

Quantifizierung staubbedingter jährlicher Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 161

The logo for the Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) is displayed in a stylized, lowercase, green font with a white outline. The letters are bold and modern.

Quantifizierung staubedingter jährlicher Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen

Infrastrukturbedingte Kapazitätsengpässe

von

Gerhard Listl
Joachim C. Otto
Heinz Zackor

Professor Dr.-Ing. Heinz Zackor - Ingenieurberatung
Kassel

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 161

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M- Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 01.155/2002/CRB:
Quantifizierung staubbedingter jährlicher Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen - Infrastrukturbedingte Kapazitätsengpässe

Projektbetreuung
Lutz Pinkofsky,
Gerd Kellermann

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Referat Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-86509-725-5

Bergisch Gladbach, Oktober 2007

Kurzfassung – Abstract

Quantifizierung staubedingter jährlicher Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen

Ziel des vorliegenden FE-Vorhabens war die Quantifizierung von staubedingten Reisezeitverlusten im Jahr 2000, die auf infrastrukturbedingte Kapazitätsengpässe einschließlich Verkehrsunfällen und Pannen zurückzuführen sind. Zusammen mit den Ergebnissen der „Quantifizierung staubedingter Reisezeitverluste auf Autobahnen – Störungsursache: Arbeitsstellen“ konnte Aufschluss darüber gegeben werden, wie sich die Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen anteilmäßig und in ihrer Größenordnung auf die genannten Störungsursachen aufteilen.

Hierzu wurden im ersten Teil der Arbeit methodisch folgende Aspekte behandelt:

- Aufbau eines Autobahnnetzmodells,
- Modellierung der Verkehrsnachfrage,
- Modellierung der Kapazität,
- Staumodellierung und Ermittlung der Reisezeitverluste.

Im zweiten Teil der Arbeit wurden die Ergebnisse der Verlustzeitberechnung für das Bezugsjahr 2000 ausführlich dokumentiert. In Sensitivitätsanalysen wurde die Stabilität der Berechnungsergebnisse hinsichtlich der Veränderung einzelner Eingangsdaten bestimmt. Dabei kommt der Modellierung der Verlagerung der Verkehrsnachfrage bei vorhandener Überlastung eine herausragende Bedeutung zu. Ohne Berücksichtigung dieser Verlagerung werden unplausible Werte berechnet, wobei die ermittelten Reisezeitverluste um ein Vielfaches höher als mit Berücksichtigung dieses Effekts liegen. Da zum Ausmaß der Verlagerung bislang keine Untersuchungen vorliegen, ist die Modellierung an dieser Stelle mit großen Unsicherheiten behaftet.

In einer Gesamtbetrachtung wurden staubedingte Zeitverluste im Autobahnnetz für das Bezugsjahr 2000 zu insgesamt 234 Mio. Stunden und mit folgenden Anteilen abgeschätzt: infrastrukturbedingte Engpässe 39 %, Unfälle und Nothalte 26 %, Arbeitsstellen 35 %.

Der Originalbericht enthält als Anlagen ergänzende Erläuterungen zur BAB-Datenbank (Anlage 1), die

Programmdokumentation QuantKap (Anlage 2) sowie den Simulationsplan mit Darstellung der verschiedenen Simulationsläufe (Anlage 3). Auf die Wiedergabe dieser Anlagen wurde in der vorliegenden Veröffentlichung verzichtet. Sie liegen bei der Bundesanstalt für Straßenwesen vor und sind dort einsehbar. Verweise auf die Anlagen im Berichtstext wurden zur Information des Lesers beibehalten.

Quantification of time losses caused by congestion on federal motorways

Aim of this research project was the quantification of time losses caused by congestion that resulted from shortages of infrastructure capacity as well as from traffic accidents and break-downs, thus during the year 2000. Together with the results of a related project concerning time losses caused by roadworks this project was able to provide information about the extent of the delays on federal motorways and about the proportional distribution among the various congestion causes.

Therefore, the following aspects were covered in the first part of the work:

- design of a motorway net model,
- modelling traffic demand,
- modelling capacity,
- modelling congestion and calculation of time delays.

In the second part of the work the results of the time delay calculation for the year 2000 were documented in detail. Sensitivity analyses were fulfilled to test the stability of the results relative to changes of various input data. In this context, a spatial traffic shift to other routes in the network due to congestion plays an outstanding role. Without taking this effect into consideration, implausible high time delays were calculated. Because the extent of spatial traffic shift is unknown, the modelling at this point is partly uncertain.

In an overall view the losses of time due to traffic congestion on the German motorway network in the year 2000 have been estimated to 234 million hours. 39% of this time result from shortages of

infrastructure capacity, 26% from accidents and break-downs, and 35% from roadworks.

The original report includes additional explanations to the BAB database as appendices (Appendix 1), the programme documentation QuantKap (Appendix 2) as well as the simulation plan with a representation of the different simulation runs (Appendix 3). The reproduction of these appendices was rejected in the present publication. They are available at the Federal Highway Research Institute and can be viewed there. References to the appendices have been maintained in the text of the report for the information of the reader.

Inhalt

1	Einleitung	7	5	Simulation	41
2	Netzdifferenzierung	7	6	Berechnungsergebnisse	42
3	Modellierung des Verkehrs-		6.1	Gesamtbetrachtung für das	
	ablaufs	8		Bundesgebiet	42
3.1	Vorbemerkung	8	6.2	Streckenabschnittsbezogene	
3.2	Modellierung der Verkehrs-			Betrachtung	43
	nachfrage	9	7	Sensitivitätsuntersuchungen	44
3.2.1	Grundlagen und vorhandene		7.1	Vorbemerkungen	44
	Ansätze	9	7.2	Verkehrsnachfrage	45
3.2.2	Überlegungen zur Modellierung		7.2.1	DTV und Schwerverkehrsanteil	45
	der Verkehrsnachfrage im Feier-		7.2.2	Wahl des Ganglinientyps	45
	tags- und Urlaubsverkehr	12	7.2.3	Modellierung stochastischer	
3.2.3	Ableitung eines modifizierten			Schwankungen	46
	Verfahrens	15	7.2.4	Einfluss der Verlagerung von	
3.3	Modellierung der Kapazität	18		Verkehrsströmen bei bestehender	
3.3.1	Grundlagen und vorhandene			Überlastung	46
	Ansätze	18	7.3	Kapazität	48
3.3.2	Ableitung eines modifizierten		7.3.1	Grundkapazität	48
	Verfahrens	26	7.3.2	Raumstrukturelle Lage	48
3.4	Staumodellierung und Ermittlung		7.3.3	Hochbelastete Knoten	49
	der Reisezeitverluste	31	7.3.4	Anpassungsfaktoren für weitere	
3.4.1	Grundlagen und vorhandene			kapazitätsrelevante Rand-	
	Ansätze	31		bedingungen	50
3.4.2	Ableitung eines modifizierten		7.4	Staumodellierung – Verkehrs-	
	Verfahrens	32		dichte	50
4	Datenbasis	38	7.5	Witterung	51
4.1	Datenquellen	38	7.6	Unfälle und Nothalte	51
4.2	Datenmodell der BAB-		7.6.1	Dauer der Kapazitätseinschränkung	
	Datenbank	39		bei Unfällen	51
4.2.1	Überblick	39	7.6.2	Nothaltmöglichkeit außerhalb	
4.2.2	Daten zur Lage der Netz-			der Fahrbahn	52
	elemente	40	8	Zusammenfassung	52
4.2.3	Daten zur Verkehrsnachfrage	40		Literatur	57
4.2.4	Daten zur Kapazität/strecken-				
	bezogene Daten	41			

1 Einleitung

Die Fahrleistungen auf Bundesautobahnen sind trotz leicht rückläufiger Gesamtfahrleistungen im motorisierten Straßenverkehr in den letzten Jahren ständig gestiegen. Im Jahr 2000 wurden auf dem rund 11.400 km langen BAB-Streckennetz (BMVBW, 2001), das entspricht einem Anteil von etwa 1,8 % am gesamten deutschen Straßennetz, mit 203 Mrd. Fz-km rund 30 % der Gesamtfahrleistungen erbracht (BMVBW, 2001a), mit zukünftig vermutlich weiter steigender Tendenz. Dem gegenüber wird der Ausbau des Bundesautobahnnetzes auf wenige Maßnahmen zur Querschnittserweiterung und zum Schluss von Lücken beschränkt bleiben. Immer häufiger auftretende Überlastungen und Staus sind die Folge dieser Entwicklung. Diese verursachen für alle betroffenen Fahrzeuge erhöhte Unfallrisiken, Reisezeitverluste, Komforteinbußen, einen erhöhten Kraftstoffverbrauch und dadurch zusätzliche Abgasemissionen.

Staus auf Autobahnen lassen sich ihrer Ursache nach im Wesentlichen in folgende Kategorien einteilen:

- Staus auf Grund von dauerhaften infrastrukturbedingten Kapazitätsengpässen.
- Staus auf Grund von temporären Kapazitätseinschränkungen durch
 - Arbeitsstellen,
 - Unfälle,
 - Pannen.

Die Anteile dieser Störungsursachen an den Gesamtstörungen sind in der Vergangenheit im Rahmen von Auswertungen länderspezifischer Verkehrswarndienstmeldungen analysiert worden (Tabelle 1). Die Ergebnisse liefern allerdings keine Aussagen über die Auswirkungen von Störungen auf den Verkehrsablauf. Reisezeitverluste an Ar-

Störungsursache	Gesamtstörungsanteil [%]	
	NRW	Hessen
Kapazitätsengpässe	41	42
Arbeitsstellen	29	19
Verkehrsunfälle	24	27
Pannen, Sonstige	7	12

Tab. 1: Prozentuale Verteilung der Stauursachen auf Autobahnen in Nordrhein-Westfalen (GERICKE, 1998) und Hessen (Datenquelle: Landesmeldestelle Hessen)

beitsstellen kürzerer und längerer Dauer für die Bezugsjahre 1998 und 2000 wurden in einem FE-Vorhaben der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) „Quantifizierung staubedingter Reisezeitverluste auf Autobahnen – Störungsursache: Arbeitsstellen“ ermittelt (OBER-SUNDERMEIER, OTTO, 2003). Ziel des vorliegenden FE-Vorhabens ist die Quantifizierung von staubedingten Reisezeitverlusten im Jahr 2000, die auf infrastrukturbedingte Kapazitätsengpässe zurückzuführen sind. Weiterhin sollen auch die Verlustzeiten auf Grund von Verkehrsunfällen und Pannen abgeschätzt werden. Zusammen mit den Ergebnissen der „Quantifizierung staubedingter Reisezeitverluste auf Autobahnen – Störungsursache: Arbeitsstellen“ kann somit Aufschluss darüber gegeben werden, wie sich die Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen anteilmäßig und in ihrer Größenordnung auf die oben genannten Störungsursachen aufteilen.

Abhängig von den baulichen Randbedingungen (Fahrstreifenanzahl, Gradienten), den Umfeldbedingungen, dem Schwerverkehrsanteil und der Zusammensetzung des Fahrerkollektivs reduziert ein Engpass die Kapazität des betroffenen Autobahnabschnitts. Übersteigt die Verkehrsnachfrage diese Kapazität, entsteht vor dem Engpass ein Stau mit den bereits genannten Negativwirkungen. Voraussetzung für eine sinnvolle Quantifizierung von Reisezeitverlusten ist die Kenntnis der tatsächlichen Verkehrsabläufe. Hierzu sind methodisch im Wesentlichen folgende drei Aspekte zu behandeln:

1. Modellierung der Verkehrsnachfrage,
2. Modellierung der Kapazität,
3. Staumodellierung und Ermittlung der Reisezeitverluste.

Berechnungsgrundlagen hierzu wurden bereits bei OBER-SUNDERMEIER, OTTO (2003) geschaffen. Diese sind grundsätzlich auch auf die vorliegende Aufgabenstellung übertragbar, müssen aber insbesondere im Hinblick auf die Kapazitäts- und Staumodellierung modifiziert und ergänzt werden.

2 Netzdifferenzierung

Um streckenbezogene Reisezeitverluste ermitteln zu können, muss das Bundesautobahnnetz in einem Netzmodell so weit von der Realität abstrahiert werden, dass die für die Berechnungsmodelle wesentlichen Merkmale in möglichst handhabbarer Form bestehen bleiben. Hierzu ist das Netz in Ab-

schnitte mit annähernd konstanten Fahrbahn- und Verkehrsbedingungen einzuteilen.

Basierend auf der Überlegung, dass ausschließlich an den Autobahnknoten (Anschlussstellen, Autobahndreiecke und -kreuze) Änderungen der Verkehrsnachfrage durch ab- und zufließende Ströme auftreten, wird eine grundlegende Unterteilung des Netzes anhand von Autobahnknoten vorgenommen. Für jeden dieser Streckenabschnitte zwischen zwei Knotenpunkten können Reisezeitverluste modelliert werden, die durch Überschreitung der Kapazität der freien Strecke entstehen.

Staus im Autobahnnetz resultieren jedoch zum Teil auch aus Überlastungen in den Knotenpunktbereichen, die im Wesentlichen durch Verflechtungsvorgänge bei hohen Belastungen im Bereich der Einfahrten hervorgerufen werden. Die zweckmäßige Modellierung von Knoten, insbesondere die Frage, ob die Rampenlängen zu Gunsten einer punktförmigen Knotendarstellung vernachlässigt werden können, bereitet größere Schwierigkeiten. Dafür spricht die Tatsache, dass die Rampen im Vergleich zu Streckenabschnitten sehr kurz sind. Andererseits können auch sie bei Überlastung Bereiche mit kritischen Verkehrszuständen darstellen. Die Entscheidung ist stark von der Datenlage geprägt, da im Bereich von Knoten weder Knotengeometrien noch Knotenströme bekannt sind. Deshalb erscheint eine weitere Differenzierung des Netzes in die Bereiche „Freie Strecke“ und „Knotenpunkt“ nicht sinnvoll. Dennoch muss gewährleistet werden, dass der Einfluss der Knotenpunkte auf den Verkehrsablauf angemessen berücksichtigt wird. Zu diesem Zweck wird jedem Streckenabschnitt der stromaufwärts angrenzende Knotenpunkt (maßgebend für die Modellierung des Verkehrsablaufs im Einfahrbereich) zugeordnet.

Der virtuelle Knoten wird als punktförmig angenommen. Zur Modellierung des Einfädungsvorgangs können zwei Ansätze herangezogen werden.

- a) Der geschätzte Einfädungsstrom wird gemäß StVO als wartepflichtig angesehen. Zur Staubechnung muss ihm eine virtuelle Einfahrrampe zugeordnet werden, deren Länge als unendlich angenommen wird.
- b) Der geschätzte Einfädungsverkehrsstrom drängt vollständig auf die Richtungsfahrbahn und der gesamte Stau bildet sich auf der Richtungsfahrbahn.

Beim ersten Modellierungsansatz besteht die Gefahr, dass bei Überlastung der Stau von der Richtungsfahrbahn auf die Einfahrampen verlagert wird; dies entspricht aber nicht dem realen Verkehrsablauf. Den tatsächlichen Verkehrsverhältnissen im Einfädungsbereich kommt der zweite Ansatz, bei dem an hochbelasteten Knoten vergleichsweise selten auftretende Staus auf den Einfahrampen auf die Richtungsfahrbahn verlagert werden, weitaus näher. Er wird auch im Hinblick auf die Netzmodellierung für das vorliegende Projekt verwendet.

Neben der Verkehrsnachfrage beeinflusst die Kapazität eines Streckenabschnitts den Verkehrsablauf in entscheidendem Maß. Haupteinflussfaktoren sind hier die Fahrstreifenanzahl und die Längsneigung. Diese Randbedingungen können sich im Regelfall auch innerhalb der oben definierten Netzelemente ändern, sodass prinzipiell eine weitere Netzdifferenzierung nach Abschnitten mit gleicher Kapazität vorgenommen werden muss. Da die Längsneigung gegenüber der Fahrstreifenanzahl einen vergleichsweise geringen Einfluss hat, wird die Abfolge ihrer Elemente (Gradiente) nicht als eigenständiges Kriterium zur Netzdifferenzierung herangezogen. Vielmehr wird für jeden Streckenabschnitt als Einheit eine maßgebende Kapazität bestimmt, die auch die Längsneigung einbezieht (siehe Kapitel 3.3.2). Bei Fahrstreifenadditionen bzw. -subtraktionen innerhalb eines Streckenabschnittes erfolgt dagegen eine weitere Unterteilung. Ausgenommen sind die Knotenpunktbereiche, da hier unterschiedliche Ein- und Ausfahrttypen zwar eine Veränderung der Fahrstreifenanzahl bewirken, gleichzeitig aber auch eine Belastungsänderung stattfindet.

3 Modellierung des Verkehrsablaufs

3.1 Vorbemerkung

Die Zuverlässigkeit der Ermittlung von Reisezeitverlusten an Engpässen auf Autobahnen ist neben der Wahl eines geeigneten Modells zur Nachbildung der Stauentwicklung in entscheidendem Maß von der zutreffenden Beschreibung der Eingangsgrößen abhängig. Zu den Eingangsgrößen zählen zum einen der Zufluss (Verkehrsnachfrage) und zum anderen die Kapazität des Engpasses. Da diese drei Teilbereiche jeweils eine grundsätzlich

eigenständige Problematik darstellen, können sie getrennt voneinander behandelt werden.

Wesentliche analytisch-methodische Vorarbeiten wurden bereits bei OBER-SUNDERMEIER und OTTO (2003) im Rahmen der Quantifizierung von Reisezeitverlusten an Arbeitsstellen vorgenommen. Die dort durchgeführte Analyse vorhandener Modellierungsansätze zur Nachfrage- und Kapazitätsermittlung sowie zur Stauentwicklung ist auch für das vorliegende FE-Vorhaben zutreffend. Sie stellt eine wichtige Grundlage der Ausführungen in den nachfolgenden Kapiteln dar.

3.2 Modellierung der Verkehrsnachfrage

3.2.1 Grundlagen und vorhandene Ansätze

Die Verkehrsnachfrage (aktuelle Verkehrsstärke) ist eine wichtige makroskopische, aus Basiswerten aggregierte Verkehrskenngröße zur Beschreibung des Verkehrsablaufs. Sie unterliegt zahlreichen Einflussfaktoren und kann grundsätzlich mit zwei unterschiedlichen Verfahren modelliert werden. Das erste Modell stellt die Verkehrsnachfrage als Dauerlinie dar. Die zweite Variante ist die Darstellung der Verkehrsnachfrage als Ganglinie der Verkehrsstärke über einen bestimmten Zeitraum hinweg, wobei hier zwischen kollektiven (abschnittsübergreifenden) und individuellen (abschnittsbezogenen) Ganglinien zu unterscheiden ist.

Dauerlinientypen der EWS

Die Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen – EWS (FGSV, 1997) verwenden so genannte k-Faktoren, die stündliche Anteile der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke mit annähernd gleicher Verkehrsstärke repräsentieren. Mit Hilfe dieser Faktoren können standardisierte Dauerlinien, der Größe nach sortiert, als diskrete Häufigkeitsverteilungen, differenziert nach Querschnittstyp und Fahrtzweck, erstellt werden. Die Modelldauerlinien nach EWS stehen repräsentativ für das Bundesautobahnnetz mit dem Nachteil, dass regionale oder streckenbezogene Abweichungen nicht berücksichtigt werden können. Dies hat zur Folge, dass die Ermittlung der kritischen Fahrleistungen, die bei störanfälligem oder instabilem Fluss bei sehr hoher Auslastung entstehen und die hier zu untersuchenden Zeitverluste bedingen, stark pauschaliert wird. Streckenbezogene Dauerlinien sind durch unterschiedliche Steigungen der

Polygonzugelemente charakterisiert. Die EWS gehen vereinfachend von Durchschnittswerten aus. Dies hat Auswirkungen auf die Dauer der kritischen Zeitbereiche und die Größe der kritischen Fahrleistungen vor allem bei Streckenabschnitten, deren reale Dauerlinien im Anfangsbereich (Überlastungsbereich) von den EWS-Modelldauerlinien deutlich abweichen.

Kollektive typisierte Ganglinien

Kollektive (abschnittsübergreifende) Ganglinientypen repräsentieren Gruppen von Straßenabschnitten mit einer für bestimmte Zeitbereiche (Tag, Woche, Jahr) ähnlichen zeitlichen Verteilung der dargestellten Verkehrskenngröße. Über die Zuordnung eines Straßenabschnitts zu einem Ganglinientyp wird die Verkehrsstruktur am betreffenden Abschnitt in generalisierter Form dargestellt (PINKOFSKY, 2003).

Erstmals wurde eine Typisierung von Verkehrsstärkeganglinien vor über 20 Jahren von HEIDEMANN und WIMBER durchgeführt (HEIDEMANN, WIMBER, 1982). Da sich durch die Veränderung der Charakteristik der Verkehrsnachfrage in den letzten Jahren immer weniger Dauerzählstellen im deutschen Autobahnnetz einem der von HEIDEMANN und WIMBER entwickelten Ganglinientypen zuordnen ließen, wurden von PINKOFSKY (2003) neue Verkehrsstärkeganglinien typisiert. Die periodischen Schwankungen der Streckenbelastung werden dabei auf drei verschiedenen Ebenen dargestellt:

- Tagesganglinien der stündlichen Verkehrsstärken, richtungsgetreunt jeweils für die Gruppen: Montag (7 TG-Typen), Dienstag bis Donnerstag (6), Freitag (6), Samstag (8), Sonntag (7),
- 7 Wochenganglinientypen der täglichen Verkehrsstärken, richtungsgetreunt,
- 7 Jahresganglinientypen der wöchentlichen Verkehrsstärken des Gesamtquerschnitts.

