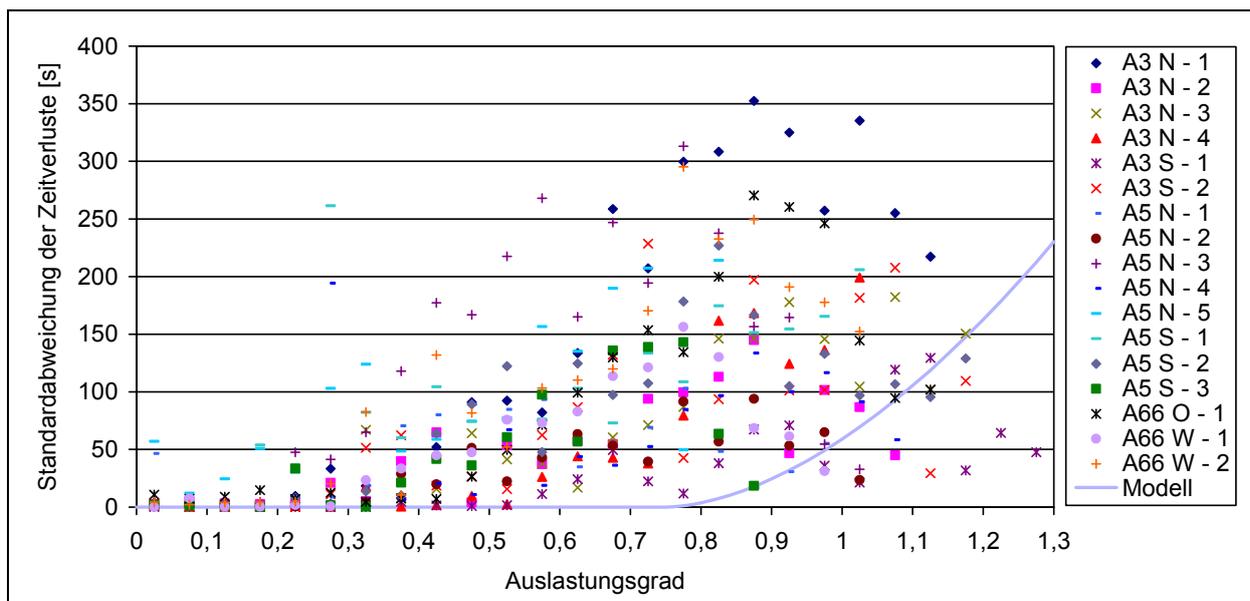


Bild 6-2: Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad und der Standardabweichung der Reisezeitverluste in 5-Minuten-Intervallen für die 17 analysierten Engpässe gemäß Tab. 4-2

Die Mittelwerte und insbesondere die Standardabweichungen der empirisch ermittelten Reisezeitverluste liegen teilweise deutlich über den Werten der makroskopischen Simulationen und den daraus hergeleiteten Modellfunktionen. Diese Unterschiede sind im Wesentlichen durch die folgenden Sachverhalte zu erklären:

- Temporäre Einflüsse wie z. B. Pannenfahrzeuge oder (Bagatell-) Unfälle, die nicht durch den durchgeführten Abgleich mit Unfalldaten herausgefiltert werden konnten, können auch bei mittleren und geringen Auslastungsgraden erhebliche Reisezeitverluste verursachen. Pannen und Bagatellunfälle haben vor allem bei Autobahnen mit temporärer Seitenstreifenfreigabe einen wesentlichen Einfluss auf das Überlastungsgeschehen, da bei solchen Ereignissen der Seitenstreifen nicht freigegeben werden kann und somit die verfügbare Kapazität der Autobahn deutlich verringert wird. Stichprobenhafte Kontrollen der ausgewerteten Daten ergaben, dass bereits ein einziges Ereignis dieser Art erhebliche Auswirkungen auf den Mittelwert und vor allem auf die Standardabweichung der Reisezeitverluste in der zugehörigen Klasse des Auslastungsgrades haben kann.
- Für die Ermittlung des Auslastungsgrades wurde die Streckenkapazität gemäß HBS (FGSV, 2012) des jeweiligen Engpasses angesetzt. Einige der analysierten Engpässe resultieren jedoch in erster Linie aus Überlastungen der Knotenpunkte, so dass der auf die Streckenkapazität bezogene Auslastungsgrad geringer ist als der Auslastungsgrad des maßgebenden Knotenpunktelements. Dadurch verschieben sich die Punkte in Bild 6-1 und Bild 6-2 nach links. Besonders deutlich ist dies in Bild 6-1 bei den Engpässen A 66 O - 1 und A 66 W - 2 im Zuge der Autobahn A 66 zu erkennen, die im Wesentlichen aus Überlastungen am Schiersteiner Kreuz resultieren.

Die Unschärfen, die aus der Ermittlung des Auslastungsgrades anhand von Bemessungskapazitäten entstehen, fallen beim Zusammenhang zwischen dem Mittelwert und der Standardabweichung der Reisezeitverluste weniger ins Gewicht, da mögliche Ungenauigkeiten bei der Zuordnung zu Klassen des Auslastungsgrades beide Werte betreffen. Der in Bild 6-3 dargestellte Zusammenhang mit den Einzelwerten der 17 analysierten Engpässe des hessischen Autobahnnetzes zeigt einen Verlauf, der deutlich einer Wurzelfunktion entsprechend dem aus den makroskopischen Simulationen abgeleiteten Modell entspricht. Allerdings liegen auch hier die empirischen Daten über der Modellfunktion. Dies ist aufgrund des o. g. Sachverhaltes, dass temporäre betriebliche Einflüsse auf das Überlastungsgeschehen vor allem zu einer höheren Standardabweichung der Reisezeitverluste führen, plausibel.

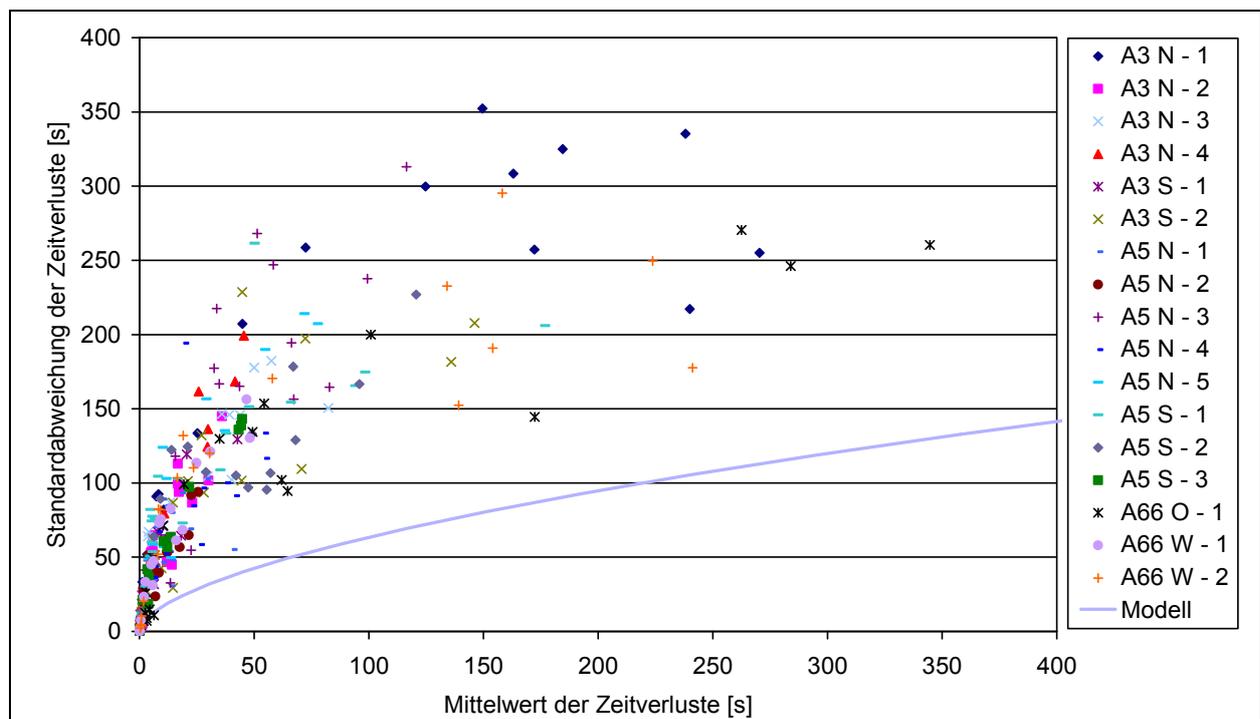


Bild 6-3: Zusammenhang zwischen dem Mittelwert und der Standardabweichung der Reisezeitverluste in 5-Minuten-Intervallen für die 17 analysierten Engpässe gemäß Tab. 4-2

Zur Überprüfung des Einflusses der Intervalldauer für die Ermittlung der Reisezeitverluste und der Klassenbreite für die Zuordnung zum Auslastungsgrad wurden Kontrollauswertungen mit aggregierten Reisezeitverlusten in 15-Minuten- und Stunden-Intervallen sowie einer Klassenbreite von 0,1 durchgeführt. Bild 6-4 zeigt am Beispiel des Zusammenhangs zwischen dem Mittelwert und der Standardabweichung der Reisezeitverluste, dass die resultierenden Punktwolken weitgehend deckungsgleich sind. Somit haben beide Parameter keinen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Datenauswertung.