Die untere Ebene lässt sich durch die Tagesganglinien der stündlichen Verkehrsstärken mit unterschiedlichen charakteristischen Verläufen (z. B. Lage und Ausprägung der Spitzenstunden) beschreiben. Im Unterschied zu den alten Ganglinientypen differenziert PINKOFSKY (2003) die einzelnen Tagesganglinien einer Tagesgruppe weiterhin nach der stundengenauen zeitlichen Lage der Spitzenstunde (Bild 1). Auf diese Weise splittet sich ein Ganglinientyp in bis zu elf weitere Typen auf.

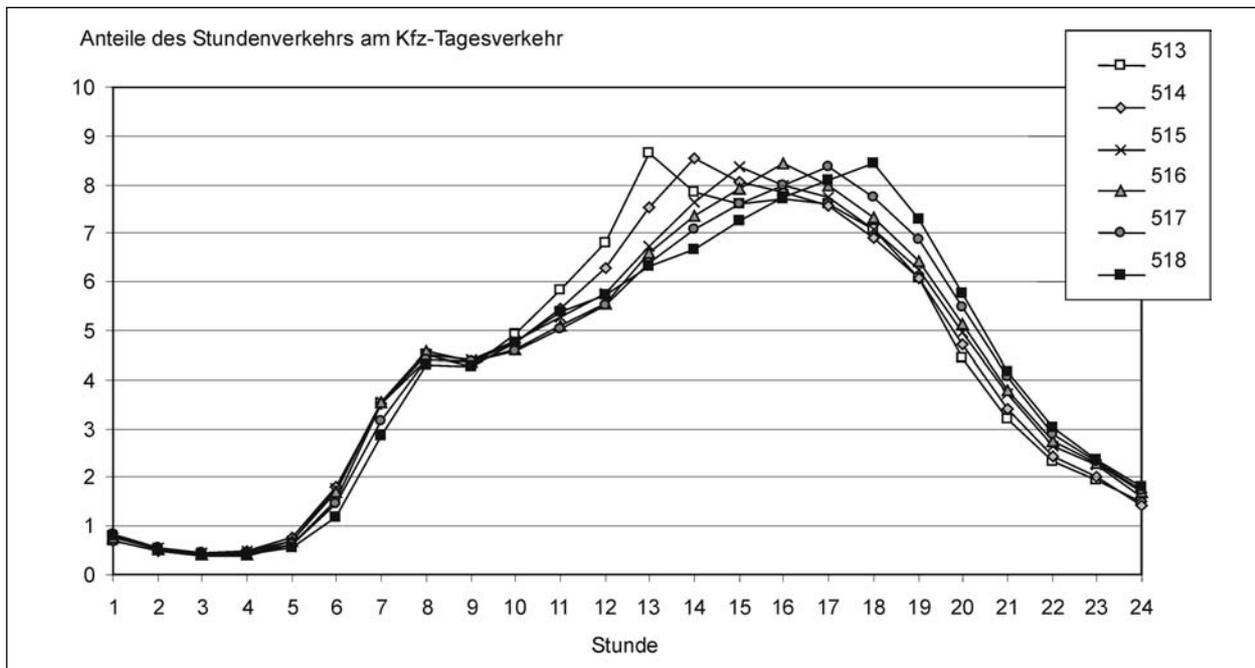


Bild 1: Ganglinientyp E der Tagesgruppe Dienstag – Donnerstag differenziert nach unterschiedlichen Spitzenstunden (13-18 Uhr) (PINKOFSKY, 2003)

Die mittlere Ebene bilden die Wochenganglinientypen der täglichen Verkehrsstärken. Tages- und Wochenganglinientypen basieren auf Verkehrsdaten aus einem Normalzeitbereich (NZB). Er umfasst die von Schulferien, Feiertagen und extremen Witterungsverhältnissen unbeeinflussten Tage. Der NZB besteht je Bezugsjahr aus etwa 56 Tagen verteilt auf 8 Wochen.

Auf der oberen Ebene liegen die Jahresganglinientypen der wöchentlichen Verkehrsstärken. Sie modellieren in ihrer neuen Form den Ferienverkehr in den Sommermonaten im Vergleich zu den früheren JG-Typen – die eine gleichmäßige Verteilung der Verkehrsnachfrage auf die einzelnen Ferienwochen unterstellen – zeitlich-räumlich variabel.

Auf der Basis von Musterjahresganglinien (Bild 2) lassen sich durch Umgruppierung von Wochenwerten weitere JG-Typen entwickeln, die der Zusammenfassung der Bundesländer zu Ferienhauptgruppen und damit der unterschiedlichen zeitlichen Lage von Ferienverkehren gerecht werden.

In der Jahresganglinie wird die Woche als Zeitraum von Mittwoch bis Dienstag definiert.

Damit ist gewährleistet, dass die verlängerten Wochenenden sowie die Oster- und Pfingstfeiertage jeweils in eine Woche fallen.

Da das Typenbildungsverfahren von PINKOFSKY (2003) – unabhängig vom Verkehrsstärkeniveau –

nur Ganglinien zu einem Cluster zusammenfasst, die einen ähnlichen Verlauf haben, können auch Nachfragewerte modelliert werden, die über der Kapazität eines Streckenabschnitts liegen. Es ist anzunehmen, dass mit diesem Verfahren die tatsächlich vorhandene Verkehrsnachfrage zwar zu einem Teil, aber nicht in vollem Umfang ermittelt wird.

Grundsätzlich hat das Verfahren nach PINKOFSKY aber einen klaren Vorteil gegenüber den individuellen (abschnittsbezogenen) Ganglinien, da hier zur Abbildung der Verkehrsnachfrage im Regelfall nur die tatsächlich realisierte Verkehrsstärke herangezogen wird. Bei vorhandenen Kapazitätsbeschränkungen kann so die Verkehrsstärke im Gegensatz zur latenten Verkehrsnachfrage nie höher sein als die Kapazität („Capacity-Restraint“).

Das Verfahren der typisierten Ganglinien findet im Rahmen der jährlichen Auswertung der Dauerzählstellen auf Bundesfernstraßen Anwendung. Mit Hilfe der dort aufgeführten Zuordnung von Ganglinientypen zu Dauerzählstellen ist es unter Angabe des DTV-Wertes prinzipiell möglich, Verkehrsstärkeganglinien für jeden Tag des Jahres zu berechnen. Da allerdings nur auf etwa jedem 6. Streckenabschnitt eine Dauerzählstelle vorhanden ist, müssen die Dauerzählstellen in geeigneter Weise auf zählstellenlose Streckenabschnitte übertragen werden.

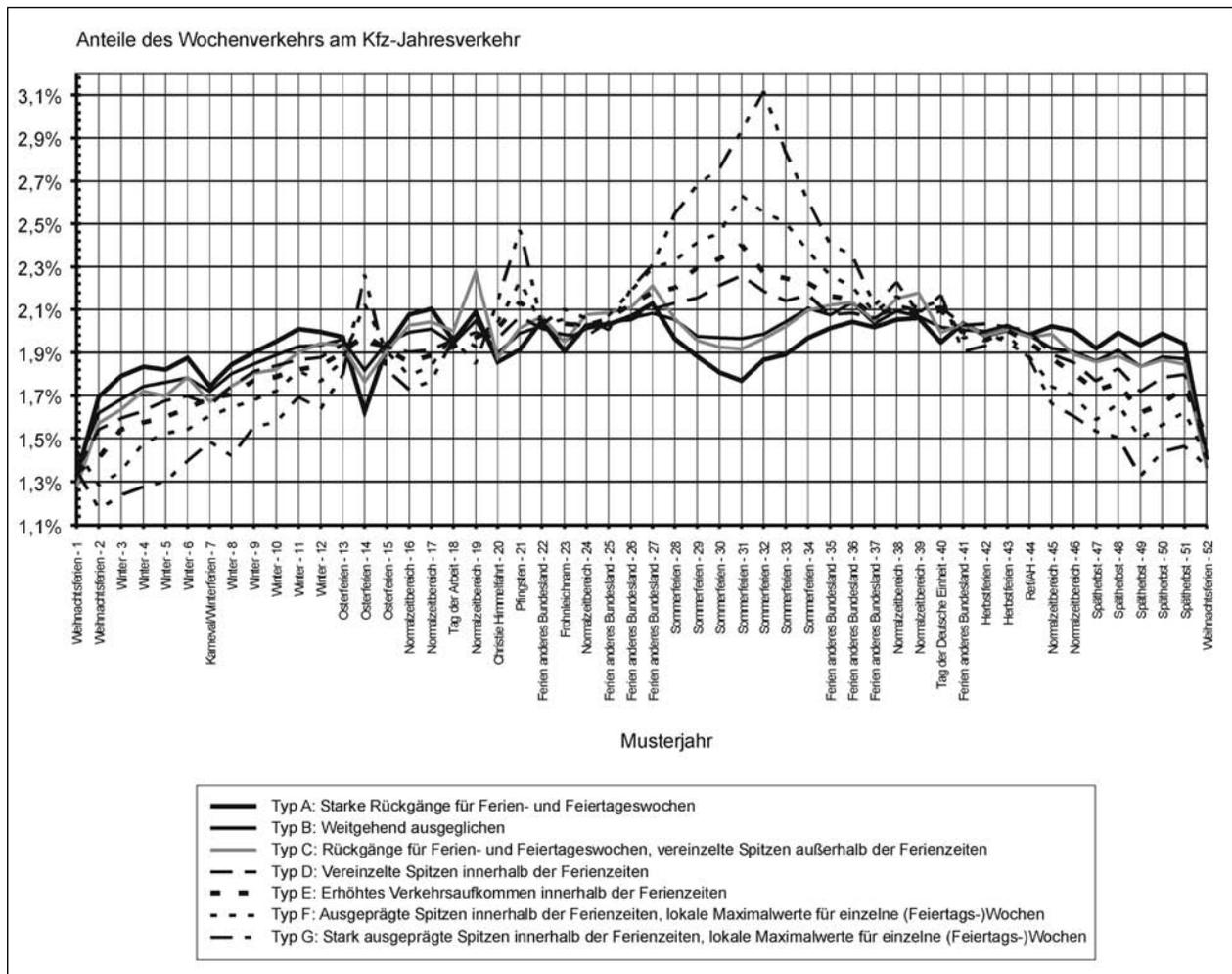


Bild 2: Musterjahresganglinien der wöchentlichen Verkehrsstärken (PINKOFSKY, 2003)

Als entscheidende Verbesserung der Ganglinientypisierung nach PINKOFSKY (2003) gegenüber dem Verfahren nach HEIDEMANN und WIMBER (1982) ist die genauere und differenziertere Darstellung der Jahresganglinie anzusehen. Damit ist – zumindest hinsichtlich der wöchentlichen Verkehrsstärken – eine deutlich genauere Abbildung der tatsächlichen Verkehrsnachfragestruktur eines Streckenabschnitts erreicht worden. Unberücksichtigt sind bislang noch Faktoren zur Disaggregation des wöchentlichen Verkehrs in Feiertags- oder Ferienwochen auf Tage und Stunden. Z. B. kann die Konzentration der Verkehrsnachfrage an Reisewochenenden einen erheblichen Einfluss auf die Staubildung haben.

Individuelle typisierte Ganglinien

Individuelle (abschnittsbezogene) Ganglinientypen repräsentieren Gruppen von Zeiteinheiten (gewisse Tage) mit einer bezüglich der dargestellten Verkehrskenngröße homogenen Verkehrsstruktur

(z. B. Urlaubswerktag, „regnerische“ Montage, Werktag mit Sonderereignis an einem Streckenabschnitt). Sie sind als Grundlage für Prognoseverfahren zur verkehrstechnischen Anwendung in mehreren Verkehrsrechnerzentralen im Einsatz (FGSV, 2003). Im Unterschied zu den kollektiven Ganglinientypen gilt ein individueller Ganglinientyp ausschließlich für einen bestimmten Streckenabschnitt und ist daher nicht ohne weiteres auf andere Abschnitte übertragbar.

Auf die verschiedenen methodischen Vorgehensweisen bei der Ermittlung der Ganglinientypen soll an dieser Stelle nicht detailliert eingegangen werden. Festzuhalten bleibt, dass auf Grund des höheren Detaillierungsgrades bei der individuellen Typisierung eine größere Genauigkeit zu erwarten ist. Da jedoch derartige Auswertungen nicht flächendeckend vorhanden sind und die vorliegenden Typen nicht auf andere Autobahnabschnitte übertragen werden können, scheidet diese Verfahrensweise für das vorliegende Projekt aus.

Überlagerung individueller realer Tageswerte mit kollektiven typisierten Tagesganglinien

BRILON und ZURLINDEN (2003) legen in ihrer Untersuchung zu „Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen“ (BRILON, ZURLINDEN, 2003) – wie in dem vorliegenden FE-Vorhaben – eine Ganzjahresanalyse des Verkehrsablaufs zugrunde.

Während der Projektbearbeitung standen zwar die neuen typisierten Tagesganglinien von PINKOFSKY (2003) zur Verfügung, bezüglich der Nachfragemodellierung über die Woche und das Jahr hätten BRILON und ZURLINDEN (2003) auf die veralteten HEIDEMANN-WIMBER-Ganglinien zurückgreifen müssen. Diesen Nachteil umgehen sie, indem sie die Jahresganglinien der realen Tageswerte aus den Dauerzählstellen verwenden und diese mit kollektiven typisierten Tagesganglinien überlagern. Grundsätzlich ergibt sich hierdurch eine realitätsnähere Nachfragemodellierung als bei einer reinen Überlagerung von typisierten Ganglinien. Voraussetzung ist allerdings die Lösung des „Capacity-Restraint“-Problems, z. B. durch den Einbau einer stochastischen Komponente. Zusätzlich entfallen – zumindest auf der Ebene der Jahres- und Wochenganglinien – die Zuordnungsprobleme auf benachbarte Streckenabschnitte. Das Verfahren führt bei vollständiger Datenerfassung auf Strecken oder Streckenzügen sicher zu belastbaren Nachfragewerten. Gegen eine Anwendung des Verfahrens im Rahmen einer Nachfragemodellierung für das gesamte Autobahnnetz sprechen jedoch die im Zusammenhang mit individuellen Ganglinien bereits oben genannten Probleme der räumlichen und zeitlichen Lückenhaftigkeit der Datenerfassung:

- Nicht alle Autobahnabschnitte sind mit Erfassungseinrichtungen ausgestattet.
- Die vorhandenen Erfassungsquerschnitte weisen zum Teil Datenausfälle aus.
- Die Handhabung der anfallenden Datenmenge würde einen Aufwand verursachen, der mit dem Ziel und dem Umfang des Forschungsvorhabens nicht vereinbar ist.

Kombinierte Verfahren der Bundesverkehrsweplanung (BVWP)

Die Ermittlung der Streckenbelastungen im Straßenverkehr in der Bundesverkehrsweplanung

erfolgt basiert auf einer komplexen, in eine intermodale Nachfrageermittlung eingebundenen Verflechtungsprognose mit folgenden Arbeitsschritten (BMVBW, 2002):

- Verkehrserzeugung aus sozio-ökonomischen Strukturdaten im Rahmen von Szenarien,
- Ermittlung einer Fahrtenmatrix für die werktägliche Spitzenstundengruppe (15:00-19:00 Uhr),
- Umlegung (privater und öffentlicher Personenverkehr, Güterverkehr),
- Hochrechnung der Belastungswerte auf den durchschnittlichen Verkehr an Werktagen DTV_W ,
- Umrechnung des DTV_W auf den durchschnittlichen Verkehr an Urlaubswerktagen DTV_U und an Sonn- und Feiertagen DTV_S ,
- Disaggregation der DTV -Werte mit Hilfe von repräsentativen Tagesganglinien.

Die Erstellung einer eigenen Verflechtungsprognose mit den Schritten Verkehrsverteilung, Verkehrserzeugung und Verkehrsumlegung ist für die vorliegende Aufgabenstellung aus Aufwandgründen auszuschließen und wird auf Grund der vorhandenen Datenlage (abschnittsbezogene DTV -Werte für Pkw und Lkw, typisierte Ganglinien) auch nicht als notwendig angesehen. Darüber hinaus ist bei einer Verflechtungsprognose auf Grund des starken Modellcharakters mit Fehlern zu rechnen, die bei der Komplexität des Untersuchungsnetzes nur mit entsprechend hohem Aufwand zu korrigieren wären.

3.2.2 Überlegungen zur Modellierung der Verkehrsnachfrage im Feiertags- und Urlaubsverkehr

Vorbemerkungen

Eine gesonderte Betrachtung muss für die außerhalb des Normalzeitbereichs liegenden Wochen, insbesondere für Ferien- und Feiertagswochen mit Urlaubsverkehr, vorgenommen werden. Der Einfluss von Ferienzeiten sowie Feiertagen kann je nach Lage im Netz sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. Ferien und Feiertage bewirken zum einen verstärkten Ferientourismusverkehr, der insbesondere auf den Hauptreiserouten zu einem Anstieg der Verkehrsnachfrage führt, zum anderen kann die Verkehrsnachfrage in Netzabschnitten, die im Normalzeitbereich hauptsächlich vom Berufsverkehr geprägt sind, deutlich zurückgehen. Für die Modellierung

dieser Effekte stehen jedoch nur bedingt quantitative Aussagen zur Verfügung.

Eine Disaggregation der Verkehrsnachfrage im Urlaubsverkehr ist mit Hilfe der Jahresganglinie lediglich auf Wochenwerte möglich. Zur Verteilung dieser Wochenwerte auf Wochentage und Stundenwerte stehen bislang noch keine typisierten Ganglinien zur Verfügung. Zumindest hinsichtlich der Verteilung des Wochenverkehrs auf Wochentage kann mit Hilfe des jährlich vom BMVBW veröffentlichten Staukalenders (BMVBW, 2000) eine grobe Abschätzung gemacht werden, da dort (verlängerte) Wochenenden mit starkem urlaubsbedingtem Verkehrsaufkommen im Autobahnnetz gekennzeichnet sind. Mit dieser Information und anhand von Analogiebetrachtungen soll im Folgenden auf der Basis der Ganglinientypen aus dem Normalzeitbereich versucht werden, einen Ansatz zur überschlägigen Berücksichtigung des Einflusses von Feiertags- und Urlaubsverkehr zu entwickeln.

Die im weiteren Verlauf dargestellte Methodik geht dabei von folgenden Zusammenhängen aus:

- Es sind Streckenabschnitte zu unterscheiden, auf denen während der Feiertags- und Ferienverkehrszeiten die Verkehrsnachfrage bezogen auf den Wochenverkehr überdurchschnittlich hoch ist (JG-Typen E bis G), von Streckenabschnitten, auf denen während der Feiertags- und Ferienverkehrszeiten die Verkehrsnachfrage bezogen auf den Wochenverkehr gleich oder unterdurchschnittlich hoch ist (JG-Typen A bis D). Bei der ersten Gruppe handelt es vor allem um die Hauptreiserouten im Autobahnnetz.
- Bei der zweiten Gruppe (Verkehrsrückgänge zu Ferienverkehrszeiten) ist davon auszugehen, dass sich die Verteilung der Fahrtzwecke während der Feiertags- und Ferienverkehrszeiten im Vergleich zur Normalverkehrszeit kaum ändert. Für diese Abschnitte können die Wochen- und Tagesganglinien aus dem Normalzeitbereich verwendet werden. Es sind lediglich die Wochen separat zu betrachten, bei den sich die Tagestypfolge durch zusätzliche Feiertage in der Woche ändert.
- Auf Streckenabschnitten entlang der Hauptreiserouten ist durch die Überlagerung des „Normalverkehrs“ durch den Urlaubsreiseverkehr sowohl im Wochen- als auch im Tagesverlauf von gegenüber dem Normalzeitbereich veränderten Verkehrsnachfragestrukturen auszugehen. Mit

großer Wahrscheinlichkeit wird sich der Mehrverkehr in den betreffenden Wochen überproportional auf das Wochenende verteilen. Es ist weiterhin anzunehmen, dass Hauptreisetage von einem gleichmäßigeren Verlauf der Tagesganglinie gekennzeichnet sind. Dies stellen auch RÖHR et al. (1996) in ihren Auswertungen von Urlaubsreisewellen fest. Weisen diese Abschnitte im Normalzeitbereich auch Tagesganglinien mit ausgeprägten Spitzen auf, so ist zu Ferienzeiten dennoch davon auszugehen, dass sich der Verkehr gleichmäßiger über den Tag verteilt.

Tagesganglinien in Ferien- und Feiertagswochen

Um dem gleichmäßigeren Verlauf der täglichen Verkehrsnachfrage auf den Hauptreiserouten in der Modellierung zu berücksichtigen, werden an den Hauptreisewochenenden auf den relevanten Streckenabschnitten (JG-Typen E bis G) nur entsprechende Tagesganglinientypen verwendet. An den Freitagen ist dies der TG-Typ C, an Samstagen und Sonntagen ist dies der TG-Typ A. Sind den Streckenabschnitten andere TG-Typen zugeordnet, so werden diese ersetzt.

Wochenganglinien in Ferienwochen

Hauptreisewochenenden außerhalb der Feiertagswochen liegen für das Bezugsjahr 2000 in den Wochen 15 und 25 bis 36 (BMVBW, 2000). Staugefährdete Tage sind hier im Wesentlichen Freitage und Samstage. Damit sich der wöchentliche Mehrverkehr auch überproportional auf diese Tage niederschlägt, wird in diesen Wochen auf den vom Urlaubsverkehr geprägten Streckenabschnitten (JG-Typen E bis G) der WG-Typ E zugeordnet.

Wochenganglinien in Feiertagswochen

Die Tagestypfolge in den Feiertagswochen wird in einem ersten Schritt aufbauend auf den Ergebnissen von BRILON, ZURLINDEN (2003) modifiziert (Tabelle 3). Demnach werden Feiertage wie Sonntage und Werkzeuge vor einem Feiertag wie Freitage behandelt. Werkzeuge nach einem Feiertag werden durch den Montag dargestellt, mit Ausnahme der selten auftretenden Brückentage (z. B. Freitag nach Christi Himmelfahrt), die wie Samstage behandelt werden.

Nr.	Kalenderwoche	Besonderheit	Tagestypfolge
1	1: Neujahr	Sa = Neujahr	Mi Do Fr So So Mo Di
2	16: Ostern		Mi Fr So Sa So So Mo
3	22: Christi Himmelfahrt 24: Fronleichnam		Fr So Fr Sa So Mo Di Fr So Fr Sa So Mo Di
4	17: Tag der Arbeit 23: Pfingsten 40: Tag d. Dt. Einheit	Mo = Tag der Arbeit Mo = Tag d. Dt. Einheit	Mi Do Fr Sa So So Mo Mi Do Fr Sa So So Mo Mi Do Fr Sa So So Mo
5	52: Weihnachten	So = Hl. Abend	Mi Do Fr Sa So So So

Tab. 2: Tagestypfolge und Hauptreisetage in den modifizierten Feiertagswochenganglinien im Jahr 2000

Tag	Tagestyp
Feiertag	Sonntag
Werktag vor einem Feiertag	Freitag
Werktag nach einem Feiertag	Montag
Brückentag	Samstag

Tab. 3: Zugeordnete Tagestypen in Feiertagswochen

Übertragen auf die vorliegende Aufgabenstellung und auf das Bezugsjahr 2000 ergeben sich durch Austausch von Tagestypen bei einer Beschränkung auf bundeseinheitliche Feiertage für die in Tabelle 2 dargestellten Feiertagswochen des Bezugsjahres 2000 modifizierte WG-Typen.

Durch die Veränderung der Tagestypfolgen, also insbesondere der täglichen Anteilswerte am wöchentlichen Verkehr, ergibt sich in der Summe ein Wert ungleich 100 %, welcher somit normiert werden muss. Hierzu wird zunächst die Differenz zwischen der Wochensumme aus dem Normalzeitbereich (= 100 %) und der Wochensumme der Wochenanteilswerte in der betrachteten Feiertagswoche ermittelt. Diese Differenz wird dann gewichtet auf die Wochenanteilswerte umgelegt und auf diese aufgeschlagen. Damit ergibt sich zur Ermittlung der modifizierten Wochenanteilswerte in einer Feiertagswoche folgender Zusammenhang:

$$k_{i,\text{mod}} = \left(\frac{\sum k_{i,\text{NZB}}}{\sum k_{i,\text{FTW}}} \right) * k_{i,\text{FTW}} \quad \text{Gl. 1}$$

mit:

$k_{i,\text{mod}}$: modifizierter Wochenanteilswert eines Tages in einer Feiertagswoche

$k_{i,\text{NZB}}$: Wochenanteilswert eines Tages in einer Woche des Normalzeitbereiches

$k_{i,\text{FTW}}$: Wochenanteilswert eines Wochentags in einer Feiertagswoche

Die auf diese Weise modifizierten Wochenganglinientypen werden auf Streckenabschnitten ohne Urlaubsverkehr (JG-Typ A bis D) in allen Feiertagswochen verwendet.

Sie gelten auch für die vom Urlaubsverkehr geprägten Streckenabschnitte mit den JG-Typen E bis G; allerdings nur für Wochen ohne Hauptreisewochenenden (Wochen 1, 23, 40, 52).

Liegen in Feiertagswochen verlängerte Hauptreisewochenenden (Wochen 16, 17, 22, 24), ist davon auszugehen, dass der wöchentliche Mehrverkehr verstärkt an den Hauptreisetagen abgewickelt wird. Dies sind im Wesentlichen die Werktage vor den Feiertagen und die Sonn- und Feiertage. Dieser Nachfragecharakteristik kommt der modifizierte WG-Typ D am nächsten. Dieser WG-Typ wird deshalb auf den vom Urlaubsverkehr geprägten Streckenabschnitten (JG-Typ E bis G) in den o. g. Wochen ausschließlich verwendet. Sind den Streckenabschnitten im Normalzeitbereich für die o. g. Wochen andere WG-Typen zugeordnet, so werden diese ersetzt.

Bild 3 zeigt für zwei exemplarische Typkombinationen anhand des Vergleiches zwischen einer Normalzeitbereichswoche (Woche 19) und einer Feiertagswoche (Woche 20 (Christi Himmelfahrt)), dass die beschriebene Vorgehensweise auch für unterschiedliche Kombinationen von Jahres- und Wochenganglinientypen zu plausiblen Wochenganglinienverläufen führt.

Die Kombination JG-Typ A/WG-Typ A steht für vom erwerbsbedingten Verkehr geprägte Abschnitte: Die oben beschriebene Vorgehensweise führt dazu, dass der Rückgang des Belastungsniveaus

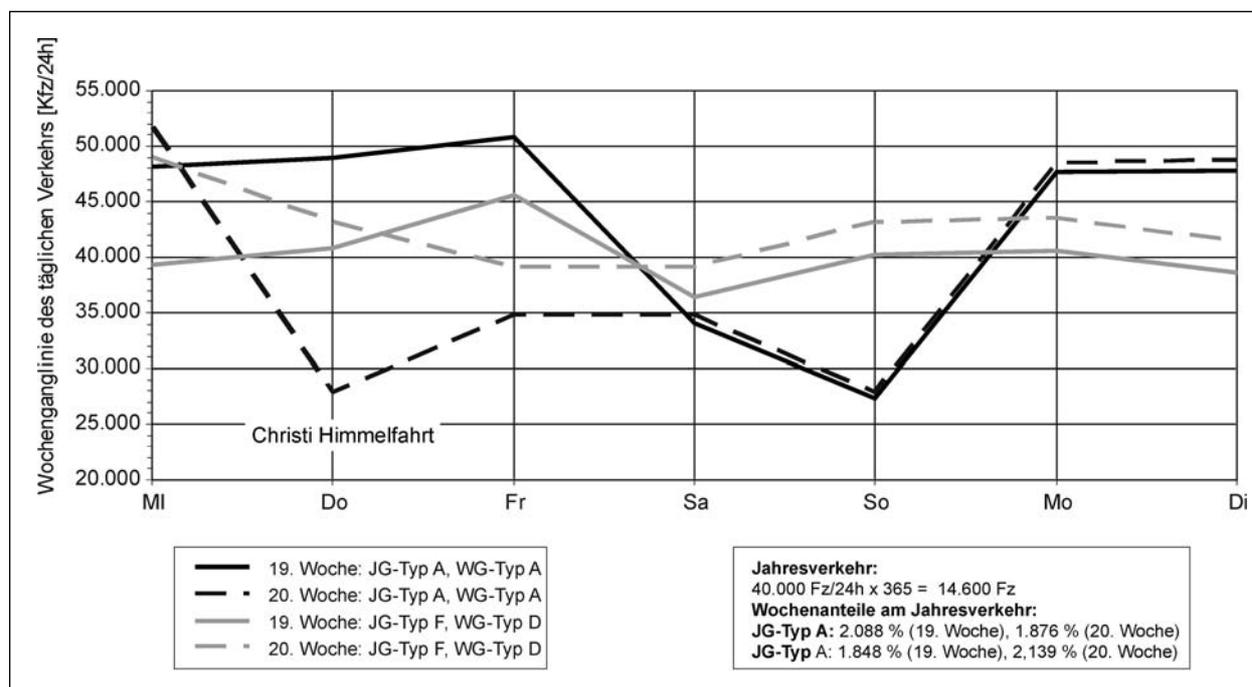


Bild 3: Ausgewählte Wochenganglinien der Verkehrsstärke für den Normalzeitbereich und Urlaubs- und Feiertagsverkehr im Vergleich

in der Normalzeitbereichswoche (2,088 % des Jahresverkehrs) auf das Belastungsniveau der Feiertagswoche (1,876 % des Jahresverkehrs) sich fast ausschließlich auf den Feiertag und folgenden Brückentag auswirkt. Die Verkehrsstärkewerte an den Werktagen bleiben nahezu unbeeinflusst. Bei der Kombination JG-Typ F/WG-Typ D des Normalzeitbereiches, die z. B. auch einigen vom Urlaubsverkehr geprägten Streckenabschnitten auf der A 3 und auf der A 7 zugeordnet ist, wird der Mehrverkehr in Woche 20 (2,042 % des Jahresverkehrs im Vergleich zu 1,928 % in Woche 19) zu einem überproportionalen Anteil am Mittwoch vor Christi Himmelfahrt abgewickelt.

3.2.3 Ableitung eines modifizierten Verfahrens

Ganglinien der Verkehrsnachfrage

Aus den Erläuterungen in Kapitel 3.2.1 geht hervor, dass die Nutzung von kollektiven Ganglinientypen nach PINKOFSKY (2003) in Anbetracht des Umfangs der zu verarbeitenden Datenmenge die am besten geeignete Methode zur Modellierung der Verkehrsnachfrage ist.

Da die von PINKOFSKY (2003) ermittelten Ganglinientypen ausschließlich mit Dauerzählstellen ausgestatteten Streckenabschnitten zugeordnet sind, müssen Streckenabschnitte ohne Dauerzählstelle einer benachbarten Vergleichsdauerzählstelle zu-

geordnet werden. Dabei wird grundsätzlich versucht, eine „Extrapolation“ über Knoten mit starken Verkehrsnachfragesprüngen, im Wesentlichen Autobahnkreuze und -dreiecke, hinaus zu vermeiden.

Nachteilig wirkt sich aus, dass die modellierte Verkehrsnachfrage stets einen mittleren Erwartungswert widerspiegelt. Stochastische Schwankungen können nicht abgebildet werden.

Als problematisch ist weiterhin das Fehlen von Tages- und Wochenganglinien für den Urlaubsverkehr anzusehen, da gerade hier von veränderten Verkehrsnachfragestrukturen gegenüber dem Normalzeitbereich auszugehen ist. Die Überlegungen aus Kapitel 3.2.2 zeigen, dass sich diese Defizite zwar nicht grundsätzlich beheben lassen, aber durch geeignete Modifikationen in der Modellierung entscheidende Verbesserungen erreicht werden können.

Berücksichtigung stochastischer Schwankungen

Im Rahmen des FE-Vorhabens „Reisezeitverluste an Arbeitsstellen“ wurde ein Modell zur Berücksichtigung der stochastischen Schwankungen der stündlichen Erwartungswerte der Verkehrsnachfrage entwickelt (OBER-SUNDERMEIER, OTTO, 2003). OBER-SUNDERMEIER und OTTO gehen dabei von folgenden Zusammenhängen aus:

Da bei der Erstellung der typisierten Ganglinien Verkehrsstärkewerte unterschiedlicher Tage und unterschiedlicher Zählstellen zusammengefasst werden, repräsentiert der resultierende Ganglinientyp letztendlich einen Mittelwert aus einer mehr oder weniger heterogenen Grundgesamtheit. Bei der Ermittlung der verkehrlichen Wirkungen hat die Verwendung dieses Mittelwertes unter Umständen zur Folge, dass die tatsächliche Staubildung systematisch unterschätzt wird. Deutlich wird diese Tatsache, wenn man z. B. den Fall betrachtet, dass die auf Grund der typisierten Ganglinie ermittelte Verkehrsstärke während des kritischen Zeitbereichs eines Tages nur unwesentlich unter der Kapazität des Engpasses liegt. Bei ausschließlicher Verwendung dieses Wertes würde sich bei einer Berechnung über einen längeren Zeitraum (z. B. einen Monat) hinweg nie ein Stau ergeben. Geht man jedoch davon aus, dass die Verkehrsnachfrage stochastischen Schwankungen unterliegt, so können die tatsächlichen Werte sowohl über als auch unter dem Mittelwert liegen. In diesem Fall würde die gleiche Berechnung zu dem Resultat führen, dass vor dem Engpass an einigen Tagen ein Stau auftritt. Es ist davon auszugehen, dass diese Variante der Realität wesentlich näher kommt.

Um die systematische Unterschätzung der Staubildung abzumindern, wird daher bei der Modellierung der Verkehrsnachfrage eine stochastische Komponente eingeführt. Die Grundlage dieser Modellierung bildet die Verkehrsstärkeganglinie, die aus der zugehörigen typisierten Ganglinie sowie dem DTV-Wert des Streckenabschnitts berechnet wird und die mittleren Erwartungswerte $q_0(i)$ für jede Stunde des Tages darstellt. Zur Modellierung der endgülti-

gen Verkehrsstärkeganglinie eines speziellen Tages werden die einzelnen Stundenwerte mit Hilfe einer Normalverteilung um den jeweiligen Erwartungswert gestreut. Die Eigenschaften der Normalverteilung werden durch den Variationskoeffizienten V festgelegt:

$$V = \frac{\sigma}{\mu} \quad \text{Gl. 2}$$

mit:

V : Variationskoeffizient

σ : Standardabweichung

μ : Mittelwert (hier: Erwartungswert der stündlichen Verkehrsstärke)

Da bislang keine einschlägigen Untersuchungen zur Größe dieses Variationskoeffizienten vorliegen, wird im Rahmen einer Erstversorgung der Wert 0,05 angesetzt, d. h., die Standardabweichung beträgt 5 % vom jeweiligen Erwartungswert der Verkehrsstärke pro Stunde. Zur Vermeidung von unplausiblen Verkehrsstärkewerten, wird zusätzlich ein oberer und unterer Grenzwert bei $\mu \pm 0,5 \mu$ eingeführt.

Bild 4 zeigt beispielhaft eine typisierte Tagesganglinie mit einer stochastischen Angleichung nach dem beschriebenen Verfahren. Durch die Simulation des Verkehrsablaufs über ein ganzes Jahr ist davon auszugehen, dass im Mittel der Erwartungswert der Verkehrsstärke annähernd getroffen wird. Gegebenenfalls werden hierzu mehrere Berechnungsläufe durchgeführt.

Da benachbarte, nur durch eine Fahrstreifenänderung getrennte Streckenabschnitte identische Ver-

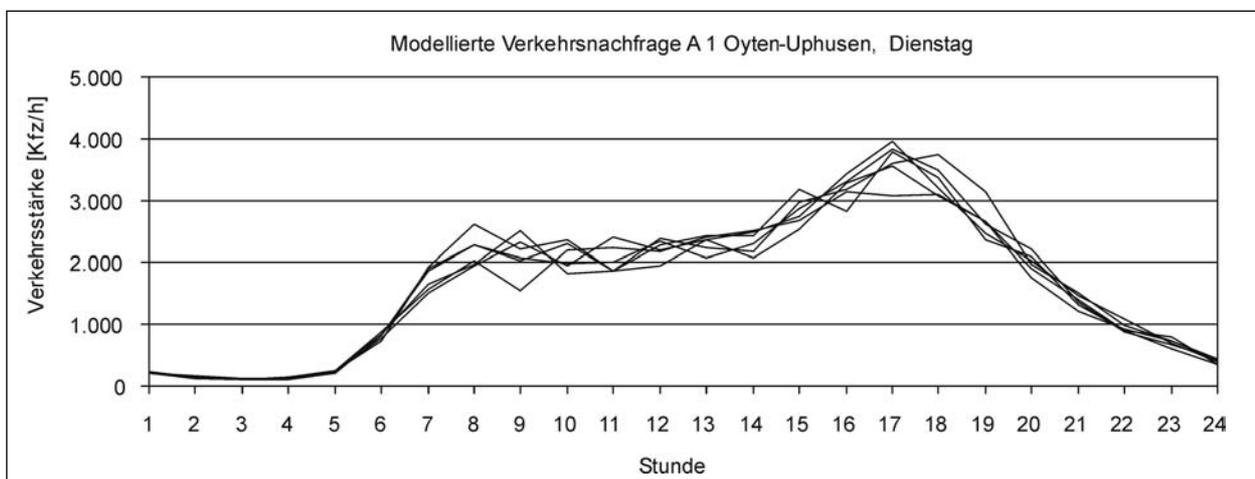


Bild 4: Typisierte Ganglinie nach PINKOFSKY mit stochastischer Angleichung (OBER-SUNDERMEIER, OTTO, 2003)

kehrsnachfragewerte aufweisen müssen, wird diesen Abschnitten dieselbe stochastische Komponente aufgeprägt.

Modellierung des Schwerverkehrsanteils

Da aktuelle Ganglinientypen des Schwerverkehrs nicht verfügbar sind, ist der SVA anderweitig zu modellieren. Die starken Schwankungen der Verkehrsnachfrage innerhalb eines Tages werden im Wesentlichen von Pkw verursacht. In mehreren Untersuchungen (BRESSLER, 1997; OBER-SUNDERMEIER, 2003) zeigt sich, dass die absolute Anzahl von Schwerverkehrsfahrzeugen über den Tag hinweg (außerhalb der Nachtstunden) annähernd konstant bleibt und somit der SV-Anteil in den Spitzenstunden deutlich niedriger ist als in den schwach belasteten Zeiten.

Diesem Umstand kann bei der Modellierung der Verkehrsnachfrage mit Hilfe typisierter Ganglinien dadurch Rechnung getragen werden, dass der Schwerverkehr – unabhängig von den Pkw – als über bestimmte Zeitbereiche des Tages hinweg konstante Größe behandelt wird. OBER-SUNDERMEIER und OTTO (2003) berücksichtigen dies mit einem relativ einfachen Ansatz. Dazu wird ausgehend vom mittleren Schwerverkehrsanteil in einem ersten Schritt die absolute Anzahl der SV-Fahrzeuge eines Tages ermittelt. Da davon auszugehen ist, dass das Güterverkehrsaufkommen am Wochenende weitaus niedriger liegt als an Werktagen, müssen basierend auf dem mittleren Schwerverkehrsanteil zwei neue Werte erzeugt werden:

- Der Schwerverkehrsanteil am Wochenende (Samstag/Sonntag) $SVA_{Sa/So}$ wird mit etwa bei 5 % des Kfz-Verkehrs abgeschätzt.
- Der Schwerverkehrsanteil werktags (Montag-Freitag) SVA_{Mo-Fr} ergibt sich anschließend aus dem mittleren Schwerverkehrsanteil SVA_{Mittel} sowie dem Anteil am Wochenende zu:

$$SVA_{Mo-Fr} = \frac{7 \cdot SVA_{Mittel} - 2 \cdot SVA_{Sa,So}}{5} \quad \text{Gl. 3}$$

Aus den somit festgelegten Schwerverkehrsanteilen lässt sich in Kombination mit dem tagesbezogenen DTV-Wert (aus der Wochenganglinie) eine Gesamtmenge an Schwerverkehrsfahrzeugen pro Tag ermitteln. Die Disaggregation in Stundenintervalle erfolgt anschließend durch das Verhältnis von $q_{Lkw}(Nacht)$ zu $q_{Lkw}(Tag)$, das auf der Basis der

empirischen Untersuchungen von OBER-SUNDERMEIER (2003) zu 0,4 angenommen wird. Dabei ist zu gewährleisten, dass die berechnete Lkw-Nachfrage in den Nachtstunden nicht die durch die Ganglinie modellierte Gesamtverkehrsnachfrage übersteigt.

Berücksichtigung von Verlagerungseffekten

OBER-SUNDERMEIER und OTTO (2003) stellen im Rahmen der Quantifizierung staubedingter Reisezeitverluste an Autobahnbaustellen fest, dass Verlagerungseffekte bei der Modellierung von Überlastungen eine wesentliche Rolle spielen.

Prinzipiell kann eine Verlagerung der Verkehrsnachfrage zum einen durch einen Gewöhnungseffekt hervorgerufen werden (insbesondere auf Abschnitten mit einem hohen Anteil ortskundiger Fahrer), d. h., ein Teil der Verkehrsteilnehmer weicht dem Engpass zu erfahrungsgemäß stark belasteten Zeiten von vornherein aus. Zum anderen bewirken aktuelle Verkehrsinformationen über Rundfunk oder Verkehrsbeeinflussungsanlagen eine weitere Verlagerung der Verkehrsnachfrage.

Letztere Annahme wird insbesondere durch die Tatsache gestützt, dass jährlich sowohl von privater als auch von öffentlicher Seite mehrere Millionen Euro in Verkehrswarn- und -informationsdienste investiert werden und diesen Systemen somit auch eine nennenswerte Wirksamkeit unterstellt wird.

Hinsichtlich der Ausprägung der Verlagerung ist davon auszugehen, dass mit zunehmender Staulänge (die Verlustzeit als eigentlich entscheidendes Kriterium ist für den Verkehrsteilnehmer in den meisten Fällen schwer einschätzbar) eine Verstärkung des Verlagerungseffekts eintritt. Bei der Ableitung von möglichen Verlagerungsfunktionen sind daher zunächst drei Annahmen plausibel (OBER-SUNDERMEIER, OTTO, 2003):

- Bei einer gewissen minimalen Staulänge treten keine nennenswerten Verkehrsverlagerungen auf, da die im Stau auftretenden Verlustzeiten vom Verkehrsteilnehmer geringer eingestuft werden als diejenigen Zeitverluste, die bei Verlagerung der Fahrt zu erwarten wären.
- Mit steigender Staulänge steigt auch der Verlagerungsanteil.
- Mit hohen Staulängen nähert sich der Verlagerungsanteil asymptotisch einem Grenzwert an, da davon auszugehen ist, dass nur in seltenen

Fällen 100 % der Verkehrsteilnehmer von einer Störung informiert sind und die Information auch nicht bei allen informierten Verkehrsteilnehmern zu einer Verhaltensänderung führt.

Eine weitere wesentliche Eingangsgröße für die Bestimmung des verlagerbaren Anteils der Verkehrsnachfrage ist die Verfügbarkeit einer oder mehrerer Alternativrouten, wobei sowohl die Kapazität dieser Route(n) als auch der jeweilige Umwegfaktor entscheidend für die Höhe der zu erwartenden Reisezeit beim Verlassen der Originalroute sind.