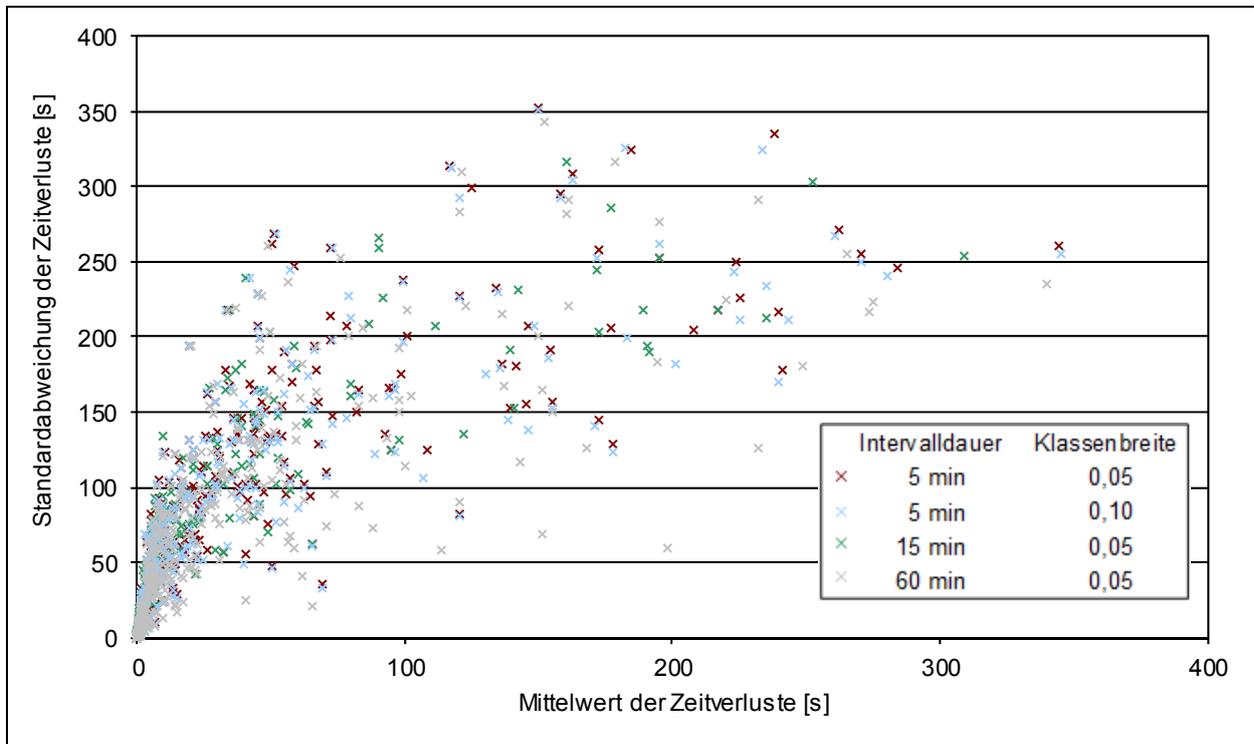


Bild 6-4: Einfluss der Intervalldauer und der Klassenbreite auf den Zusammenhang zwischen dem Mittelwert und der Standardabweichung der Reisezeitverluste

7 Modellspezifikation für die BVWP-Maßnahmenbewertung

7.1 Eigenschaften der entwickelten Modellfunktion

Das entwickelte Modell zur Beschreibung der Standardabweichung der Reisezeitverluste in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad gemäß Gleichung (5-4) ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet, die im Hinblick auf die Anwendung im Rahmen der BVWP-Maßnahmenbewertung zu berücksichtigen sind:

- Das Modell beschreibt die Standardabweichung der fahrzeugbezogenen Reisezeitverluste infolge von Überlastungen an einem Engpass in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad. Der Auslastungsgrad ergibt sich als Quotient der Verkehrsnachfrage und der Bemessungskapazität im Sinne des HBS. Aufgrund von Abweichungen der tatsächlichen (stochastischen) Kapazität von der (deterministischen) Bemessungskapazität und der möglichen Auswirkungen von Überlastungen in den Spitzenstunden auf den Verkehrsablauf in den folgenden Stunden treten auch bei Auslastungsgraden $x < 1$ bereits Reisezeitverluste auf. Der Wertebereich, in dem die Modellfunktion Standardabweichungen $s_{tv} > 0$ liefert, wurde auf Auslastungsgrade $x > 0,75$, d. h. den Bereich der Qualitätsstufen D bis F nach HBS, beschränkt.
- Die Standardabweichung der fahrzeugbezogenen Reisezeitverluste wird als Näherungslösung für die Standardabweichung der Gesamtreisezeit angesehen, da Geschwindigkeitsdifferenzen im fließenden Verkehr im Vergleich zu Übergängen in Stau und zähfließenden Verkehr nur vergleichsweise geringe Auswirkungen auf die Variabilität der Reisezeit haben. Darüber hinaus ist die individuelle Reisezeit im fließenden Verkehr durch das Geschwindigkeitsverhalten des einzelnen Verkehrsteilnehmers beeinflussbar, so dass die Variabilität dieser Reisezeit nur teilweise als Merkmal des Ausbaustands der Verkehrsinfrastruktur angesehen werden kann.
- Die Modellfunktion beschreibt die punktuell von Engpässen im Autobahnnetz ausgehende Variabilität der überlastungsbedingten Reisezeitverluste unabhängig von der Streckenlänge. Das Modell wurde anhand einer Analyse einzelner Engpässe von Autobahnen, die in ihrem Umfeld den höchsten Auslastungsgrad aufweisen und anhand der kapazitätsrelevanten Streckenparameter nach HBS beschrieben werden, entwickelt. Auf der Grundlage der Simulationsergebnisse wurde durch eine Korrelationsanalyse aufgezeigt, dass die von aufeinander folgenden Engpässen ausgehenden Reisezeitverluste in guter Näherung als statistisch voneinander unabhängig angesehen werden können, wenngleich in der Realität durch die räumliche Stauausbreitung Wechselwirkungen zwischen solchen Engpässen auftreten können.

Die Frage der Behandlung mehrerer aufeinander folgender Engpässe bei der Modellanwendung wird im folgenden Kapitel 7.2 näher erörtert.

- Die Standardabweichung der Reisezeit über eine Route mit mehreren Strecken (Engpässen) kann gemäß Gleichung (3-3) als Wurzel aus der Summe der Varianzen der Reisezeit der einzelnen Strecken ermittelt werden.
- Die Modellfunktion wurde auf der Grundlage makroskopischer Simulationen entwickelt, in denen temporäre betriebliche Einflüsse auf den Verkehrsablauf wie z. B. Pannen, Unfälle und Baustellen ausgeschlossen wurden. Die ermittelten Parameter des Modells repräsentieren somit die Variabilität der Reisezeitverluste, die allein auf Kapazitätsdefizite der Verkehrsinfrastruktur zurückzuführen ist. Die Modellvalidierung anhand empirischer Daten hat gezeigt, dass in der Realität aufgrund temporärer Einflüsse auf die Kapazität höhere Standardabweichungen der Reisezeitverluste erreicht werden.
- Die Modellfunktion wurde mit einem Simulationsmodell entwickelt, welches die überlastungsbedingten Reisezeitverluste anhand eines Warteschlangenmodells durch einen Vergleich der Verkehrsnachfrage und der Kapazität ermittelt. Die Modellfunktion wurde für Autobahnen entwickelt und ist damit auch für autobahnähnlich ausgebaute Landstraßen anwendbar. Aufgrund der Allgemeingültigkeit der Warteschlangentheorie, die im Verkehrswesen u. a. auch für die Bemessung plangleicher Knotenpunkte mit und ohne Lichtsignalanlage verwendet wird, kann die entwickelte Modellfunktion näherungsweise auch auf andere Verkehrsanlagen wie z. B. zügig trassierte einbahnige Landstraßen übertragen werden. Dies gilt jedoch nicht für Ortsdurchfahrten, da die Reisezeit hier systematisch durch geringe Geschwindigkeiten, eine hohe Knotenpunktdichte und eine Vielzahl weiterer Einflüsse wie z. B. nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer, Lieferverkehr oder Parkvorgänge beeinflusst wird.

7.2 Einfluss der Streckenlänge

Da das Ausmaß von Reisezeitverlusten – im Gegensatz zu den Reisezeiten im fließenden Verkehr – nur vom Auslastungsgrad des Engpasses, nicht jedoch von der Streckenlänge des Engpassabschnitts abhängig ist, geht die Streckenlänge nicht in den Modellansatz nach Gleichung (5-3) ein. Für die routenbezogene Anwendung setzt diese Modelleigenschaft allerdings voraus, dass jeder Engpass nur einmal in die Auswertung eingeht. Da das für die BVWP-Maßnahmenbewertung eingesetzte Netzmodell – wie die meisten Verkehrsmodelle – streckenbezogen aufgebaut ist, muss beachtet werden, dass durch eine Unterteilung eines Engpasses in mehrere Teilstrecken keine mehrfache Berücksichtigung der Auswirkungen eines Engpasses entsteht.