Da zur Übertragung dieser rein qualitativen Aussagen in ein mathematisches Modell bislang keine Untersuchungen vorliegen, wurde für die vorliegende Aufgabenstellung eine Verlagerungsfunktion verwendet, die den oben genannten Grundregeln entspricht, die jedoch auf Grund fehlender Datengrundlagen lediglich als Erstversorgung anzusehen ist. Aus diesem Grund wurde auch auf eine Differenzierung hinsichtlich der Netzstruktur und damit der Verfügbarkeit von Alternativrouten verzichtet.

Die in Bild 5 dargestellte Verlagerungsfunktion 1 löst sich ab einer Staulänge von 4 km nennenswert vom Wert 1,0 ab ($f = 0,963$, d. h., 3,7 % der Fahrzeuge wählen eine Alternativroute). Zwischen 4 und 10 km Staulänge weist die Funktion das stärkste Gefälle auf. Hier reagiert das Kollektiv am empfindlichsten auf Informationsänderungen hinsichtlich der Staulänge. Bei einer Staulänge von 10 km nutzen demnach bereits etwa 31 % der Fahrzeuge eine Alternativroute bzw. verschieben ihre Fahrt auf einen anderen Zeitraum. Mit weiter ansteigender

Staulänge tritt eine Sättigung ein, d. h., der verlagerte Anteil der Fahrzeuge nimmt immer schwächer zu. Zur Untersuchung des Einflusses der Verlagerungsfunktion wird im Berechnungsteil auch eine alternative Verlagerungsfunktion 2 angesetzt. Diese löst sich bereits früher vom Wert 1,0 ab und bewirkt insgesamt eine etwas stärkere Verlagerung als die Verlagerungsfunktion 1.

Zu berücksichtigen ist, dass ein Teil der Verlagerung, insbesondere zeitliche Verlagerungen im Berufsverkehr bei regelmäßig stark belasteten Abschnitten, bereits durch die Verkehrsnachfragemodellierung mit typisierten Ganglinien abgedeckt ist.

Die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des gewählten Modellansatzes wird durch die Ergebnisse in Kapitel 6 und 7 bestätigt. Der bedingt durch fehlende empirische Grundlagen hohe Generalisierungsgrad an diesem für die Ergebnisermittlung zentralen Verfahrensschritt beeinträchtigt allerdings die Aussagekraft der abschnittsbezogenen Ergebnisse im Einzelfall erheblich.

3.3 Modellierung der Kapazität

3.3.1 Grundlagen und vorhandene Ansätze

Die Kapazität eines Fahrbahnquerschnittes definiert die größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrstrom bei gegebenen Weg- und Verkehrsbedingungen an dem für ihn bestimmten Querschnitt erreichen kann (FGSV, 2000). Der Wert der Kapazität ist abhängig vom gewählten Bezugsintervall. Das bedeutet: Je größer das gewählte Bezugsintervall ist, desto niedriger ist die zugehörige Kapazität. KEL-

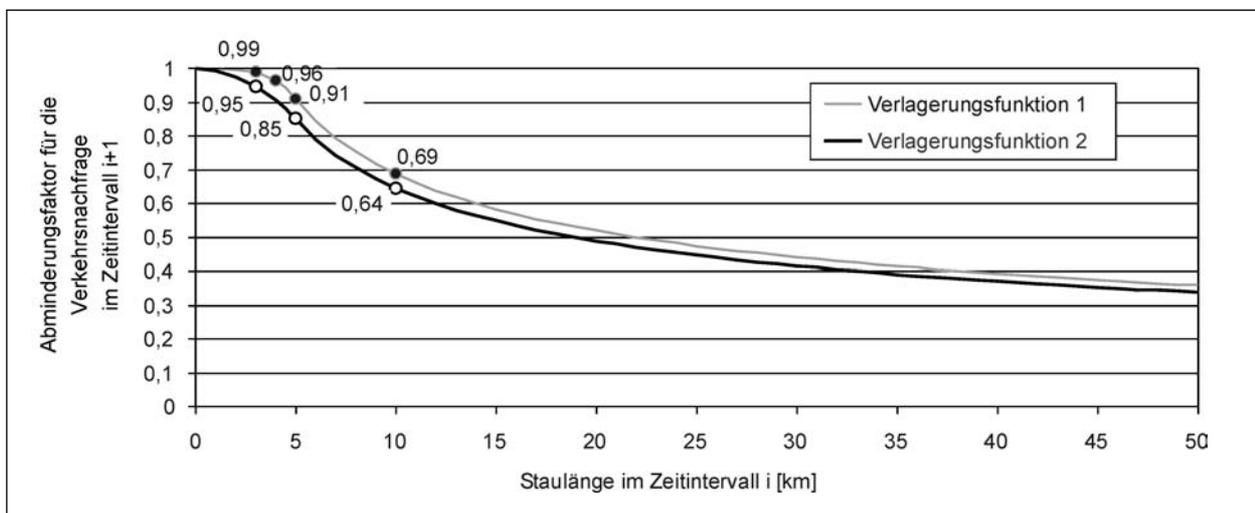


Bild 5: Verlagerung der Verkehrsnachfrage in Abhängigkeit von der Staulänge (Erstversorgung)

LER und SACHSE (1992) ermittelten zum Beispiel in ihrer Untersuchung für ein- bzw. zweistreifige Richtungsfahrbahnen von Bundesstraßen bei einem Vergleich von 5-Minuten-Intervallen und 60-Minuten-Intervallen einen Faktor von 1,2 zur Berücksichtigung von zeitweise auftretenden erhöhten Verkehrsstärken, die innerhalb des 60-Minuten-Intervalls nicht abgebildet werden (KELLER, SACHSE, 1992).

Die Kapazität weist grundsätzlich sowohl deterministische als auch stochastische Komponenten auf. Man unterscheidet zwei Bereiche der Verkehrszustände, von denen man sich der Kapazität auf unterschiedlichem Niveau (getrennt durch den so genannten „Capacity Drop“) nähern kann:

- **Stabiler Bereich:** Dieser herrscht bei „normalem“ Verkehrsfluss vor.
- **Instabiler Bereich:** In diesem, eigentlich als indifferent zu bezeichnenden Bereich kann bei gleichzeitig hoher Verkehrsstärke und hohem Geschwindigkeitsniveau ein „kleines“ stochastisches Einzelereignis schwerwiegende Folgen haben und zu einem Zusammenbruch des Verkehrs führen.

Das Capacity-Drop-Phänomen wurde in verschiedenen empirischen Untersuchungen festgestellt. KERNER und REHBORN (1998) beziffern das Verhältnis von maximaler Verkehrsstärke bei „freiem Verkehr“ zur Verkehrsstärke aus dem Stau heraus mit 1,5 (Capacity Drop = 33 %). Da der Analyse 1-Minuten-Intervalle zu Grunde liegen, resultiert die starke Differenz – zumindest zum Teil – aus den unterschiedlich starken Streuungen der Messwerte bei gerade noch fließendem Verkehr bzw. bei Verkehr aus dem Stau heraus. PONZLET (1996) gibt den Capacity Drop mit etwa 10 % (1-Minuten-Intervalle) und sinkender Tendenz bei steigender Intervallgröße an (PONZLET, 1996). Im amerikanischen Highway Capacity Manual – HCM (TRB, 2000) wird der Sprung dagegen lediglich in einer Größenordnung von 5 %, allerdings bei einem Bezugsintervall von 1 h, angegeben.

Der Verkehrsablauf unterliegt grundsätzlich vielfältigen Einflussfaktoren. Nach OBER-SUNDERMEIER (2003) besteht das Gesamtsystem der wechselseitigen Beziehungen aus den Bereichen Streckencharakteristik, Verkehr und Umfeld, die den makroskopischen Rahmen des Verkehrssystems festlegen, und den Bereichen Fahrzeug und Fahrzeugführer, welche die Eigenschaften der einzel-

nen Elemente des Systems repräsentieren. Den Verkehrsablauf und die Kapazität beeinflussenden Faktoren gliedert OBER-SUNDERMEIER (2003) wie folgt:

- **Streckencharakteristik:**
 - Querschnittsgestaltung (Anzahl und Lage der Fahrstreifen; Mitbenutzung des Seitenstreifens; bei Unfällen und Nothalten: Anzahl und Lage der vorübergehend gesperrten Fahrstreifen),
 - Trassierung (Längsneigung, Kurvigkeit),
 - Knotenpunkte (Anschlussstellen, Autobahndreiecke und -kreuze).
- **Umfeldbedingte Faktoren:**
 - Witterung (Regen, Schnee, Nebel, Wind, Glätte),
 - Helligkeit.
- **Verkehrsabhängige Faktoren:**
 - Verkehrszusammensetzung (Anteile des Pkw- und des Schwerverkehrs).
- **Fahrzeugführerabhängige Faktoren:**
 - Fahrereigenschaften (Fahrkönnen, Sicherheitsbewusstsein, physische und psychische Belastbarkeit, Reaktionsvermögen, Seh- und Schätzvermögen, körperliche Verfassung, Schaulust).
 - Fahrtzweck (Ortskenntnis, Fahrweise, Wunschgeschwindigkeit).

Während die drei erstgenannten Gruppen von Randbedingungen zumindest qualitativ gut eingeschätzt werden können, bereitet die Beschreibung der fahrzeug- und fahrzeugführerabhängigen Faktoren auf Grund der in diesem Detaillierungsgrad fehlenden Informationen Schwierigkeiten. Zur Beurteilung können hier lediglich Sekundärmerkmale herangezogen werden, wie z. B. die Lage im Netz als Kriterium für den Anteil der Berufspendler und damit einhergehend die Ortskundigkeit.

Zur Ermittlung der Kapazität eines Autobahnstreckenabschnitts existieren verschiedene Verfahren mit z. T. differierenden Ergebnissen. Die wichtigsten Ansätze und Untersuchungen sowohl zur Grundkapazität als auch zur Berücksichtigung der kapazitätsbeeinflussenden Faktoren an Engpässen sind nachfolgend beschrieben.

Grundkapazität der freien Strecke

Als Kapazität unter idealen Randbedingungen ist die maximal abführbare Verkehrsstärke ohne Einflussfaktoren, d. h. bei reinem Pkw-Verkehr, im Ballungsraum, ohne Längsneigung, ohne den Einfluss von Knoten bei hellen, trockenen Umfeldbedingungen zu verstehen.

Im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen – HBS (FGSV, 2001) werden die Werte für die Kapazität auf Autobahnen unter idealen Bedingungen richtungsbezogen mit

- 4.000 Kfz/h für eine zweistreifige Richtungsfahrbahn bzw.
- 5.700 Kfz/h für eine dreistreifige Richtungsfahrbahn

angegeben.

Ein alternativer Ansatz ist die Angabe eines fahrstreifenbezogenen Kapazitätswertes. Dieser Ansatz wird im amerikanischen Highway Capacity Manual – HCM (TRB, 2000) verfolgt. Unter der Voraussetzung einer freien Geschwindigkeit von 120 km/h ergibt sich dort mit 2.400 Pkw-E/h pro Fahrstreifen ein Wert, der insbesondere auf Grund der stark kontrollierten Geschwindigkeitsbeschränkungen und des gleichmäßigeren Verkehrsablaufs in den USA in Deutschland nicht erreicht werden kann. OBER-SUNDERMEIER (2003) hat den HCM-Ansatz auf der Basis empirischer Untersuchungen auf deutsche Verhältnisse übertragen. Sie geht dabei von einer Grundkapazität von 2.000 Pkw-E/h pro Fahrstreifen aus.

Fahrstreifenreduktionen

Fahrstreifenreduktionen bewirken einen Anstieg der Fahrstreifenwechsel, eine Häufung von Brems- und Beschleunigungsmanövern und damit eine gegenüber einer durchgehenden Fahrbahn (mit reduzierter Fahrstreifenanzahl) abgeminderte Kapazität.

ENGELMANN (2003) analysierte in seiner Untersuchung Fahrstreifenreduktionen im Bereich von Knotenpunkten sowie auf der freien Strecke. Auf der Basis von Messungen an insgesamt 20 Untersuchungsstellen (freie Strecke: 13; Knotenpunkte: 7) sollten Reduktionsfaktoren ermittelt werden, die den Einfluss dieser Fahrstreifenreduktionen auf die Kapazität des Streckenabschnitts abbilden. Dabei kam ENGELMANN (2003) zu folgenden Kernaussagen:

- An Fahrstreifenreduktionen von drei auf zwei Fahrstreifen auf der freien Strecke tritt im Mittel eine zusätzliche Kapazitätsreduktion um 15 % auf.
- Für die Bestimmung der Kapazität im Bereich von Knotenpunkten ist häufig nicht die Fahrstreifenreduktion hinter der Ausfahrt, sondern vielmehr die Verflechtung mit den Verkehrsströmen in der Einfahrt maßgebend. Daher konnte für diesen Fall kein Reduktionsfaktor bestimmt werden.

Der auf der freien Strecke ermittelte Reduktionsfaktor bezieht sich auf 5-Minuten-Intervalle. Es ist davon auszugehen, dass er bei einem Bezugsintervall von 1 Stunde niedriger ausfällt.

Schwerverkehr und Längsneigung

Schwerverkehrsfahrzeuge weisen zum einen eine erheblich größere Länge auf als Pkw, zum anderen ist ihr Leistungsgewicht, also das Verhältnis von Gewicht des Fahrzeugs zu Motorstärke (kW), deutlich ungünstiger als bei Pkw. Dieses höhere Leistungsgewicht bewirkt insbesondere an Strecken mit großer Längsneigung einen starken Abfall der Geschwindigkeit bzw. bei Anfahrt aus dem Stau eine geringe Beschleunigung. Verbunden mit einem hohen Verkehrsaufkommen und damit eingeschränkten Überholmöglichkeiten führt dieser Geschwindigkeitsabfall zur Behinderung der anderen Verkehrsteilnehmer und somit zur Reduktion der Kapazität des Streckenabschnittes.

OBER-SUNDERMEIER (2003) berechnet in ihrer Arbeit für den Schwerverkehr Pkw-Äquivalenzwerte, wobei folgende Grundzusammenhänge aus ihren empirischen Untersuchungen Eingang finden:

- Mit steigender Längsneigung wird der Pkw-Äquivalenzwert größer.
- Bei positiver Längsneigung (Steigung) treten erheblich größere Pkw-Äquivalenzwerte auf als bei negativer (Gefälle).
- Mit steigendem GV-Anteil wird der Pkw-Äquivalenzwert kleiner.
- Mit steigender Länge des Abschnittes mit Längsneigung wird der Pkw-Äquivalenzwert größer.

Diese Zusammenhänge finden sich auch im Highway Capacity Manual – HCM (TRB, 2000) wieder.

Für Längsneigungen zwischen -4 % und +2 % setzt OBER-SUNDERMEIER (2003) einen einheitlichen Pkw-Äquivalenzwert von 1,5 Pkw-E/Lkw an. Bei Längsneigungen, die kleiner als -4 % bzw. größer als +2 % sind, ist der Äquivalenzwert in Abhängigkeit von der Längsneigung, dem aktuellen SV-Anteil und der Länge des betrachteten Abschnittes mit Längsneigung nach Gl. 4 zu ermitteln.

$$E = 1,5 + a \cdot SV^{-b} \quad \text{Gl. 4}$$

mit:

E: Äquivalenzwert

a, b: Modellparameter zur Berücksichtigung der Länge des Längsneigungsabschnitts

SV: Schwerverkehrsanteil [%]

Nach der Ermittlung des maßgebenden Äquivalenzwertes E berechnet sich der Faktor f_{SV} zur Umwandlung des (Grund-)Kapazitätswertes von Pkw-Einheiten/h in Kfz/h folgendermaßen:

$$f_{SV} = \frac{1}{(1 - SVA + SVA \times E)} \quad \text{Gl. 5}$$

mit:

f_{SV} : Reduktionsfaktor

SVA: Schwerverkehrsanteil (als Dezimalzahl)

E: Äquivalenzwert in Pkw-E/Lkw

Im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen – HBS (FGSV, 2001) werden der Schwerverkehrsanteil und die Längsneigung ebenfalls als ein wichtiges Kriterium bei der Ermittlung der Kapazität eines Streckenabschnitts betrachtet. Die Berücksichtigung von Steigungsstrecken erfolgt jedoch nicht explizit über Äquivalenzwerte, vielmehr werden in Abhängigkeit vom Schwerverkehrsanteil pro Steigungsklasse Kapazitäten angegeben (Tabelle 4). Berechnet man zum Vergleich Äquivalenzwerte anhand der vorgegebenen Kapazitäten, zeigt sich, dass diese – unabhängig von der

Längsneigung	SV-Anteil		
	0 %	10 %	20 %
< 2 %	5.700	5.400	5.100
3 %	5.300	5.000	4.700
4 %	4.700	4.450	4.200
5 %	4.250	4.000	3.750

Tab. 4: Kapazitäten auf dreistreifigen Richtungsfahrbahnen ohne Geschwindigkeitsbegrenzung, in Ballungsräumen [FGSV, 2001]

Längsneigung und vom Schwerverkehrsanteil – immer zwischen 1,2 und 1,5 liegen.

Der Einfluss der Längsneigung wird demnach über einen vom SV-Anteil völlig unabhängigen Reduktionsfaktor abgebildet, der etwa folgende Größenordnungen besitzt:

- 3 % Steigung $\Rightarrow f = 0,93$,
- 4 % Steigung $\Rightarrow f = 0,82$,
- 5 % Steigung $\Rightarrow f = 0,74$.

Grundlage für die Angaben im HBS 2001 sind die Ergebnisse aus einer Forschungsarbeit von BRESSLER (2001). Sie simulierte für verschiedene Kombinationen von Randbedingungen (Schwerverkehrsanteil, Längsneigung und Länge des Längsneigungsabschnitts) den Verkehrsablauf an Steigungs- und Gefällestrecken und leitete daraus ein makroskopisches Geschwindigkeits-Verkehrsdichte-Modell ab. In diesem Modellansatz wird der Einfluss des Schwerverkehrs unabhängig von der Steigung behandelt (siehe oben).

Verkehrszusammensetzung

Faktoren, welche die persönlichen Fahrereigenschaften, also Sicherheitsbewusstsein, Fahrkönnen etc., betreffen, sind schlecht abschätzbar. Der Fahrtzweck und – in Zusammenhang damit – die Ortskenntnis und die Fahrweise lassen sich dagegen zumindest überschlägig über die Anteile im Berufs- und Freizeitverkehr (wenn vorhanden) und durch die Lage des Streckenabschnittes im Netz (überregionale Verbindung – Ballungsraum) feststellen.

Das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen – HBS (FGSV, 2001) sieht bei der Bestimmung der Kapazität der freien Strecke die Berücksichtigung der raumstrukturellen Lage des betrachteten Streckenabschnitts vor. Es wird jedoch kein expliziter Faktor ausgewiesen, vielmehr enthält das HBS Kapazitätswerte in Abhängigkeit von der Lage im Netz, vom Schwerverkehrsanteil sowie von der Längsneigung. OBER-SUNDERMEIER (2003) beziffert diese Reduktionsfaktoren anhand der Kapazitätswerte bei ansonsten gleichen Randbedingungen zwischen 0,87 und 0,95.

Umfeldbedingungen

Zu den umfeldbedingten Faktoren, die einen Einfluss auf die Kapazität eines Streckenabschnitts

haben können, gehören die Witterung, die Helligkeit und damit verbunden die Sichtverhältnisse.

PONZLET (1996) wertete in seiner Arbeit im Rahmen einer Langzeituntersuchung Messdaten von 15 Dauerzählstellen über einen Zeitraum von drei Jahren aus. Dabei handelt es sich um 4-spurige und 6-spurige Messquerschnitte sowohl in Balungsräumen als auch an großräumigen Verbindungsstrecken. Mit den Daten der Dauerzählstellen werden die Auswirkungen der zeitlich veränderlichen Umfeldbedingungen auf die Geschwindigkeit und die Leistungsfähigkeit anhand unterschiedlicher Verkehrsflussmodelle untersucht. Dabei ergaben sich folgende Zusammenhänge:

- Einfluss der Dunkelheit: Reduzierung der maximalen Verkehrsstärke um 9 %,
- Einfluss von Regen bei Helligkeit: Reduzierung der maximalen Verkehrsstärke um 13 %,
- Einfluss von Regen bei Dunkelheit: Reduzierung der maximalen Verkehrsstärke um 30 %.

Angaben zu anderen Witterungszuständen, wie z. B. Nebel oder Schneefall, werden nicht explizit gemacht. Die von BRILON und ZURLINDEN (2003) ermittelten Werte bestätigen bei Regen die Erwartungswerte von PONZLET (1996). Einen systematischen Einfluss der Dunkelheit auf die Kapazität konnten BRILON und ZURLINDEN (2003) jedoch nicht feststellen.

Die Einbindung dieser generalisierten Zusammenhänge in ein Kapazitätsmodell bereitet insofern Schwierigkeiten, als sowohl die Häufigkeit als auch die Dauer von Niederschlagsereignissen je nach geografischer Lage sehr stark schwanken. Es müssten für jeden Streckenabschnitt repräsentative Klimamessstellen ausgewählt werden und deren Niederschlagsganglinien in geeigneter Weise in das Kapazitätsmodell integriert werden – eine Vorgehensweise, die für das vorliegende Projekt in jedem Fall zu aufwändig ist.

OBER-SUNDERMEIER und OTTO (2003) greifen auf Grund dieser Problematik auf einen stochastischen Ansatz zurück. Ausgehend von Durchschnittswerten für die Häufigkeit und die Dauer legen sie die Niederschlagsereignisse mit einer Gleichverteilung, also ohne Berücksichtigung saisonaler Schwankungen, auf die Baustellenabschnitte um. Während eines Regenereignisses, das mit einer durchschnittlichen Häufigkeit von 0,37 pro Tag (etwa 135 Niederschlagsereignisse pro Jahr)

und einer durchschnittlichen Dauer von 2 Stunden angesetzt wird, reduziert sich die Kapazität in Anlehnung an die von PONZLET (1996) ermittelten Werte um 10 %.

Störfälle (Pannen und Unfälle)

Pannen (Nothalte) und Unfälle, insbesondere wenn damit Fahrstreifensperrungen verbunden sind, haben einen entscheidenden Einfluss auf die Kapazität. Problematisch im Hinblick auf eine Modellierung ist allerdings das Fehlen ereignisbezogener Informationen (Zeitpunkt, Lage, Dauer, Kapazitätseinschränkung) einzelner Störfälle. In verschiedenen Untersuchungen wurden deshalb zu diesem Themenkomplex Ansätze auf der Basis makroskopischer Kenngrößen entwickelt, um sowohl Störfallhäufigkeiten als auch die Auswirkungen auf die Kapazität besser einschätzen zu können.

Störfallhäufigkeiten

BRILON und ZURLINDEN (2003) gehen in ihrer Untersuchung von einer Fahrleistungsabhängigkeit der Anzahl von Störfällen aus. Der Erwartungswert der Störfallanzahl berechnet sich zu:

$$n_{\text{Stf}} = q \cdot L \cdot T \cdot SR \quad \text{Gl. 6}$$

mit:

n_{Stf} : Erwartungswert der Störfallanzahl [-]

q: Verkehrsstärke [Kfz/h]

L: Abschnittslänge [km]

T: Intervalllänge [h]

SR: Störfallrate [1/Kfz-km]

Bei der Ermittlung von Störfallraten ist zwischen Unfällen und Pannen zu unterscheiden.

In den Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen – EWS (FGSV, 1997) werden verkehrsstärkeunabhängige Unfallraten für die unterschiedlichen Straßentypen angegeben. Für Autobahnen betragen diese:

- 0,619 U/10⁶ Fz-km für BAB mit Seitenstreifen
- 0,923 U/10⁶ Fz-km für BAB ohne Seitenstreifen

Bereits in der Vergangenheit wurde immer wieder festgestellt, dass ein Zusammenhang zwischen der Unfallrate und der Verkehrsstärke besteht. Geeignete Aussagen unter der Berücksichtigung der

aktuellen Verkehrsverhältnisse auf Bundesautobahnen standen bis vor kurzem allerdings nicht zur Verfügung. PÖPPEL-DECKER und SCHEPERS (2003) entwickelten deshalb auf der Basis aktueller Daten aus der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik für verschiedenen Unfalltypen verkehrsstärkeabhängige Funktionen der Unfallrate. Bild 6 macht insbesondere bei einer generalisierten Betrachtung (Unfälle mit Personenschaden oder schwerem Sachschaden) deutlich, dass eine Abhängigkeit der Unfallrate von der Verkehrsstärke vorhanden ist.

Pannensraten weisen im Gegensatz zu Unfallraten keine verkehrsstärkeabhängige Komponente auf. BÄUMER (2002) beziffert die Pannensraten in seiner Arbeit über „Einsatzkriterien für Nothaltemöglichkeiten an ein- und zweibahnigen Straßen“ mit

- 5,0 [P/10⁶ Fz-km] für BAB in Ballungsräumen,
- 3,75 [P/10⁶ Fz-km] für BAB außerhalb von Ballungsräumen.

Die angegebenen Pannensraten beziehen sich auf alle an einem Streckenabschnitt auftretenden Nothalte – unabhängig von ihrer Auswirkung auf den Verkehrsablauf. Bei vorhandenem Seitenstreifen geht BÄUMER (2002) von keiner Kapazitätseinschränkung aus. Da aber auch auf Streckenabschnitten ohne Seitenstreifen bei weitem nicht alle Pannen zu einer zwangsläufigen Querschnittseinschränkung führen, entwickelte BÄUMER (2002) einen Ansatz zur Ermittlung des Anteils der verkehrsbehindernden Pannen derjenigen Fahrzeuge, die auf Straßenabschnitten ohne Seitenstreifen im Fall eines Nothalts nicht mehr eine entsprechende Nothaltemöglichkeit erreichen können:

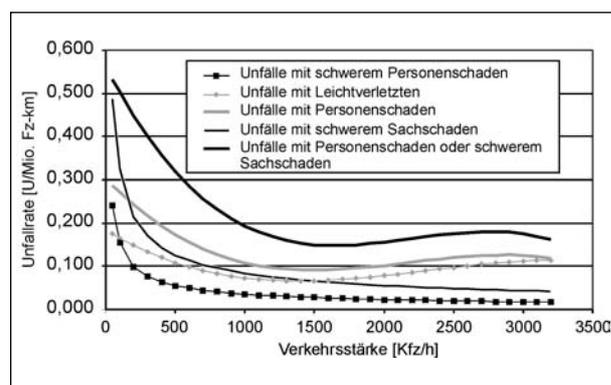


Bild 6: Unfallraten in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke, hier: zweistreifige Richtungsfahrbahnen (PÖPPEL-DECKER, SCHEPERS, 2003)

$$VB = 5,6 + 0,018 \cdot D + 1,97 \cdot s \quad \text{Gl. 7}$$

mit:

VB: Anteil der verkehrsbehindernden Pannen [%]

D: Abstand der Nothaltebuchten [m]

s: Gradientenneigung [%]

Setzt man als Abstand $D = 550$ m – die mittlere Entfernung bei den von BÄUMER untersuchten Strecken – und eine Gradientenneigung von 0 % an, so beträgt der Anteil VB etwa 15 %.

Störfalldauer

KELLER et al. (1983) untersuchten erstmals den Zusammenhang zwischen Unfalltypen und Störungsdauer für deutsche Autobahnen und kamen dabei auf die in Tabelle 5 dargestellten Schätzwerte für die Dauer der Fahrbahneinschränkung.

BÄUMER (2002) geht in seiner Arbeit für den nach Gl. 7 zu ermittelnden Anteil verkehrsbehindernder Pannen auf Streckenabschnitten ohne Seitenstreifen von den in Tabelle 6 aufgeführten Häufigkeiten und Blockierzeiten für den rechten Fahrstreifen aus. BRILON und ZURLINDEN (2003) verwenden ebenfalls die von BÄUMER (2002) geschätzten Häufigkeiten, allerdings ohne Differenzierung nach Pkw und Lkw.

Unfallgruppe (UG)	Seitenstreifen	
	ohne	mit
UG1: Bagatellunfall	20 min	15 min
UG2: leichter Unfall	35 min	20 min
UG3: schwerer Unfall (hoher Sachschaden, leichte Personenschäden)	40 min	25 min
UG4: schwerster Unfall (sehr hoher Sachschaden, Personenschäden)	50 min	35 min

Tab. 5: Dauer von Blockierzeiten bei Unfällen (KELLER et al., 1983)

Blockierzeit [Min.]	Anteil [%]	
	Pkw	Lkw
10	50	-
30	40	60
85	10	-
90	-	25
150	-	15

Tab. 6: Häufigkeiten und Dauer von Blockierzeiten bei Pannen auf Streckenabschnitten ohne Seitenstreifen (BÄUMER, 2002)

Auswirkungen auf die Kapazität

Das amerikanische Highway Capacity Manual – HCM (TRB, 2000) beinhaltet Angaben zu Kapazitätsreduktionen auf Grund von Unfällen und fahrzeugbedingten Nothalten. Tabelle 7 enthält Angaben zur verfügbaren Restkapazität für unterschiedliche Randbedingungen.

Die dort angegebenen Werte berücksichtigen neben dem eigentlichen Wegfall eines Fahrstreifens zusätzlich auch die abgelenkte Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer beim Passieren der Störstelle („Gaffer-Effekt“). BRILON und ZURLINDEN (2003) gehen davon aus, dass der Fahrbahnquerschnitt bei einem Unfall zunächst komplett gesperrt ist. Die Sperrzeit wird bei einer Störfalldauer von bis zu 20 Minuten mit 5 Minuten und in allen anderen Fällen mit 10 Minuten angesetzt. Im Anschluss an die Vollsperrung folgt ein Zeitbereich, in dem die Kapazität der Fahrbahn durch die in Anlehnung an das Highway Capacity Manual – HCM gewählten Faktoren berechnet werden kann (Tabelle 8).

Es wird angenommen, dass die verunfallten Fahrzeuge die Fahrbahn weitestgehend räumen, so dass bei Vorhandensein eines Seitenstreifens kaum noch Kapazitätseinbußen auftreten. Bei Fahrbahnen ohne Seitenstreifen bleibt ein Fahrstreifen blockiert.

Kombiniertes Verfahren zur Modellierung von Störfällen

OBER-SUNDERMEIER und OTTO (2003) modellieren mit der Grundformel nach BRILON und ZURLINDEN (Gl. 6) und den Ansätzen von PÖPPEL-DECKER und SCHEPERS (2003) für die Ermittlung von Unfallraten und BÄUMER (2003) für die Ermittlung von Pannenraten Störfälle an Arbeitsstellen auf Autobahnen und fassen so die unterschiedlichen Verfahren in einem Modellierungskonzept zusammen. Da den in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten makroskopischen Ansätzen – insbesondere im Hinblick auf eine Übertragung auf Arbeitsstellen – auch nur Schätzungen zu Grunde liegen, die mit starken Unsicherheiten behaftet sind, variierten OBER-SUNDERMEIER und OTTO (2003) bei ihren Berechnungsläufen die Dauer und das Ausmaß der Kapazitätseinschränkung (Tabelle 9). Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Raten und die Dauer von Störungen sowie die damit verbundenen Wirkungen auf den Ver-

Störfallauswirkung	Anzahl FS		
	2	3	4
Nothalt auf Seitenstreifen	0,95	0,99	0,99
Unfall auf Seitenstreifen	0,81	0,83	0,85
1 FS blockiert	0,35	0,49	0,58
2 FS blockiert	0,00	0,17	0,25

Tab. 7: Anteil der verfügbaren Kapazität von Autobahnabschnitten bei Störfällen (Unfälle/Nothalte) (TRB, 2000)

Anzahl FS	ohne Seitenstreifen/ 1 FS blockiert	mit Seitenstreifen/ „Gaffer-Effekt“
2-streifig	0,35	0,95
3-streifig	0,49	0,99
4-streifig	0,58	0,99

Tab. 8: Anteile der Störfallkapazität am ursprünglichen Wert (BRILON, ZURLINDEN, 2003)

Störfalltyp	Störungen pro $10^6 \cdot \text{Fz-km}$	Auswirkung [Min.]	
		Variante 1	Variante 2
schwerer Unfall	variabel	10/30 ¹	15 /45 ¹
leichter Unfall	variabel	25	35
Nothalt Pkw	5,0/3,75 ²	20	30
Nothalt Lkw	5,0/3,75 ²	45	60

1 Vollsperrung/Teilspernung
2 Ballungsraum/überregionale Verbindungsstrecke

Tab. 9: Modellparameter bei der Ermittlung von Störfallwirkungen

kehrsablauf bislang nur wenig untersucht sind, so dass hier kaum fundierte Aussagen vorliegen.

Temporäre Nutzung von Seitenstreifen

Die Problematik der Nutzung von Seitenstreifen für den fließenden Verkehr ist in jüngster Zeit auf Grund steigender Kapazitätsengpässe zunehmend diskutiert und untersucht worden (ARNOLD, 2001; LEMKE, MORITZ, 2001; MATTHEIS, 2002). Im Bezugsjahr 2000 waren auf deutschen Autobahnen 2 Streckenabschnitte mit temporärer Seitenstreifenfreigabe in Betrieb.

Grundsätzlich bewirkt diese Methode der Umnutzung von Fahrbahnflächen keinen Engpass, sondern vielmehr eine Erweiterung der ursprünglich vorhandenen Kapazität. Dabei wird auf die originären Funktionen des Seitenstreifens, nämlich die Nutzung für Nothalte, Rettungsfahrzeuge und den Betriebsdienst, verzichtet und damit eine Sen-

sibilität gegenüber Störungen durch Unfälle und Pannen in Kauf genommen.

Belastbare Aussagen über die Höhe der Kapazitätssteigerung von temporären Seitenstreifenfreigaben liegen bislang nicht vor, insbesondere weil hier auch Kompensationseffekte durch Störfälle und die Gewöhnung der Verkehrsteilnehmer mit einzubeziehen wären. Dafür wären wiederum längerfristig angelegte Untersuchungen notwendig.

Geschwindigkeitsbegrenzungen

Geschwindigkeitsbegrenzungen erhöhen generell die Kapazität eines Streckenabschnitts durch eine Harmonisierung des Verkehrsablaufs. Hinsichtlich des Einflusses auf die Kapazität sind statische Tempolimits und verkehrabhängige Geschwindigkeitsbegrenzungen im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen zu unterscheiden.

Statische Tempolimits

Das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen – HBS (FGSV, 2001) hält für statische Geschwindigkeitsbeschränkungen Kapazitäten für ebene Streckenabschnitte vor (Tabelle 10). Die Harmonisierung des Verkehrsablaufs hat dabei je nach Lage des Streckenabschnitts unterschiedliche Auswirkungen.

In Ballungsräumen ergibt sich auf Grund des durch die vorherrschend hohen Verkehrsstärken ohnehin gleichförmigeren Verkehrsablaufs eine Kapazitätssteigerung erst ab einem Tempolimit von 100 km/h in einer Höhe von etwa 2 % gegenüber der freien Strecke. Der Harmonisierungseffekt außerhalb von Ballungsräumen wird höher eingeschätzt. Hier werden durch die Geschwindigkeitsbegrenzung die Kapazitätswerte der Ballungsräume erreicht.

Lage im Netz	Zweistreifige Richtungsfahrbahn		
	Lkw-Anteil [%]		
	0	10	20
innerhalb von Ballungsräumen	4.000	3.800	3.600
außerhalb von Ballungsräumen	3.600	3.500	3.400
T120	4.000	3.800	3.600
T100/T80/Tunnel	4.100	3.900	3.700

Tab. 10: Kapazitäten [Kfz/h] auf zweistreifigen Autobahnabschnitten im Vergleich (FGSV, 2001)

Streckenbeeinflussung

In verschiedenen Untersuchungen wurde in der Vergangenheit nachgewiesen, dass die durch diese Form der Verkehrsbeeinflussung verursachte Harmonisierung der Geschwindigkeiten zu einer Stabilisierung der Verkehrsverhältnisse im Bereich dauerhaft hoher Verkehrsstärken führt. Die damit einhergehende Reduktion der Wahrscheinlichkeit eines Geschwindigkeitseinbruchs bewirkt auch eine Verminderung von Reisezeitverlusten. Zur Quantifizierung dieser Wirkungen liegen jedoch nur wenige aussagekräftige Untersuchungen vor.

Im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen – HBS wird der kapazitätssteigernde Effekt von Streckenbeeinflussungsanlagen dem von statischen Tempolimits (T100/T80) gleichgesetzt. Untersuchungen an der Verkehrsbeeinflussungsanlage auf der A 5 ergeben einen Wert zwischen 0 % (Fahrtrichtung Norden) und 11,5 % (Fahrtrichtung Süden) (HOFFMANN, LEICHTER, 1996). In einer aktuellen Untersuchung von PISCHNER et al. (2003), die mit dem Ziel durchgeführt wurde, die Nutzenkomponenten von Streckenbeeinflussungsanlagen im Hinblick auf den Verkehrsablauf zu ermitteln und zu bewerten, konnte keine Kapazitätssteigerung festgestellt werden. Deutlich wurde jedoch, dass die Stabilität des Verkehrsablaufs erhöht wurde und es zu weniger Geschwindigkeitseinbrüchen und daraus resultierenden Staus kam.

Der Effekt der Erhöhung der Stabilität des Verkehrsablaufs und die damit einhergehende Verringerung der Stauwahrscheinlichkeit lassen sich jedoch bei der Modellierung der Kapazität nur dann direkt berücksichtigen, wenn der Wert der Kapazität als stochastische und nicht als deterministische Größe behandelt wird. Zwar existieren in sich schlüssige Modelle zur Modellierung der Kapazität als stochastische Größe (z. B. BRILON, ZURLINDEN, 2003), allerdings sind die verwendeten Modellparameter noch nicht in dem Maße empirisch abgesichert, dass eine Verwendung dieser Modelle im Rahmen des vorliegenden Projektes zielführend wäre. Wird die Kapazität in Abhängigkeit von verschiedenen Randbedingungen unter Zuhilfenahme von Faktoren, jedoch nicht als stochastische Größe, modelliert, so müsste, um dennoch den staureduzierenden Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen abbilden zu können, ein Faktor eingeführt werden, der eine (fiktive) Erhöhung der Kapazität des betreffenden Streckenabschnitts bewirkt.

Knoten

Für den Verkehrsablauf im Übergang zwischen zwei Streckenabschnitten ist nicht nur die Kapazität des stromabwärtigen Streckenabschnitts maßgebend, sondern ebenfalls die Kapazität des eigentlichen Knotenpunktes und hier im Wesentlichen der Einfahrbereich, in dem sich der Verkehrsstrom der durchgehenden Hauptfahrbahn mit dem der Einfahrt verflechten muss.

Im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen – HBS wird die Kapazität von Einfahrbereichen (Qualitätsstufe E) als variabler Wert in Abhängigkeit von den Größen

- Verkehrsstärke auf der durchgehenden Hauptfahrbahn (stromaufwärts der Einfahrt),
- Verkehrsstärke in der Einfahrt,
- Anzahl Fahrstreifen auf der Richtungsfahrbahn,
- Einfahrtstyp,

angegeben. Dabei geht man grundsätzlich davon aus, dass mit steigender Verkehrsstärke in der Einfahrt, d. h. mit steigender Anzahl von Verflechtungsvorgängen, die Kapazität des Einfahrbereiches sinkt (Bild 7). Die Werte und insbesondere die Steigung der Regressionsgeraden sind bislang jedoch noch nicht umfassend durch entsprechende Daten gesichert.

In neueren Untersuchungen von DAMMANN et al. (2003) über den Verkehrsablauf an Knotenpunkten unter Dauerhochlast wird eine Modifikation der Verläufe der Regressionskurven vorgeschlagen, wobei aber auch hier auf Grund der Stichprobenumfänge in den empirischen Untersuchungen Einschränkun-

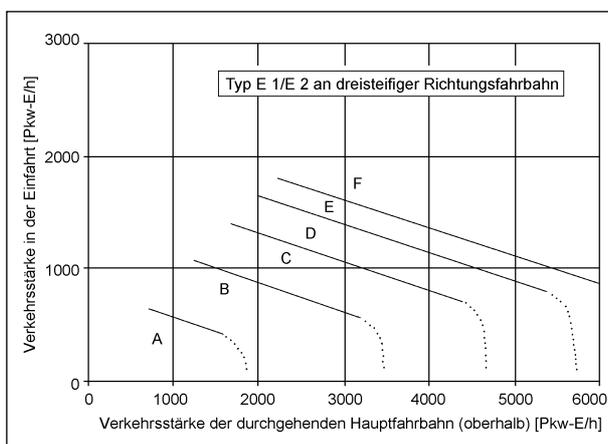


Bild 7: Beispiel für die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für die Einfahrtstypen E1 und E2 (FGSV, 2001)

gen in der Allgemeingültigkeit eingeräumt werden müssen.

Das Highway Capacity Manual – HCM definiert ähnlich wie das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen – HBS zwei maßgebende Kapazitäten, die Kapazität des stromabwärtigen freien Streckenabschnitts sowie die Kapazität des Einfahrbereiches. Der Einfahrbereich beinhaltet lediglich den Haupt- und den ersten Überholfahrstreifen (auf der Länge des Beschleunigungsstreifens), sodass für den Nachweis der Verkehrsqualität zuerst die maßgebende Verkehrsstärke auf diesen zwei Fahrstreifen V_{R12} zu ermitteln ist. Diese setzt sich aus der Einfahrverkehrsstärke V_R sowie der auf den zwei Fahrstreifen zufließenden Verkehrsstärke V_{12} zusammen.

Bei mehr als zwei Fahrstreifen auf der durchgehenden Hauptfahrbahn enthält das Highway Capacity Manual – HCM die entsprechenden Gleichungen für die Schätzung der Verkehrsstärke v_{12} . Die Kapazität des Einfahrbereiches wird unabhängig von der Stärke des einfahrenden Stromes zu 4.600 Pkw-E/h angenommen.

Der Ansatz eines konstanten Kapazitätswertes erscheint auf Grund der Ergebnisse aus den oben zitierten Untersuchungen, die eine eindeutige Variabilität der Kapazität im Einfädungsbereich feststellen, auf deutsche Verhältnisse nicht übertragbar.

In der Praxis ergeben sich in der Beurteilung des Verkehrsablaufs an Knoten zwei weitere Probleme:

- Die automatische Datenerfassung beschränkt sich – insbesondere bei Anschlussstellen – zum Teil nur auf die Richtungsfahrbahn. Daten über Einfädungsverkehrsstärken liegen häufig nicht vor.
- Informationen über die Knotengeometrie sind nur mit hohem Aufwand zu beschaffen. Darüber hinaus stellten DAMMANN et al. (2003) fest, dass ein nicht unerheblicher Anteil an Knoten nicht richtlinienkonform ausgebildet und deshalb die Anwendung eines standardisierten Verfahrens nicht möglich ist.

3.3.2 Ableitung eines modifizierten Verfahrens

Grundmodell

Auf Grund der großen Anzahl von Faktoren, die einen Einfluss auf die Kapazität eines Streckenabschnitts ausüben, und zur Sicherstellung der Ver-

gleichbarkeit mit den Ergebnissen aus dem FE-Vorhaben „Zeitverluste an Arbeitsstellen“ wird in Anlehnung an OBER-SUDERMEIER und OTTO (2003) ein Verfahren gewählt, bei dem die einzelnen Einflüsse in Form von Anpassungsfaktoren berücksichtigt werden. Ausgehend von einer fahrstreifenbezogenen Grundkapazität von 2.000 Pkw-E/h werden Anpassungsfaktoren für kapazitätsmindernde Einflüsse angesetzt. Aufbauend auf der Analyse im vorangegangenen Kapitel werden die in Tabelle 11 dargestellten Randbedingungen und die zugehörigen Anpassungsfaktoren berücksichtigt.