Zur Beurteilung der Anwendbarkeit des entwickelten Modellansatzes wurde eine Analyse der Verteilung der Streckenlängen des BVWP-Netzmodells durchgeführt. Dazu wurden Verteilungen der Streckenlängen in Abhängigkeit von der Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs bezogen auf den Ist-Auslastungsgrad im Jahr 2010 differenziert nach Straßenklassen von der Ingenieurgruppe IVV bereitgestellt. Die Analyse ergab, dass die mit Qualitätsstufe F bewerteten Strecken im Mittel deutlich kürzer sind als der Mittelwert sämtlicher Streckenlängen. 59 % der Strecken von Bundesautobahnen und 85 % der Strecken von zweistreifigen Landstraßen (außerorts) mit Qualitätsstufe F sind kürzer als 2000 m.

In einem zweiten Auswertungsschritt wurde analysiert, wie häufig im Netzmodell mehrere Strecken mit Qualitätsstufe F aufeinander folgen. Dafür wurden die in Bild 7-1 dargestellten Verteilungen der Engpasslängen für Autobahnen und Landstraßen ermittelt. Als Länge des Engpasses wird dabei die Gesamtlänge direkt aufeinander folgender Strecken mit Qualitätsstufe F definiert. Die Auswertung zeigt, dass vor allem Engpässe im Zuge von Landstraßen häufig sehr kurz sind. 50 % dieser Engpässe sind höchstens 1000 m lang, 10 % sogar kürzer als 30 m. Auf Autobahnen sind 11 % der Engpässe kürzer als 500 m und 30 % kürzer als 1000 m. 47 % der Engpässe auf Autobahnen und 56 % der Engpässe auf Landstraßen setzen sich aus mehreren Strecken zusammen. Inwieweit sich die Auslastungsgrade der einzelnen Strecken innerhalb eines Engpasses voneinander unterscheiden, konnte anhand der vorliegenden Daten nicht beurteilt werden.

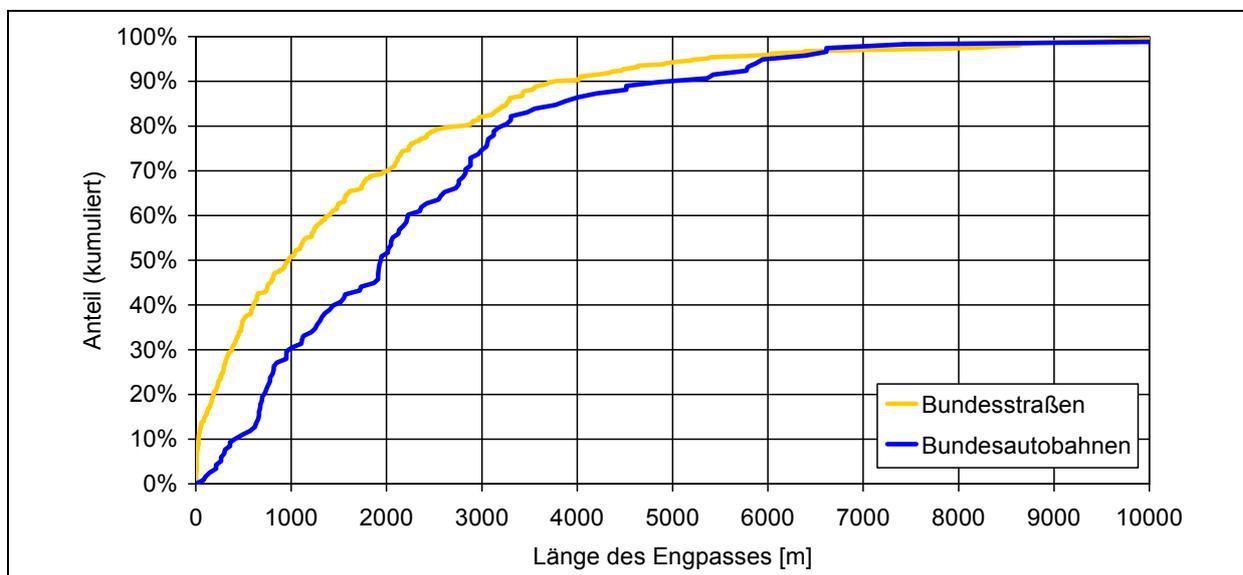


Bild 7-1: Verteilung der Streckenlängen der Autobahnen im BVWP-Bewertungsmodell

Da sich etwa die Hälfte der Engpassbereiche des BVWP-Netzmodells aus mehreren Strecken zusammensetzt, ist eine direkte Anwendung der entwickelten Modellfunktion zur Ermittlung der Standardabweichung der Reisezeitverluste nicht sinnvoll. Stattdessen kommen für die Anwendung zwei Varianten in Betracht:

- (1) Zusammenfassung der aufeinander folgenden Teilstrecken eines Engpasses und Bewertung der Teilstrecke mit dem höchsten Auslastungsgrad,
- (2) Erweiterung des Modellansatzes um eine Komponente zur Längengewichtung.

Für Variante (1) sind eindeutige Kriterien zu definieren, nach denen aufeinander folgende Teilstrecken eines Engpasses zusammengefasst werden. Am einfachsten umzusetzen ist die zusammenfassende Betrachtung aller Teilstrecken zwischen zwei benachbarten Knotenpunkten (bzw. bei Landstraßen zwischen Verknüpfungspunkten mit gleich- oder höherrangigen Straßen). Somit wird für jede Strecke zwischen benachbarten Knotenpunkten nur der maßgebende Engpass mit dem höchsten Auslastungsgrad bewertet. Dadurch wird insbesondere verhindert, dass sich die teilweise sehr kurzen Engpasslängen auf Landstraßen durch eine Mehrfachbewertung überproportional auf das Bewertungsergebnis auswirken.

Für die Umsetzung von Variante (2) ist der Modellansatz nach Gleichung (5-3) um eine Komponente zur Längengewichtung zu erweitern. Um zu erreichen, dass für zwei Teilstrecken mit den Längen L_1 bzw. L_2 und gleichem Auslastungsgrad $x_1 = x_2$ bei der routenbezogenen Bewertung nach Gleichung (3-3) dasselbe Ergebnis berechnet wird wie für die Gesamtstrecke der Länge $L = L_1 + L_2$ mit Auslastungsgrad $x = x_1 = x_2$, ist als Gewichtungsterm die Wurzel des Quotienten aus der Streckenlänge und der Bezugslänge anzusetzen:

$$s_{tv}(x) = \begin{cases} b_1 \cdot (x - 0,75)^{b_2} \cdot \sqrt{\frac{L}{L_{\text{Bezug}}}} & \text{für } x \geq 0,75 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (7-1)$$

mit:

s_{tv} = Standardabweichung der Reisezeitverluste [h]

x = Auslastungsgrad

b_1, b_2 = Modellparameter

L = Streckenlänge [km]

L_{Bezug} = Bezugslänge [km]

Als Bezugslänge sind vor dem Hintergrund der durchschnittlichen Strecken- und Engpasslängen des BVWP-Netzmodells (siehe oben) Werte in der Größenordnung von $L_{\text{Bezug}} = 2$ bis 3 km sinnvoll. Um zu vermeiden, dass längere Strecken mit einem Gewicht von mehr als 1 in die Auswertung eingehen, kann die Streckenlänge L in Gleichung (7-1) auf Werte bis zur Bezugslänge beschränkt werden. Allerdings ist in diesem Fall bei einer hoch ausgelasteten Strecke mit einer Länge $L > L_{\text{Bezug}}$ die Konsistenz der Bewertungsergebnisse bei einer Unterteilung in zwei Teilstrecken nicht mehr gegeben.

7.3 Modellspezifikation

Für die Anwendung im Rahmen der BVWP-Maßnahmenbewertung wird die Modellfunktion zur Ermittlung der Standardabweichung der überlastungsbedingten Reisezeitverluste als Näherungslösung für die Ermittlung der Standardabweichung der Reisezeit verwendet. Da die Standardabweichung der Reisezeit durch die Vernachlässigung der Geschwindigkeitsdifferenzen im fließenden Verkehr eher unterschätzt wird, werden die Modellparameter auf eine Nachkommastelle gerundet, woraus eine etwas höhere Standardabweichung bei gleichem Auslastungsgrad resultiert. Das Modell zur Ermittlung der Standardabweichung der Reisezeit für eine einzelne Strecke lautet somit:

$$s_R(x) = \begin{cases} 0,2 \cdot (x - 0,75)^{1,7} & \text{für } x \geq 0,75 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (7-2)$$

mit:

s_R = Streckenbezogene Standardabweichung der Reisezeit [h]

x = Auslastungsgrad der Strecke

Das Modell ist für jede einzelne Strecke in Abhängigkeit vom (maximalen) Auslastungsgrad der Strecke (ggf. unter Zusammenfassung aufeinander folgender Teilstrecken desselben Engpasses) anzuwenden.

Die Modellvariante unter Berücksichtigung einer Komponente zur Längengewichtung lautet:

$$s_R(x) = \begin{cases} 0,2 \cdot (x - 0,75)^{1,7} \cdot \sqrt{\frac{L}{L_{\text{Bezug}}}} & \text{für } x \geq 0,75 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (7-3)$$

mit:

s_R = Streckenbezogene Standardabweichung der Reisezeit [h]

x = Auslastungsgrad der Strecke

L = Streckenlänge [km]

L_{Bezug} = Bezugslänge [km]

Aus den Standardabweichungen der n einzelnen Strecken innerhalb einer Route ist anschließend die Standardabweichung der Reisezeit für die Gesamtroute nach folgender Gleichung zu ermitteln:

$$s_{R,\text{ges}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n s_{R,i}^2} \quad (7-4)$$

mit:

$s_{R,\text{ges}}$ = Standardabweichung der Reisezeit auf der Gesamtroute [h]

$s_{R,i}$ = Standardabweichung der Reisezeit auf der Strecke i nach Gleichung (7-2) bzw. (7-3) [h]

n = Anzahl der Strecken innerhalb der Route

8 Zusammenfassung

In der vorliegenden Untersuchung wurde das Mengengerüst für die Berücksichtigung der Zuverlässigkeit des Verkehrsträgers Straße im Rahmen der Bewertung der Maßnahmen des BVWP 2015 erarbeitet. Dazu wurde ein Modell zur Beschreibung der Standardabweichung der Reisezeit, die als maßgebende Zuverlässigkeitskenngröße in einer Vorstudie ausgewählt wurde, entwickelt.

Das Modell basiert auf einer Beschreibung der Standardabweichung der überlastungsbedingten Reisezeitverluste auf Strecken von Autobahnen in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad. Die aus Überlastungen resultierende Variabilität der Reisezeitverluste stellt die für die Bewertung der Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs maßgebende Komponente der Standardabweichung der Reisezeit dar, weil die Auswirkungen von Geschwindigkeitsdifferenzen im fließenden Verkehr vergleichsweise gering sind. Die ausschließliche Beschreibung der Reisezeitverluste vereinfacht zudem die Modellanwendung durch eine einheitliche Behandlung aller Fahrzeugarten (Pkw- und Schwerverkehr) und eine Beschränkung des Anwendungsbereichs der Modellfunktion auf hohe Auslastungsgrade. Das für Autobahnen entwickelte Modell ist auf autobahnähnlich ausgebaute Landstraßen und näherungsweise auch auf einbahnige Landstraßen außerhalb geschlossener Ortschaften übertragbar.

Die Entwicklung des Modells erfolgte auf der Grundlage von makroskopischen Simulationen des Verkehrsablaufs im Sinne einer Ganzjahresanalyse mit dem Programm KAPASIM. Das Programm ermittelt die aus Überlastungen resultierenden Reisezeitverluste durch einen Vergleich von Ganglinien der Verkehrsnachfrage und der Kapazität mit einem Warteschlangenmodell. Im Gegensatz zur empirischen Ermittlung von Reisezeiten kann im Simulationsmodell die Variabilität der Reisezeitverluste durch nahezu beliebig viele Wiederholungen der Simulation unter Variation der stochastischen Eingangsgrößen sowie unter Ausschluss temporärer Einflüsse auf das Überlastungsgeschehen wie z. B. Pannen und Unfälle nachgebildet werden. Damit repräsentiert die entwickelte Modellfunktion die Variabilität der Reisezeit, die allein auf Kapazitätsdefizite der Verkehrsinfrastruktur zurückzuführen ist.

Für die makroskopischen Simulationen wurde der Verkehrsablauf auf 50 Strecken von Bundesautobahnen nachgebildet. Die Verkehrsnachfrage wurde auf der Grundlage der Daten von Dauerzählstellen ermittelt. Da auf einigen Strecken nur selten hohe Auslastungsgrade erreicht werden, wurde die Jahressganglinie der Verkehrsnachfrage in je zwei Szenarien proportional so hochgerechnet, dass die Verkehrsnachfrage in der 30. bzw. 50. Stunde der Kapazität der Strecke nach HBS entspricht. Für jede Untersuchungsstrecke und jedes Verkehrsnachfrageszenario wurden 1000 Wiederholungen der Simulation durchgeführt und für jede Stunde des Jahres der Mittelwert und die Standardabweichung der Reisezeitverluste aus den Wiederholungen ermittelt. Für die Herleitung der Modellfunktion wurde die Standardabweichung der Reisezeitverluste in Bezug zum Auslastungsgrad gesetzt. Der Zusammenhang kann durch eine verschobene Potenzfunktion beschrieben werden. Darüber hinaus wurden auch die Zusammenhänge zwischen dem Mittelwert der Reisezeitverluste und dem Auslastungsgrad sowie zwischen dem Mittelwert und der Standardabweichung der Reisezeitverluste analysiert. Eine Korrelationsanalyse ergab, dass die von aufeinander folgenden Engpässen ausgehenden Reisezeitverluste näherungsweise als statistisch voneinander unabhängig angesehen werden können.

Die in den makroskopischen Simulationen ermittelten Zusammenhänge wurden anhand von empirischen Reisezeitverlusten von Autobahnen in Hessen aus dem ASDA/FOTO-System validiert. Die Auswertung der ASDA/FOTO-Daten ergab im Vergleich zu den Simulationsergebnissen ähnliche Funktionsverläufe, jedoch vor allem höhere Standardabweichungen der Reisezeitverluste. Dies kann im Wesentlichen durch temporäre Einflüsse auf das Überlastungsgeschehen wie z. B. Pannen und Unfälle, die bei der Auswertung der empirischen Daten nicht vollständig ausgeschlossen werden können, erklärt werden. Somit können die in den Simulationen ermittelten Zusammenhänge insgesamt als plausibel angesehen werden.