Die konstanten Anpassungsfaktoren sind so gewählt, dass sie mit den Ergebnissen aus dem vorangegangenen Kapitel – so weit möglich – konform sind. Im Rahmen des Verfahrens werden sie multiplikativ miteinander verknüpft. Zur Berücksichtigung von

- Schwerverkehr und Längsneigung,
- Störfällen (Unfälle und Pannen),
- Knoten,

werden variable Faktoren angesetzt. Da eine Modellierung dieser Einflüsse stark von der verfügbaren Datenbasis abhängt, werden vor diesem Hintergrund in den nachfolgenden Abschnitten Anpassungsfaktoren hergeleitet. Weiterhin wird auf die Modellierung von Umfeldbedingungen näher eingegangen.

Grundkapazität 2.000 Pkw-E/h/Fahrstreifen	Anpassungsfaktor
Capacity-Drop	$f_C = 0,95$
Fahrstreifenreduktion	$f_{FSR} = 0,95$
Schwerverkehr und Längsneigung	$f_{SV} = \text{var. (siehe Gl. 5)}$
Lage außerhalb von Ballungsräumen	$f_{BR} = 0,9$
Widrige Witterungsbedingungen	$f_W = 0,9$
Pannen	$f_P = \text{var. (siehe Tabelle 13)}$
Unfälle	$f_U = \text{var. (siehe Tabelle 14)}$
Tempolimit 100/80 in Ballungsräumen	$f_{T100} = 1,025$
Tempolimit 120 außerhalb von Ballungsräumen	$f_{T120} = 1/f_{BR} = 1,11$
Tempolimit 100/80 außerhalb von Ballungsräumen	$f_{T100,BR} = 1,025/f_{BR} = 1,14$
Streckenbeeinflussung	$f_{SBA} = 1,025$
Knoten	(siehe Gl. 13 und Gl. 14)

Tab. 11: Anpassungsfaktoren zur Korrektur der Grundkapazität bei unterschiedlichen Randbedingungen

Schwerverkehr und Längsneigung

In Anbetracht der in Kapitel 3.3.1 angestellten Überlegungen zur Rolle des Schwerverkehrs an Steigungen erscheint die Verknüpfung des Schwerverkehrs mit der Längsneigung nach wie vor sinnvoll, obwohl die Simulationen von BRESSLER (2001) davon abweichende Ergebnisse liefern. Die Grundlage zur Berücksichtigung des Einflusses des Schwerverkehrs und der Längsneigung auf die Kapazität bildet deshalb das bereits im FE-Vorhaben „Zeitverluste an Arbeitsstellen“ (OBER-SUNDERMEIER, OTTO, 2003) verwendete Modell von OBER-SUNDERMEIER (2003).

Als Datengrundlage für die Ermittlung eines für einen Streckenabschnitt repräsentativen Äquivalenzwertes sowie einer repräsentativen Längsneigung werden die Angaben aus der Zustandserfassung verwendet (siehe Kapitel 4.1). Die Zustandserfassung unterteilt das BAB-Netz querschnittsbezogen in äquidistante Teilabschnitte von 100 m Länge. Da mit dieser feinen Auflösung keine repräsentativen streckenabschnittsbezogenen Längsneigungsattribute erzeugt werden können, ist eine Zusammenfassung der 100-m-Abschnitte zu homogenen Teilabschnitten notwendig. Hierzu werden in einem ersten Schritt die 100-m-Abschnitte, die in den Längsneigungsintervallen $[-\infty; -5,5]$, $[-5,5; -4,5]$ usw. bis $[5,5; +\infty]$ liegen, aufaddiert. Die daraus resultierenden Teilabschnitte, die in jedem Fall größer als 100 m sind, werden dann entsprechend den Kriterien nach Tabelle 12 den Längsneigungsklassen „Steigungsstrecke“, „ebene Strecke“ oder „Gefällestrecke“ zugeordnet. Liegen innerhalb eines Streckenabschnittes mehrere Teilabschnitte einer Längsneigungsklasse hintereinander, so werden diese in einem weiteren Schritt über eine gewichtete Mittelbildung der Einzellängen zu einer repräsentativen Längsneigung zusammengefasst. Wechsel der Längsneigungsklassen über kurze Strecken werden zu Gunsten der überwiegend vorherrschenden Längsneigung vernachlässigt. Hierzu wird folgendes Kriterium eingeführt: Streckenabschnitte werden auch dann zusammengefasst, wenn zwischen zwei Steigungs- oder Gefällestrecken kurze ebene Strecken (< 500 m) liegen.

Bedingung	Längsneigungsklasse
$s \geq 1,5 \%$	Steigungsstrecke
$1,5 \% < s < -3,5 \%$	ebene Strecke
$s \leq -3,5 \%$	Gefällestrecke

Tab. 12: Grobklassifizierung von Längsneigungen

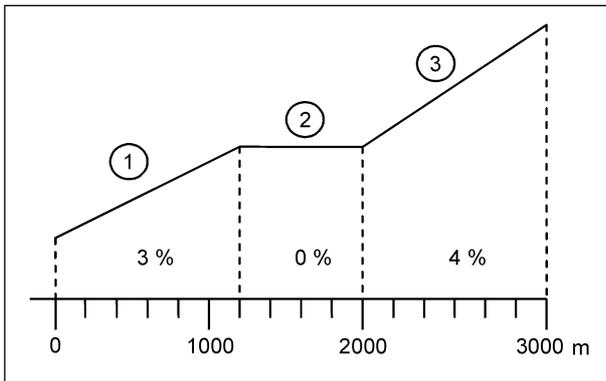


Bild 8: Beispielgradienten zur Zusammenfassung von Teilabschnitten

Nach Bild 8 werden demzufolge die Strecken 1, 2 und 3 auf Grund der Länge von Strecke 2 (800 m) nicht zusammengefasst und jeder Streckenabschnitt separat behandelt.

Der Pkw-Äquivalenzwert E wird nach Gl. 4 und der Reduktionsfaktor nach Gl. 5 berechnet. Grundsätzlich ist der ungünstigste (maximale) Äquivalenzwert innerhalb eines Streckenabschnittes maßgebend und wird auf den gesamten Streckenabschnitt übertragen.

Umfeldbedingungen

Zur Modellierung des Einflusses widriger Witterungsbedingungen, die auf Grund der Datenlage denselben Unsicherheiten unterliegt wie die Modellierung der Störfälle, wird auf das Verfahren von OBER-SUNDERMEIER und OTTO (2003) zurückgegriffen. Ausgehend von Erwartungswerten für die Häufigkeit und die Dauer von Niederschlagsereignissen kann eine überschlägige Schätzung durchgeführt werden, wobei auf Grund der berechneten Datenmenge davon auszugehen ist, dass einzelne Abweichungen gegenüber der Realität nicht zu einer systematischen Fehleinschätzung führen.

Für beide Parameter werden folgende Erwartungswerte angesetzt und mit einem Zufallsgenerator zugewiesen:

- durchschnittliche Häufigkeit: ≈0,37 pro Tag (etwa 135 Niederschlagsereignisse pro Jahr),
- durchschnittliche Dauer eines Niederschlagsereignisses: 2 Stunden.

Die Kapazitätsreduktion während eines Niederschlagsereignisses wird mit 0,9 angesetzt.

Störfälle (Pannen und Unfälle)

Die Modellierung des Einflusses von Störfällen wird auf der Basis der in Kapitel 3.3.1 diskutierten makroskopischen Ansätze vorgenommen. Als Grundformel zur Ermittlung der Anzahl von Störfällen während eines Zeitintervalls wird Gl. 6 verwendet (BRILON, ZURLINDEN, 2003). Da sich dieser Wert auch als Wahrscheinlichkeit eines Störfalles interpretieren lässt, kann mit Hilfe eines Zufallsgenerators einem Streckenabschnitt ein Störfall (Panne oder Unfall) zugewiesen werden.

Pannen

Die Pannensraten PR werden nach BÄUMER (2003) folgendermaßen festgelegt:

- $PR = 5,0 P/10^6$ Fz-km für BAB in Ballungsräumen,
- $PR = 3,75 P/10^6$ Fz-km für BAB außerhalb von Ballungsräumen.

Bei Pannen auf Streckenabschnitten ohne Seitenstreifen ist der Anteil verkehrsbehindernder Pannen VB nach Gl. 7 zu bestimmen. Da Pannen von Pkw und Lkw unterschiedliche Auswirkungen auf die Störfalldauer haben, ergibt sich für die Pannensraten auf Streckenabschnitten ohne Seitenstreifen PR* folgender Zusammenhang:

$$PR^* = PR \cdot VB \cdot \begin{cases} (1-SVA) & \text{(Pkw)} \\ SVA & \text{(Lkw)} \end{cases} \quad \text{Gl. 8}$$

mit:

VB: Anteil verkehrsbeh. Pannen

SVA: Schwerverkehrsanteil

Bei diesen Pannen fällt während der Pannendauer ein Fahrstreifen weg. Bei allen übrigen Pannen wird eine geringe Kapazitätsreduktion durch den sog. „Gaffer-Effekt“ angesetzt. Tabelle 13 fasst die zu Grunde gelegten Parameter noch einmal zusammen.

Panne/ Seitenstreifen	Dauer [Min.]	Kapazitätseinschränkung		
		2 FS	3 FS	4 FS
Pkw/ohne	20	0,35	0,49	0,58
Lkw/ohne	45	0,35	0,49	0,58
Pkw/mit	15	0,95	0,99	0,99
Lkw/mit	30	0,95	0,99	0,99

Tab. 13: Modellparameter für Pannendauer und Kapazitätseinschränkungen bei Pannen

Unfälle

Die Unfallraten werden – differenziert nach schweren und leichten Unfällen – verkehrsstärkeabhängig mit den Formeln nach PÖPPEL-DECKER und SCHEPERS (2003) ermittelt. Bei leichten Unfällen, für die PÖPPEL-DECKER und SCHEPERS (2003) keinen funktionalen Zusammenhang entwickelten, wird der charakteristische Verlauf der Funktion der „Unfälle mit Leichtverletzten“ herangezogen. Dabei wird unterstellt, dass bei niedrigen Verkehrsstärken und entsprechend hohen Geschwindigkeiten weniger Unfälle, aber schwerwiegende Unfallfolgen auftreten. Um die Unfallhäufigkeit näherungsweise den realen Verhältnissen anzupassen, werden die Gl. 10 und Gl. 12 um den Faktor 0,5 erhöht:

a) zweistreifige Richtungsfahrbahnen

$$UR_S = 0,5631 - 0,6291 \cdot \left(\frac{Kfz}{1000}\right) + 0,3049 \cdot \left(\frac{Kfz}{1000}\right)^2 - \dots - 0,0461 \cdot \left(\frac{Kfz}{1000}\right)^3 \quad \text{Gl. 9}$$

$$UR_l = 0,1838 - 0,1992 \cdot \left(\frac{Kfz}{1000}\right) + 0,1028 \cdot \left(\frac{Kfz}{1000}\right)^2 - \dots - 0,0148 \cdot \left(\frac{Kfz}{1000}\right)^3 + 0,5 \quad \text{Gl. 10}$$

b) dreistreifige Richtungsfahrbahnen

$$UR_S = 0,6055 - 0,4588 \cdot \left(\frac{Kfz}{1000}\right) + 0,1584 \cdot \left(\frac{Kfz}{1000}\right)^2 - \dots - 0,0176 \cdot \left(\frac{Kfz}{1000}\right)^3 \quad \text{Gl. 11}$$

$$UR_l = 0,1814 - 0,1367 \cdot \left(\frac{Kfz}{1000}\right) + 0,0541 \cdot \left(\frac{Kfz}{1000}\right)^2 - \dots - 0,0061 \cdot \left(\frac{Kfz}{1000}\right)^3 + 0,5 \quad \text{Gl. 12}$$

Die Modellparameter für die Dauer der Kapazitätseinschränkung sind in Tabelle 14 dargestellt.

Unfall	Dauer [Min.]	Kapazitätseinschränkung		
		2 FS	3 FS	4 FS
leicht	35	0,35	0,49	0,58
schwer	15 ¹ /45	0 ¹ /0,35	0 ¹ /0,49	0 ¹ /0,58

¹ Vollsperrung

Tab. 14: Modellparameter für Unfalldauer und Kapazitätseinschränkungen bei Unfällen

Bei schweren Unfällen wird generell zunächst von einer 15-minütigen Vollsperrung ausgegangen.

Knoten

Wie bereits in Kapitel 3.3.1 dargestellt, sind für den Verkehrsablauf im Übergang zwischen zwei Streckenabschnitten nicht nur die Kapazität des stromabwärtigen Streckenabschnitts, sondern auch die Kapazität des dazwischen liegenden Knotens – wenn nicht ein fiktiver Knoten vorliegt – und hier insbesondere die Kapazität des Einfahrbereiches von Bedeutung. Dabei stellen die Einfahrtstypen ohne Spuraddition E1, E2 nach dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen – HBS (FGSV, 2001) die wesentlichen Restriktionen dar. Die Kapazitätsreduktionseffekte des ohnehin selten auftretenden Einfahrtstyps E4 dagegen sind nicht eindeutig nachgewiesen und werden im Folgenden auch nicht weiter berücksichtigt.

Zur Modellierung des Einflusses von Knotenpunkten ist neben der Knotengeometrie die Information über die Einfädelungsverkehrsstärke eine entscheidende Eingangsgröße. Hohe Einfädelungsverkehrsstärken bewirken eine über die Addition der Ströme auf der Einfahrt und auf der Hauptfahrbahn (oberhalb) hinausgehende Reduktion der Kapazität. Diese tritt dann auf, wenn im Bereich der Kapazität das Verhältnis von Einfädelungsverkehrsstärke und der Summe aus Einfädelungsverkehrsstärke und Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn bestimmte Werte übersteigt. Im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen – HBS (FGSV, 2001) liegt dieser Wert bei idealen sonstigen Randbedingungen (SV-Anteil = 0, innerhalb eines Ballungsraums) für die Einfahrtstypen E1 und E2 bei etwa 25 %.

Da Informationen über Einfädelungsverkehrsstärken im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht vorliegen, muss der Einfluss von Knotenpunkten auf die Kapazität anderweitig abgeschätzt werden. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass nur hochbelastete Knoten Kapazitätseinschränkungen darstellen, wobei zwischen Anschlussstellen und Autobahnkreuzen und -dreiecken zu differenzieren ist.

In der Arbeit von ZACKOR et al. (2001) über „Strategien zur Verkehrssteuerung an hochbelasteten BAB-Anschlussstellen“, wurde die Zahl der (kritisch) hochbelasteten Anschlussstellen nach einer Umfrage im gesamten Bundesgebiet auf etwa 20 geschätzt. In jüngerer Zeit sind an hochbelasteten

Anschlussstellen Zuflussdosierungsanlagen installiert worden (Stand 2003: 31 Anlagen), die den negativen Einfluss der einfahrenden Fahrzeugpuls auf den Verkehrsablauf auf der Hauptfahrbahn entschärfen sollen. Auch im Bezugsjahr 2000 waren bereits einige der oben angesprochenen Anschlussstellen (z. B. auf der A 40) mit einer Zuflussdosierung ausgestattet. In Anbetracht der insgesamt geringen Zahl (weniger als 1 % aller Anschlussstellen) und des auch in Zukunft verstärkten Einsatzes von Zuflussdosierungsanlagen – in den nächsten Jahren wird mit 60 bis 70 weiteren Anlagen gerechnet – wird auf eine separate Modellierung hochbelasteter Anschlussstellen verzichtet. Die maßgebende Kapazität im Bereich von Anschlussstellen wird daher mit der Kapazität des stromabwärtigen Streckenabschnitts gleichgesetzt.

An Autobahnkreuzen und -dreiecken ist zunächst zwischen hoch- und weniger hochbelasteten Einfahrbereichen zu unterscheiden. Dabei wird angenommen, dass bei generell hoher Belastung auf dem stromabwärtigen Streckenabschnitt zu Spitzenzeiten auch mit hohen Anteilswerten der Einfädelungsverkehrsstärke gerechnet werden kann. Dies gilt insbesondere dann, wenn diese Knoten in engmaschigen Netzen von Ballungsräumen mit einer hohen Anzahl von Zielen liegen. Als Grenzwert wird ein DTV von größer als 40.000 Kfz/24h für einen 2-streifigen Streckenabschnitt und 60.000 Kfz/24 für einen 3-streifigen Streckenabschnitt angesetzt. Auf dieser Grundlage können insgesamt 52 Streckenabschnitte als hochbelastet eingeordnet werden. Sie liegen ausnahmslos innerhalb von Ballungsräumen. Ob in den Einfahrbereichen dieser Knoten auch kapazitätsmindernde Einfahrttypen (E1/E2) vorliegen, kann aus den Daten des Netzmodells für die Bundesfernstraßenplanung ermittelt werden. Da die Daten Implausibilitäten aufweisen können, empfiehlt es sich, im Einzelfall eine Überprüfung der Zuordnung anhand von Knotenlageplänen vorzunehmen. Im vorliegenden Projekt wird darauf verzichtet.

Die Modellierung der Grundkapazität im Einfahrbereich der Einfahrtstypen E1 und E2 (Grenze zwischen Stufe E und F) basiert dann auf folgenden im HBS angegebenen linearen Gleichungen (Gl. 13 und Gl. 14):

$$C_E = 2.360 - 0,248 \cdot Q_H \quad [\text{Pkw-E/h}] \quad \text{Gl. 13}$$

(für eine dreistreifige Richtungsfahrbahn)

$$C_E = 2.017 - 0,335 \cdot Q_H \quad [\text{Pkw-E/h}] \quad \text{Gl. 14}$$

(für eine zweistreifige Richtungsfahrbahn)

mit:

C_E : Kapazität des Einfahrbereichs (rechter Fahrstreifen)

q_H : Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn oberhalb des Einfädelungsbereiches

Zur Ermittlung der Kapazität auf der Richtungsfahrbahn ist noch die Grundkapazität von 2.000 Pkw-E/h des zweiten bzw. dritten Fahrstreifens zu addieren. Ist die so ermittelte Kapazität $C_{E,R}$ der Richtungsfahrbahn größer als die Kapazität C der freien Strecke unterhalb des Einfädelungsbereichs, so wird diese für die Staubrechnung maßgebend.

Eine grobe Abschätzung des Anteils k_E der Einfädelungsverkehrsstärke an der Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn unterhalb des Einfahrbereichs kann aus empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf an planfreien Knotenpunkten (z. B. HOFFMANN, 1999; DAMMANN et al., 2003) vorgenommen werden. Er wird für die hochbelasteten Einfahrbereiche zwischen 20 und 40 % geschätzt, wobei zur Berücksichtigung zufälliger Schwankungen eine Gleichverteilung zwischen diesen Grenzen angesetzt wird. Um unrealistisch große Sprünge zwischen zwei Zeitintervallen zu vermeiden, wird die maximale Änderung auf 5 % begrenzt. Mit Hilfe der Einfädelungsverkehrsstärke kann die zur Kapazitätsermittlung (Gl. 13 und Gl. 14) notwendige Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn oberhalb des Einfahrbereiches q_H ermittelt werden.

$$q_H = q \cdot (1 - k_E) \quad \text{Gl. 15}$$

Die dargestellte Methodik basiert im Wesentlichen auf Annahmen, die im Einzelfall mit hohen Unsicherheiten behaftet sein können. Dies betrifft im Besonderen die Schätzung der Einfädelungsverkehrsstärken im Knotenbereich. Nicht vollständig empirisch abgesichert sind aber auch die im HBS angegebenen Gleichungen zur Kapazitätsermittlung im Einfahrbereich. Aus diesen Gründen sind die aus separaten Kapazitätsbetrachtung an (hochbelasteten) Knoten resultierenden Ergebnisse lediglich als grobe Schätzung anzusehen.

3.4 Staumodellierung und Ermittlung der Reisezeitverluste

3.4.1 Grundlagen und vorhandene Ansätze

Stauungen sind als Störungen im Verkehrsablauf aufzufassen, die in der Regel dann auftreten, wenn die Verkehrsnachfrage die Kapazität einer Verkehrsanlage überschreitet. Unter den zahlreichen Verfahren zur Staumodellierung und zur Ermittlung von Reisezeitverlusten kommen für die vorliegende Aufgabenstellung unter der Berücksichtigung der vorhandenen Eingangsgrößen (Verkehrsstärke, Kapazität) vor allem zwei Ansätze, die Theorie der Dichtestoßwellen und die Warteschlangentheorie, in Frage.

Dichtestoßwellentheorie

Die von LIGHTHILL und WHITHAM (1955) auf den Verkehrsfluss übertragene Kontinuumstheorie betrachtet die Bewegung der Gesamtheit der Individualfahrzeuge als kontinuierliches Fließgeschehen. Nach der Kontinuumstheorie bilden sich beim Übergang vom Verkehrszustand 1 – charakterisiert durch die Verkehrsstärke q_1 und die Verkehrsdichte k_1 – zum Verkehrszustand 2 mit q_2 und k_2 Diskontinuitäten, so genannte Stoßwellen, deren Geschwindigkeit durch

$$u = \frac{q_2 - q_1}{k_2 - k_1} = \frac{\Delta q}{\Delta k} \quad \text{Gl. 16}$$

berechnet werden kann. Die Stoßwellengeschwindigkeit kann positiv oder negativ sein. Ist sie negativ, pflanzt sie sich als Stau stromaufwärts fort. Übertragen auf das Fundamentaldiagramm entspricht dies einer Sekante an der q - k -Kurve mit der Neigung u .