Die entwickelte Modellfunktion zur Beschreibung der Standardabweichung der Reisezeit bezieht sich auf die Analyse einer Strecke. Die Standardabweichung der Reisezeit auf einer Route wird anschließend als Wurzel aus der Summe der Varianzen der Reisezeit der einzelnen Strecken im Verlauf der Route ermittelt. Die Längen der einzelnen Strecken gehen nicht in die Modellfunktion ein, da das Ausmaß von Reisezeitverlusten – im Gegensatz zu den Reisezeiten im fließenden Verkehr – nur vom Auslastungsgrad, nicht jedoch von der Streckenlänge des jeweiligen Engpasses abhängt. Im Hinblick auf die Anwendung des Modells ist jedoch zu berücksichtigen, dass das für die Bewertung der Maßnahmen des BVWP verwendete Netzmodell auch Engpässe aufweist, die sich aus mehreren sehr kurzen Strecken

zusammensetzen. Zur Vermeidung einer mehrfachen Berücksichtigung der Auswirkungen desselben Engpasses wurden zwei Varianten für die Modellanwendung vorgeschlagen: Die zusammenfassende Bewertung der Teilstrecken von Engpässen anhand der Teilstrecke mit dem höchsten Auslastungsgrad sowie die Erweiterung des Modells um eine Komponente zur Längengewichtung. Die bessere Übereinstimmung mit dem theoretischen Grundkonzept des entwickelten Modells spricht dabei für die zusammenfassende Bewertung der Teilstrecken von Engpässen, die endgültige Entscheidung kann aber nur in Abhängigkeit von der technischen Umsetzbarkeit und dem für die Erweiterung des Bewertungsmodells erforderlichen Aufwand getroffen werden.

Literatur

- ARNOLD, M.; BÖTTCHER, S.: Bemessungsverkehrsstärken vor dem Hintergrund sich verändernder Pegel. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 922, Bonn, 2005.
- BMVBS – Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Zuverlässigkeit der Verkehrssysteme – Teil 1. Straßenverkehrstechnik, Heft 1/2009.
- BRILON, W.; ZURLINDEN, H.: Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 870, Bonn, 2003.
- BRILON, W.; ZURLINDEN, H.; GEISTEFELDT, J.: Ganzjahresanalyse des Verkehrsflusses auf Autobahnen. Straßenverkehrstechnik, Heft 11/2004.
- BRILON, W.; GEISTEFELDT, J.; REGLER, M.: Entwicklung von Zielgrößen für die Verkehrsbeeinflussung auf Bundesfernstraßen in Hessen. Schlussbericht zum Forschungsprojekt im Auftrag des Hessischen Landesamts für Straßen- und Verkehrswesen, Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, 2006.
- FGSV: Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen EWS (Aktualisierung der RAS-W '86), Ausgabe 1997, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 1997.
- FGSV: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2001.
- FGSV: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) – Entwurf der fortgeschriebenen Fassung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2012.
- GEISTEFELDT, J.: Modellierung der Verkehrsnachfrage mit tagesindividuellen Typganglinien. Tagungsband zur HEUREKA '08 – Optimierung in Verkehr und Transport. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2008.
- GEISTEFELDT, J.; BRILON, W.: A Comparative Assessment of Stochastic Capacity Estimation Methods. In: Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee – Proceedings of the 18th International Symposium on Transportation and Traffic Theory. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 2009.
- GEISTEFELDT, J.; HOHMANN, S.; ESTEL, A.: Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen. Schlussbericht zum Forschungsauftrag FE03.440/2008/AGB der Bundesanstalt für Straßenwesen, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, 2012.
- HELLINGA, B.: Defining, Measuring, and Modelling Transportation Network Reliability. Final Report, Delft University of Technology, 2011.
- KERNER, B.S.: Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control. The Long Road to Three-Phase Traffic Theory. Springer Verlag, Berlin, 2009.
- MINDERHOUD, M.M.; BOTMA, H.; BOVY, P.H.L.: Assessment of Roadway Capacity Estimation Methods. Transportation Research Record – Journal of the Transportation Research Board, No. 1572, Washington D.C., 1997.
- SIGNIFICANCE; GOUDAPPEL COFFENG; NEA: Erfassung des Indikators Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung. Schlussbericht zum Forschungsauftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2012.
- TRB: Analytical Procedures for Determining the Impacts of Reliability Mitigation Strategies. SHRP 2 Report S2-L03-RR-1, Transportation Research Board (Hrsg.), Washington D.C., 2013.