Der Zusammenhang nach Gl. 16 liegt auch dem von OBER-SUNDERMEIER (2003) in Anlehnung an ZACKOR (1976) entwickelten Modell zur Nachbildung der Stauentwicklung an einem Engpass zugrunde (Bild 9). Grundsätzlich ist wegen des stochastischen Charakters des Verkehrsflusses jeder Zustand des stabilen Verkehrsflusses mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit für einen Übergang in den instabilen Bereich behaftet. Diese Stauanfälligkeit nimmt mit steigender Dichte zu.

In dem Ansatz nach OBER-SUNDERMEIER (2003) wird jedoch vereinfachend davon ausgegangen, dass eine Staubildung erst eintritt, wenn die mittlere zufließende Verkehrsstärke die Kapazität eines

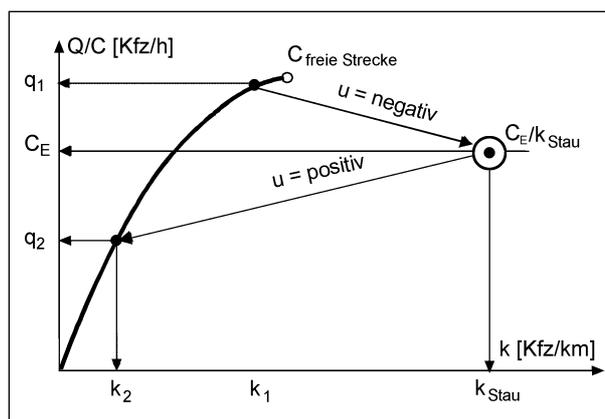


Bild 9: Stoßwellengeschwindigkeit zwischen benachbarten Verkehrszuständen im Fundamentaldiagramm (nach OBER-SUNDERMEIER, 2003; ZACKOR, 1976)

Streckenabschnittes überschreitet. Es handelt sich somit um eine deterministische Betrachtungsweise. Der Zustand Stau ist im Modell dadurch gekennzeichnet, dass die Kapazität des Engpasses zwar geringer als die des stromaufwärts liegenden Streckenabschnittes ist, aber in jedem Fall voll ausgenutzt wird. Die Verkehrsstärke im Stau entspricht somit der reduzierten Kapazität des Engpasses. Innerhalb des Staus herrscht ein instabiler Verkehrsfluss, gekennzeichnet durch kurzfristige Schwankungen zwischen stehender Kolonne und Stauauflösung.

Im Mittel ist dieser Stau durch eine hohe Verkehrsdichte k_{Stau} und eine geringe Geschwindigkeit v_{Stau} charakterisiert, wobei Streuungen dieser beiden Größen vernachlässigt werden. Dies führt dazu, dass der Zustand Stau in diesem Modell als einzelner Punkt im Fundamentaldiagramm abgebildet wird.

Dieses Modell wurde beispielsweise bei der Ermittlung von Reisezeitverlusten auf Grund von Arbeitsstellen (OBER-SUNDERMEIER, OTTO, 2003) angewendet. Die Verkehrsnachfrage wurde durch Ganglinien abgebildet (siehe Kapitel 3.2.1), sodass der Stauauf- und Stauabbau zeitlich und räumlich dargestellt werden können.

Zur Übertragung des Verfahrens auf die vorliegende Aufgabenstellung muss der Ort des Engpasses festgelegt werden (z. B. der Anfang eines Streckenabschnittes), da dieser außer bei Fahrstreifenreduktionen und Knoten auch innerhalb der freien Strecke liegen kann.

Warteschlangenmodelle

Eine weitere Möglichkeit zur Modellierung von Überlastungen an Knotenpunkten ist die Verwendung von Modellen aus der Warteschlangentheorie, mit denen durch Gegenüberstellung von Zufluss- und Abflusssummenlinien Verlustzeiten berechnet werden können.

Zu unterscheiden sind stochastische und deterministische Warteschlangenmodelle. Stochastische Warteschlangenmodelle bieten den Vorteil, dass bei ansonsten relativ einfachen Modellvoraussetzungen das stochastische Verhalten der Verkehrsnachfrage und der Kapazität gut abgebildet werden kann. Um ein aussagekräftiges und stabiles Ergebnis einer durchgeführten Reisezeitermittlung zu erhalten, ist allerdings die Durchführung mehrerer Simulationsläufe notwendig.

Im Gegensatz zu den stochastischen Warteschlangenmodellen werden bei den deterministischen Warteschlangenmodellen konstante Verkehrszustände für definierte Zeiträume angenommen, so dass wegen der Vernachlässigung des stochastischen Charakters des Verkehrsablaufs Stauungen erst auftreten, wenn die Zuflussrate $q(t)$ [Kfz/Zeit] größer als die Servicerate $s(t)$ (Kapazität eines Streckenabschnittes) ist. Durch die zeitliche und räumliche Diskretisierung des gestauten Verkehrsablaufs lässt sich die Stauentwicklung in einem einfachen mathematischen Modell abbilden. In Bild 10 sind dazu beispielhaft die deterministischen Annahmen eines stündlichen Zuflusses und Abflusses (Kapazität des Engpasses) unter Berücksichtigung

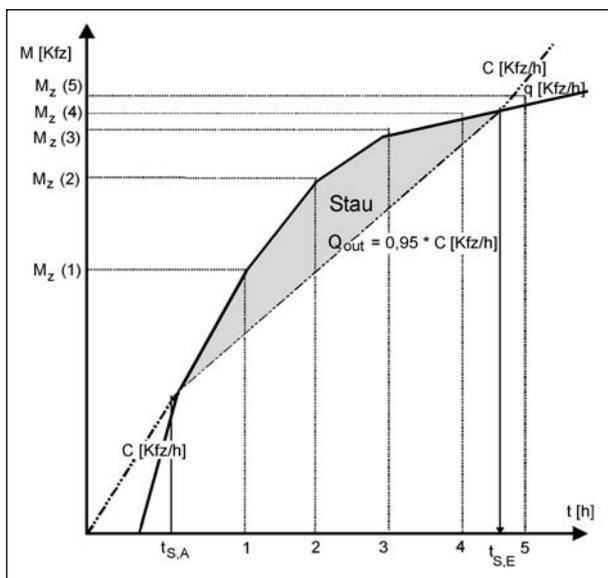


Bild 10: Deterministisches Wartezeitmodell

des Capacity Drops (Q_{out}) als Summenlinien aufgetragen.

Als Ergebnis einer Warteschlangenberechnung erhält man sowohl Wartezeiten der einzelnen Fahrzeuge als auch die Anzahl der wartenden Fahrzeuge in der Schlange. Um einen Aussage über die jeweiligen Rückstaulängen zu erhalten, muss die Anzahl der wartenden Fahrzeuge durch die Verkehrsdichte dividiert werden. Der Wert der Verkehrsdichte muss unabhängig von der Warteschlangenberechnung geschätzt oder aus empirischen Untersuchungen übernommen werden.

Die Gesamtreisezeitverluste, die sich durch die Überlastung des Streckenabschnitts ergeben (grau hinterlegt), berechnen sich dann wie folgt:

$$W = \int_{t_{S,A}}^{t_{S,E}} M_Z(t) dt - \int_{t_{S,A}}^{t_{S,E}} M_A(t) dt \quad \text{Gl. 17}$$

mit:

- W: Gesamtwartezeit aller Fahrzeuge im Stau
- M_Z : Anzahl der Fahrzeuge im Zufluss (definiert durch die Verkehrsnachfrage $q(i)$)
- M_A : Anzahl der Fahrzeuge im Abfluss (definiert durch die Verkehrsstärke Q_{out} ($0,95 \cdot C$) aus dem Stau heraus)
- $t_{S,A}$: Zeitpunkt des Staubeginns
- $t_{S,E}$: Zeitpunkt des Stauendes

Warteschlangenmodelle vernachlässigen im Gegensatz zur Stoßwellentheorie die räumliche Komponente (der Stau wird hier wie ein Fahrzeugstapel vor dem ortsfesten Engpass modelliert). Damit können keine Aussagen über die Verteilung der gestauten Fahrzeuge auf die Einfahrtrampen und die Hauptfahrbahn getroffen werden. Nachteilig wirkt sich zudem aus, dass auch eventuell auftretende Rückstauungen auf kreuzende Autobahnen nicht berücksichtigt werden können. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss man demnach beachten, dass die Verlustzeiten nicht zu 100 % auf dem betrachteten Streckenabschnitt anfallen.

3.4.2 Ableitung eines modifizierten Verfahrens

Als Berechnungsmodell zur Stauanachbildung und zur Verlustzeitermittlung sind unter Abwägung der Vor- und Nachteile prinzipiell beide in Kapitel 3.3.1 vorgestellten Ansätze geeignet. Um eine Vergleich-

barkeit der Ergebnisse mit dem Projekt „Quantifizierung von Reisezeitverlusten an Arbeitsstellen“ (OBER-SUNDERMEIER, OTTO, 2003) zu gewährleisten, wird das Modell basierend auf der Stoßwellentheorie nach LIGHTHILL und WHITHAM (1955) vorgezogen.

Grundmodell

Der stabile Bereich des Fundamentaldiagramms wird vereinfacht durch eine lineare Geschwindigkeit-Verkehrsdichte-Beziehung dargestellt, womit die Verkehrsstärke-Verkehrsdichte-Beziehung einen parabolischen Verlauf erhält (siehe Bild 9). Die Kapazität der freien Strecke C_F ist dabei kleiner als das rechnerische Maximum der Parabel, sodass Gl. 18 bis Gl. 21 für den Wertebereich $q = [0; C_F]$ gelten.

$$v(t_i) = v_f - b \cdot k(t_i) \quad \text{Gl. 18}$$

$$b = \frac{v_f - v_{\text{opt}}}{k_{\text{opt}}} \quad \text{mit} \quad k_{\text{opt}} = \frac{C_F}{v_{\text{opt}}} \quad \text{Gl. 19}$$

mit:

v_f : freie Geschwindigkeit bei $q \rightarrow 0$ (hier: 130 km/h, bzw. Tempolimit)

v_{opt} : Geschwindigkeit bei Erreichen der Kapazität (hier: 80 km/h)

k_{opt} : Verkehrsdichte bei Erreichen der Kapazität

b : Konstante

C_F : Kapazität der freien Strecke

Die Geschwindigkeit sowie die Verkehrsdichte im Zufluss berechnen sich anschließend in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke zu:

$$v(t_i) = \frac{v_f}{2} + \sqrt{\left(\frac{v_f}{2}\right)^2 - q(t_i) \cdot b} \quad \text{Gl. 20}$$

$$k(t_i) = \frac{q(t_i)}{v(t_i)} \quad \text{Gl. 21}$$

mit:

$q(t_i)$: Verkehrsstärke im Zufluss des Engpasses (freier Streckenabschnitt)

$v(t_i)$: zugehörige Geschwindigkeit auf dem freien Streckenabschnitt

$k(t_i)$: zugehörige Verkehrsdichte auf dem freien Streckenabschnitt

Da die Geschwindigkeit $v(t_i)$ einen Mittelwert zwischen Pkw- und Lkw-Geschwindigkeiten darstellt, wird sie für die weiteren Berechnungen nach folgendem Verfahren disaggregiert:

$$v_{\text{Pkw}}(t_i) = \frac{v(t_i) - v_{\text{Lkw}}(t_i) \cdot \text{SVA}(t_i)}{1 - \text{SVA}(t_i)} \quad \text{Gl. 22}$$

mit:

$v(t_i)$: durchschnittliche Kfz-Geschwindigkeit aus Fundamentaldiagramm

v_{Pkw} : durchschnittliche Pkw-Geschwindigkeit

v_{Lkw} : Lkw-Geschwindigkeit (hier festgelegt auf 80 km/h)

SVA: Schwerverkehrsanteil

Der zweite (instabile) Bereich beschreibt den Verkehrsablauf bei Stau vor dem Engpass mit:

C_E : Kapazität des Engpasses

k_{Stau} : durchschnittliche Dichte im Stau vor dem Engpass

v_{Stau} : durchschnittliche Geschwindigkeit im Stau

Die Kapazität des Engpasses wird entsprechend den Vorgaben aus Kapitel 3.3.2 angesetzt, wobei C_E je nach Typ des Engpasses (Engpass auf der freien Strecke, hochbelasteter Knoten, Unfall/Panne) anzusetzen ist.

Die Dichte im Stau ist sowohl von der Engpasskapazität als auch vom Verhältnis zwischen zufließender Verkehrsstärke und Engpasskapazität abhängig. Deutlich wird dieser Zusammenhang, wenn man beispielsweise die Verkehrsdichte im Stau bei einer Vollsperrung betrachtet. Hier verdichtet sich der Stau sehr stark, da keine Fahrzeuge aus dem Stau heraus abfließen können und die Geschwindigkeit im Stau somit null ist. Je größer dagegen die abfließende Verkehrsmenge bzw. je kleiner das Verhältnis von zufließender Verkehrsstärke zur Engpasskapazität ist, desto schneller bewegen sich die Fahrzeuge innerhalb des Staus, sodass die Verkehrsdichte abnimmt.

Im Rahmen dieser Untersuchung werden in Anlehnung an OBER-SUNDERMEIER und OTTO (2003) bei der Bestimmung der Dichte im Stau vereinfachend zwei Fälle unterschieden:

1. Der Stau wird ausschließlich durch eine Überlastung des Engpasses hervorgerufen, d. h., es ist eine Restkapazität vorhanden, sodass die Fahr-

zeuge im Stau mit einer Geschwindigkeit > 0 fahren können. Berechnet man für diesen Zustand das Verhältnis von Verkehrsnachfrage (Zufluss vor dem Engpass) zu Engpasskapazität, ergibt sich ein Wert > 1,0, jedoch im Regelfall < 2,0 (Erstversorgung: Verkehrsnachfrage doppelt so hoch wie die Kapazität). Tritt dieser Fall ein, wird die Verkehrsdichte im Stau auf 50 Kfz/(km · FS) festgelegt.

- Der Stau wird durch Unfälle oder Pannen und mit zusätzlichen Fahrstreifensperrungen bzw. Vollsperrung hervorgerufen. Das Verhältnis von Verkehrsnachfrage zu Kapazität ist sehr hoch (Erstversorgung für den Grenzwert: > 2,0). Die Geschwindigkeit im Stau wird dementsprechend sehr niedrig bzw. geht gegen null, sodass sich der Stau stark verdichtet und die Verkehrsdichte auf 100 Kfz/(km · FS) festgesetzt wird.

Staulängenberechnung

Durch die fehlenden Ausfädelungs- und Einfädelungsverkehrsstärken, aber auch durch die punktförmige Betrachtung von realen Knoten ergeben sich beim Übergang zwischen zwei Streckenabschnitten j-1 und j bei einem Verkehrsnachfragesprung Schwierigkeiten hinsichtlich der Staulängenberechnung, da eine eigentlich notwendige differenzierte Betrachtung für den Knotenbereich (Hauptfahrbahn, Ein- und Ausfahrten) nicht durchgeführt werden kann. Nachfolgend soll diese Problematik verdeutlicht und ein einfacher Lösungsansatz vorgestellt werden.

Berücksichtigt man, dass an hochbelasteten Einfahrbereichen separate Kapazitäten ermittelt wer-

den (siehe Kapitel 3.3.2), ist für die Staubetrachtung konsequenterweise der Anfang eines Streckenabschnitts maßgebend.

Unter Berücksichtigung der verfügbaren Verkehrsnachfragewerte sind grundsätzlich Belastungskonstellationen gemäß Tabelle 15 möglich, die in Bild 11 mit konkreten Werten belegt sind.

Zunächst werden die in Gl. 23 und Gl. 24 dargestellten Bedingungen der Verkehrsstärke und der Staulänge geprüft:

$$q_j(t_i) > C_j(t_i) \tag{Gl. 23}$$

$$L_{S_{-1}}(t_{iE}) > 0 \tag{Gl. 24}$$

Ist die erste Bedingung erfüllt, hat sich im Zeitintervall i ein Stau gebildet, bei Erfüllung der zweiten Bedingung ist bereits ein Stau auf j-1 vorhanden.

Die Kapazität wird dann entsprechend dem Capacity-Drop-Phänomen (siehe Tabelle 11) auf

$$C_{j,CD}(t_i) = 0,95 \cdot C(t_i) \tag{Gl. 25}$$

abgemindert. Verkehrsnachfragesprünge beim Übergang zwischen zwei Streckenabschnitten werden über eine Differenzenbildung von stromabwärt-

Belastungsfall 1	$q_j \wedge q_{j-1} < C_j$
Belastungsfall 2	$q_j < C_j \wedge q_{j-1} > C_j$
Belastungsfall 3	$q_j \wedge q_{j-1} > C_j$
Belastungsfall 4	$q_j > C_j \wedge q_{j-1} < C_j$

Tab. 15: Belastungskonstellationen im Bereich von Knoten

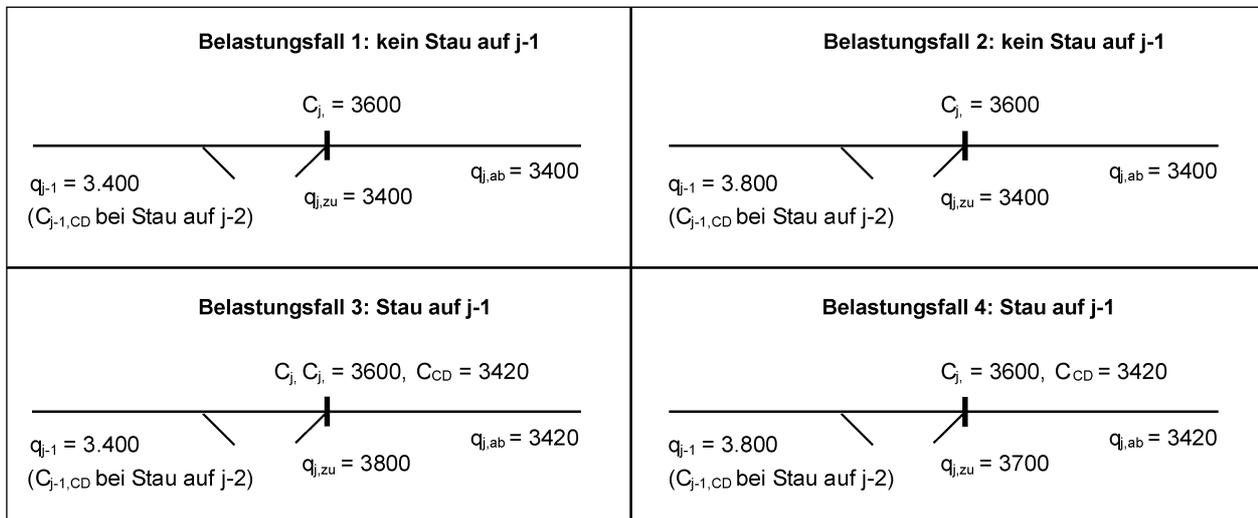


Bild 11: Mögliche Belastungskonstellationen auf der Richtungsfahrbahn

tiger und stromaufwärtiger Verkehrsstärke modelliert:

$$\Delta q(t_i) = q_j(t_i) - q_{j-1}(t_i) \quad \text{Gl. 26}$$

Ist $\Delta q(t_{i,E}) > 0$, fahren Fahrzeuge ein; im Belastungsfall 3 sind dies 400 Kfz/h. Im Belastungsfall 4 ist $\Delta q(t_{i,E}) < 0$, d. h., es fahren keine Fahrzeuge ein, dafür fahren 100 Kfz/h aus.

Die auf dem Streckenabschnitt j-1 im Stau abwickelbare Verkehrsstärke ergibt sich dann zu:

$$q_{j-1,\text{Stau}}(t_i) = C_{j,\text{CD}} - \Delta q(t_i) \quad \text{Gl. 27}$$

Für den Belastungsfall 3 sind dies unter der Annahme, dass der Einfädelungsverkehr vollständig auf die Richtungsfahrbahn drängt (siehe Kapitel 2), 3.020 Kfz/h. Im Belastungsfall 4 können auf dem Streckenabschnitt j-1 im Stau 3.520 Kfz/h abgewickelt werden.

Bei Überlastungen eines Streckenabschnitts wird die Verkehrsnachfrage des stromabwärtigen Streckenabschnitts entsprechend Gl. 25 im Zeitintervall i unter Berücksichtigung des Capacity-Drop-Phänomens durch den Abfluss bei Kapazität ersetzt:

$$q(t_i) = C_{\text{CD}}(t_i) \quad \text{Gl. 28}$$

Für die Belastungsfälle 3 und 4 in Bild 11 bedeutet dies, dass die Verkehrsnachfrage auf dem Streckenabschnitt j während des Staus auf j-1 jeweils auf 3.420 Kfz/h gesetzt wird.

Besteht im Abschnitt j-2 im selben Zeitintervall t_i ebenfalls ein Stau, d. h., ist $q_{j-1} > C_{j-1}$ bzw. $L_{S,j-2} > 0$, so wird auch auf dem Streckenabschnitt j-1 die Verkehrsnachfrage $q_{j-1} = C_{j-1,\text{CD}}$ gesetzt.

Die Geschwindigkeit im Abfluss v_{Abfluss} bei Stau nach Gl. 20 liegt geringfügig über der optimalen Geschwindigkeit v_{opt} von 80 km/h, da durch den Capacity Drop die Kapazität nur zu 95 % ausgenutzt wird.

Zur Berechnung der Staulänge ergibt sich folgende Gleichung:

$$L_{S,j-1}(t_{i,E}) = - \frac{q_{j-1}(t_i) - C_{j,\text{CD}}(t_i) + \Delta q(t_i)}{k_{j-1}(t_i) - k_{\text{Stau}}} \cdot \dots \cdot (t_{i,E} - t_{i-1,E}) + L_{S,j-1}(t_{i,E}) \quad \text{Gl. 29}$$

mit:

$t_{i..n}$: betrachtetes Zeitintervall

$t_{i..n,E}$: Ende des betrachteten Zeitintervalls

$L_S(t_i)$: Staulänge

$q(t_i)$: Zuflussverkehrsstärke (innerhalb des Intervalls $[t_i - t_i]$ konstant)

$k(t_i)$: Verkehrsdichte im Zufluss

k_{Stau} : durchschnittliche Dichte im Stau (50 bzw. 100 Kfz/km)

C_{CD} : Kapazität des Engpasses nach Capacity Drop

Die Geschwindigkeit im Stau errechnet sich als Quotient aus der Verkehrsstärke im Stau nach Gl. 27 und der Verkehrsdichte im Stau:

$$v_{\text{Stau}}(t_i) = \frac{q_{j-1,\text{Stau}}(t_i)}{k_{\text{Stau}}(t_i)} \quad \text{Gl. 30}$$

Störfälle – Unfälle und Nothalte

Ab dem Zeitpunkt der Wiederherstellung der vollen Kapazität nach einer unfall- oder pannenbedingten Fahrstreifensperrung entsteht im Gegensatz zu dauerhaften Engpässen an der Staufront eine weitere Dichtestoßwelle, die sich in der Regel mit einer höheren Geschwindigkeit stromaufwärts bewegt und auf die erste Dichtestoßwelle trifft (Bild 12).

Für die beiden Zustände ($t_{\text{Störfall}}$, $t_{\text{Auflösung}}$) sind dementsprechend auch unterschiedliche Formeln zur Berechnung der Staulänge zu verwenden. Während der Störfalldauer wird Gl. 29 angesetzt. Die Kapazität entspricht der um einen Fahrstreifen reduzierten Kapazität oder der Kapazität bei Vollsperrung (= 0 Kfz/h).

Während der Stauauflösung ist bei der Ermittlung der Staulänge die Differenz zwischen der ersten und der zweiten Dichtestoßwelle nach folgender Formel zu berücksichtigen (Gl. 31):

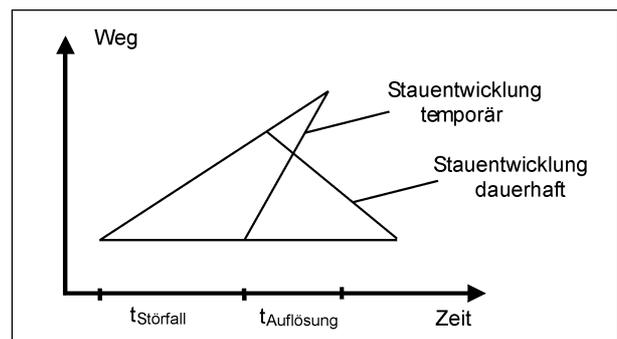


Bild 12: Staubildung bei temporären und dauerhaften Kapazitätsengpässen

$$L_{S, j-1}(t_{i, E}) = \left(-\frac{q_{j-1}(t_i) - C_{j, CD, FSR} + \Delta q}{k_{j-1}(t_i) - k_{Stau}} + \dots + \frac{C_{j, CD, FSR} - C_{j, CD}}{k_{Stau} - k_{opt}} \right) \cdot (t_{i, E} - t_{i-1, E}) + L_{S, j-1}(t_{i-1, E}) \quad \text{Gl. 31}$$

mit:

- $t_{i...n}$: betrachtetes Zeitintervall
- $t_{i...n, E}$: Ende des betrachteten Zeitintervalls
- $L_S(t_i)$: Staulänge
- $q(t_i)$: Zuflussverkehrsstärke (innerhalb des Intervalls $[t_i - t_{i-1}]$ konstant)
- Δq : Differenz zwischen der Verkehrsstärken auf den Streckenabschnitten j und $j-1$
- $k(t_i)$: Verkehrsdichte im ungestörten Zufluss
- k_{Stau} : durchschnittliche Dichte im Stau
- k_{opt} : Verkehrsdichte bei Erreichen der Kapazität
- $C_{j, CD, FSR}$: Kapazität des stromabwärtigen Engpasses bei Fahrstreifenreduktion nach Capacity Drop
- $C_{j, CD}$: Kapazität des Gesamtquerschnitts der stromabwärtigen Strecke nach Capacity Drop (entspricht der Verkehrsstärke bei Abfluss)

Einschränkend ist hinzuzufügen, dass Gl. 31 nur dann Anwendung findet, wenn die Verkehrsnachfrage nach Wiederherstellung der vollen Kapazität der Richtungsfahrbahn unter diesem Wert liegt. Übersteigt in den nachfolgenden Intervallen der Stauberechnung die Verkehrsnachfrage die Kapazität der Richtungsfahrbahn, wird ab diesem Zeitpunkt wieder Gl. 29 für die Stauberechnung maßgebend.

Berechnung der Verlustzeiten

Die Ergebnisse der Verlustzeitberechnung sollen so ausgegeben werden, dass eine volkswirtschaftliche Bewertung ermöglicht wird. Hierzu wird nach folgenden Grundsätzen vorgegangen:

- Die aufgetretenen Zeitverluste sind als Summe über alle Fahrzeuge sowie über die gesamte Staudauer auszuweisen.
- Auf Grund der unterschiedlichen Zeitkosten müssen die Reisezeitverluste getrennt nach

	$v_{Ref, Pkw}$	$v_{Ref, Lkw}$
Nutzer	130 bzw. Tempolimit	80
Betreiber	80	80

Tab. 16: Referenzgeschwindigkeiten aus Nutzer- und Betreibersicht

Pkw und Lkw ermittelt werden, wobei bei den Pkw zusätzlich nach Werktagen und Wochenenden/Feiertagen zu differenzieren ist.

- Zusätzlich ist zu klären, welche Referenzgeschwindigkeit v_{Ref} der Berechnung der Reisezeitverluste zugrunde gelegt werden soll. Dabei muss zwischen zwei unterschiedlichen Betrachtungsebenen unterschieden werden. Aus Sicht der Straßennutzer kann die Richtgeschwindigkeit bzw. ein angeordnetes Tempolimit ohne Berücksichtigung von Einschränkungen durch die aktuellen Verkehrsbelastungen als Referenz herangezogen werden. Aus Sicht des Systembetreibers stellt die Referenzgeschwindigkeit v_{Ref} eine Größe dar, die in Abhängigkeit von der jeweiligen Aufgabenstellung zu definieren ist und eine Mindestqualität des Verkehrsflusses (dichter Verkehr ohne Stau) unterstellt. Vor diesem Hintergrund werden zur Erstversorgung Werte gemäß Tabelle 16 verwendet.

Um systematische Fehler zu vermeiden, ist bei der Berechnung der Verlustzeiten auf einem Streckenabschnitt j zwischen zwei Fällen zu unterscheiden:

1. Der Wert $L_S(t_{i, E})$ ist positiv, d. h., am Ende des berechneten Zeitintervalls besteht der Stau noch, wobei am Ende des letzten Zeitintervalls (t_{i-1}) die Staulänge entweder null oder größer Null war (erste oder mittlere Staustunde).
2. Der Wert $L_S(t_{i, E})$ ist null bzw. negativ (und wird zu null gesetzt), d. h., der Stau wurde innerhalb der betrachteten Stunde abgebaut. Der Anteil der Stauzeit an der gesamten berechneten Stunde ergibt sich dann aus dem Faktor $f_{Stauende}$ mit (Gl. 32):

$$f_{Stauende} = \frac{L_S(t_{i-1, E})}{\frac{\Delta q(t_i)}{\Delta k(t_i)} \cdot (t_{i, E} - t_{i-1, E})} \quad \text{Gl. 32}$$

Die Berechnung der Verlustzeiten wird jeweils für Pkw und Lkw getrennt durchgeführt. Die Verlustzeit eines Fahrzeugs (Pkw bzw. Lkw), das zum Zeitpunkt $t_{i, E}$ (Ende eines Zeitintervalls) in den Stau hineinfährt, ergibt sich für die beiden Fälle 1 und 2 zu:

$$t_{W,Stau}(t_{i,E}) = L_S(t_{i,E}) \cdot \left(\frac{1}{v_{Stau}} - \frac{1}{v_{Ref}} \right) \quad \text{Gl. 33}$$

mit:

$t_{W,Stau}(t_{i,E})$: Verlustzeit am Ende der Staustunde i (differenziert nach Pkw und Lkw)

v_{Ref} : zugrunde gelegte Referenzgeschwindigkeit (siehe oben)

Die mittlere Verlustzeit pro Stunde, die für die Berechnung der Summe der Verlustzeiten innerhalb einer Stunde benötigt wird, berechnet sich für Pkw bzw. Lkw folgendermaßen (Fall 1: Gl. 34; Fall 2: Gl. 35):

$$\bar{t}_{W,Stau}(t_i) = \frac{t_{W,Stau}(t_{i-1,E}) + t_{W,Stau}(t_{i,E})}{2} \quad \text{Gl. 34}$$

$$\bar{t}_{W,Stau}(t_i) = \frac{t_{W,Stau}(t_{i-1,E}) + t_{W,Stau}(t_{i,E})}{2} \cdot f_{Stauende} \quad \text{Gl. 35}$$

mit:

$\bar{t}_{W,Stau}(t_i)$ mittlere Verlustzeit pro Stunde

Anhand der mittleren Verlustzeit lässt sich daraufhin die Summe der Verlustzeiten pro Stunde getrennt nach Pkw und Lkw ermitteln:

$$\sum \bar{t}_{W,Stau}(t_i) = \bar{t}_{W,Stau}(t_i) \cdot q(t_i) \quad \text{Gl. 36}$$

mit:

$q(t_i)$: Verkehrsstärke im Zufluss, differenziert nach Pkw und Lkw

Verlustzeitberechnung bei Vollsperrungen durch schwere Unfälle

Bei schweren Unfällen – bedingt durch die zunächst angesetzte Vollsperrung des Fahrbahnquerschnitts – wird die Geschwindigkeit im Stau null. Da in diesem Fall die Berechnung der Verlustzeit nach Gl. 33 nicht möglich ist (theoretisch steigen die Verlustzeiten für ein einzelnes Fahrzeug damit ins Unendliche), wird hier die Wartezeit vereinfachend mit einem deterministischen Wartezeitmodell ermittelt.

Die Warteschlange am Ende eines Zeitintervalls berechnet sich zunächst zu:

$$M_S(t_{i,E}) = M_S(t_{i-1,E}) + (q(t_i) - C_E) \quad \text{Gl. 37}$$

mit:

$t_{i...n}$: betrachtetes Zeitintervall

$t_{i...n,E}$: Ende des betrachteten Zeitintervalls

M_S : Warteschlange (Anzahl Kfz)

q : Zuflussverkehrsstärke

C_E : Verkehrsstärke im Abfluss (Kapazität des Engpasses)

Dementsprechend ergibt sich die mittlere Warteschlange \bar{M}_S einer Stunde nach Gl. 38 zu:

$$\bar{M}_S(t_{i,E}) = M_S(t_{i-1,E}) + \frac{1}{2} \cdot (q(t_i) - C_E) \quad \text{Gl. 38}$$

Wird der Stau innerhalb der Stunde aufgelöst, berechnet sich die mittlere Warteschlange folgendermaßen (Gl. 39):

$$\bar{M}_S(t_{i,E}) = M_S(t_{i-1,E}) \cdot \frac{t_{i,E}}{2} = \frac{M_S(t_{i-1,E})^2}{|q(t_i) - C_E| \cdot 2} \quad \text{Gl. 39}$$

mit:

\bar{M}_S mittlere Warteschlangen der Kraftfahrzeuge

Basierend auf der mittleren Anzahl der vor dem Engpass wartenden Fahrzeuge kann die Gesamt-wartezeit pro Zeitintervall i berechnet werden:

$$t_W(t_i) = \bar{M}_S(t_{i,E}) \cdot (t_i - t_{i-1}) \quad \text{Gl. 40}$$

mit:

t_W : Wartezeit aller Kraftfahrzeuge im Stau

Bei schweren Unfällen wird die Verlustzeit nur während der Dauer der Vollsperrung mit dem Wartezeitmodell ermittelt.

Die Staulänge wird auch während der Vollsperrung mit dem Modell nach der Dichtestoßwellentheorie berechnet.

Verlustzeitberechnung im Abfluss bei Stau

Zusätzlich kann für beide Fahrzeugarten die Verlustzeit berechnet werden, die aus der im Vergleich zur ungestörten Strecke geringeren Geschwindigkeit im Abfluss bei Stau resultiert. Für ein Fahrzeug beträgt diese:

$$t_{w,Abfluss}(t_i) = l_j \cdot \left(\frac{1}{v_{Abfluss}} - \frac{1}{v_R} \right) \quad \text{Gl. 41}$$

Die Summe der Verlustzeiten auf Grund der reduzierten Geschwindigkeit im Abfluss ergibt sich anschließend zu:

$$\sum t_{W,Abfluss}(t_i) = t_{W,Abfluss}(t_i) \cdot q(t_i) \quad \text{Gl. 42}$$

wobei für $q(t_i)$ die Kapazität bei Abfluss $C_{j,CD}$ einzusetzen ist.

4 Datenbasis

4.1 Datenquellen

Als wesentliches Ziel – neben der eigentlichen Quantifizierung der staubedingten Reisezeitverluste – hat sich im Verlauf der Projektbearbeitung die Schaffung einer einheitlichen Datenbasis aus den verschiedenen zur Verfügung stehenden Datenquellen herauskristallisiert. Sie ist auch die notwendige Voraussetzung für eine optimale Versorgung des Simulationsprogramms mit den berechnungsrelevanten Daten. Hierzu werden die relevanten Informationen aus unterschiedlichen Datenquellen zusammengeführt und in einer BAB-Datenbank zusammengefasst (siehe Kapitel 4.2). Der Stand der nachfolgend kurz beschriebenen Datenquellen ist – wenn nicht anders angegeben – das Bezugsjahr 2000.

Autobahnverzeichnis – AVERZ

Im AVERZ sind Knotenpunkte – Autobahnkreuze und -dreiecke (AK, AD) und Anschlussstellen (AS) – mit Angabe der Betriebskilometrierung und der Nummer in der wegweisenden („blauen“) Beschilderung richtungsbezogen nach dem Streckenverlauf der Autobahn dargestellt. Die Bezeichnung der Knoten entspricht dem Fernstraßengesetz (BMVBW, 2001).

Bundesinformationssystem Straße – BISStra

Im Rahmen des Projektes wird ein Auszug aus dem BISStra verwendet, der das Autobahnnetz querschnittsbezogen in Streckenabschnitte – begrenzt durch Autobahnknoten – unterteilt. Neben „normalen“ Knoten (AK, AD und AS) werden im BISStra auch Landesgrenzen, Betriebskilometrierungssprünge und Änderungen der Stationierungsrichtung als Abschnittsgrenzen behandelt. Der Streckenverlauf ist nicht kontinuierlich, sondern durch Richtungswechsel bei Änderungen der Stationierungsrichtung gekennzeichnet. Den Knoten sind die Netzknotennummern entsprechend der Anweisung Straßeninformationsbank – ASB (BMVBW, 2001a) zugewiesen. Die Knotennummer wird dabei

unter Einbezug der Lage des Knotens in einem topografischen Kartenblatt (TK-Nummer) vergeben. Weiterhin werden den Knoten Namen, die Betriebskilometrierung und Koordinaten im Gauss-Krüger-Koordinatensystem zugeordnet.

Zustandserfassung des BAB-Netzes

Die Zustandserfassung unterteilt das Autobahnnetz auf zwei Ebenen. Zunächst wird eine Unterteilung von Knoten zu Knoten (AK, AD oder AS) vorgenommen, wobei die Knotencodierung nach der ASB erfolgt. Diese Streckenabschnitte werden dann nochmals in äquidistante Abschnitte von 100 m Länge unterteilt. Für jeden 100-m-Abschnitt liegen Informationen über die Trassierungsparameter – insbesondere die Anzahl der Fahrstreifen und die Längsneigung – sowie über die Betriebskilometrierung vor.

Netzmodell für die Bundesfernstraßenplanung – NEMOBFStr (BVWP)

Das NEMOBFStr unterteilt das Autobahnnetz ebenfalls in durch Knoten begrenzte Abschnitte. Neben „normalen“ Knoten werden Streckenabschnitte zusätzlich bei einer Änderung der Fahrstreifenanzahl und einer Änderung der Steuerungsbedingungen (Tempolimit) unterteilt. Die Knotencodierung erfolgt nach der ASB, wobei bei einem Teil der Knoten – insbesondere bei allen zusätzlichen Knoten – von der offiziellen Nummernzuordnung abgewichen wird. Das NEMOBFStr enthält daneben auch Angaben zur Länge eines Abschnitts.

Straßenverkehrszählung – SVZ

Die im 5-Jahresrhythmus manuell und im Jahr 2000 zuletzt durchgeführte SVZ auf Bundesfernstraßen ordnet jedem durch AK, AD oder AS begrenzten Streckenabschnitt charakteristische Verkehrsnachfragekenngrößen, insbesondere den durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV) und den Schwerverkehrsanteil (SVA), zu (LENSING, 2003).

Auswertung der automatischen Dauerzählstellen auf Bundesfernstraßen – DZSt

Auf Außerortsstraßen liegt ein systematisch ausgebautes Netz von Dauerzählstellen vor, dessen Daten jährlich aufbereitet und ausgewertet werden. Aus den aufbereiteten Daten werden zum einen die Verkehrsnachfragekennwerte der SVZ fortgeschrieben und zum anderen typisierte relative Ganglinien

der Verkehrsstärke mit unterschiedlichem zeitlichem Bezug jedem Zählabschnitt die Verkehrsstärkeganglinientypen (Woche, Tag, Stunde) nach PIN-KOFSKY zugeordnet (LAFFONT et al., 2002).

Neben den genannten in digitaler Form systematisiert vorliegenden Datenquellen werden zur Versorgung einiger Datenbankattribute Informationen verarbeitet, die aus Befragungen und eigenen Einschätzungen resultieren.

4.2 Datenmodell der BAB-Datenbank

4.2.1 Überblick

Die BAB-Datenbank ist als relationale Datenbank konzipiert und in zwei Tabellen aufgesplittet. Die Grundtabelle ist eine Abschnittstabelle, in der das

Autobahnnetz – begrenzt durch Knoten – richtungsbezogen in Streckenabschnitte entsprechend den Vorgaben aus Kapitel 2 unterteilt ist. Informationen zu den Knoten sind in einer eigenen Knotentabelle ausgelagert. Die BAB-Datenbank enthält über die zur Simulation notwendigen Daten hinaus weitere Informationen und ist so aufgebaut, dass sie als Basis-Informationssystem auch für andere Problemstellungen geeignet ist.

In Tabelle 17 und in Tabelle 18 sind die Struktur der Datenbank sowie die jedem Streckenabschnitt bzw. Knoten zugeordneten Attribute zusammengefasst und deren Datenquellen dargestellt. Enthalten mehrere Datenquellen dasselbe Attribut, so wird die hinsichtlich ihrer Qualität und Vollständigkeit am höchsten eingeschätzte Quelle verwendet. Sie wird in der Spalte „Quelle“ zuerst genannt. Die weiteren

Attribut	Beschreibung	Quelle
BAB	Autobahnnummer	AVERZ
Ri	Richtung des Streckenverlaufs	AVERZ
A-Nr	Fortlaufende Nummer des Streckenabschnitts	manuell vergeben
Str-Grenze	Abschnittsbeginn/-ende einer zusammenhängenden Strecke	AVERZ
K1-Nr	Knotennummer des Knotens am Abschnittsbeginn	Schlüsselattribut aus Knotentabelle
K2-Nr	Knotennummer des Knotens am Abschnittsende	Schlüsselattribut aus Knotentabelle
K1-km	Betriebskilometrierung von K1	Zustand, AVERZ, NEMOBFStr
K2-km	Betriebskilometrierung von K2	Zustand, AVERZ, NEMOBFStr
Laenge	Länge des Streckenabschnitts [km]	aus K1-km und K2-km berechnet
FS	Fahrstreifenanzahl	NEMOBFStr
LNP	maßgebliche Längsneigung im Streckenabschnitt [%]	Zustand, manuell aufbereitet
LNL	Länge der maßgeblichen Längsneigungsstrecke [km]	Zustand, manuell aufbereitet
AEQ	Pkw-Äquivalenzwert der maßgeblichen Längsneigungsstrecke	Zustand, manuell aufbereitet
LNP_Max	maximale Längsneigung im Streckenabschnitt [%]	Zustand, manuell aufbereitet
v_zul	Höhe der maßgebenden Geschwindigkeitsbegrenzung [km/h]	NEMOBFStr
Anteil_vzul	Anteil des Streckenabschnitts mit Tempolimit gesamt [%]	NEMOBFStr, manuell zugeordnet
Anteil_T60	Anteil des Streckenabschnitts mit Tempolimit 60 [%]	NEMOBFStr, manuell zugeordnet
Anteil_T80	Anteil des Streckenabschnitts mit Tempolimit 80 [%]	NEMOBFStr, manuell zugeordnet
Anteil_T100	Anteil des Streckenabschnitts mit Tempolimit 100 [%]	NEMOBFStr, manuell zugeordnet
Anteil_T120	Anteil des Streckenabschnitts mit Tempolimit 120 [%]	NEMOBFStr, manuell zugeordnet
Anteil_130	Anteil des Streckenabschnitts mit Richtgeschwindigkeit [%]	NEMOBFStr, manuell zugeordnet
Str_beeinfl	Abschnitt mit Streckenbeeinflussungsanlage	Befragung BMVBW
Seit_mitb	Abschnitt mit Seitensteifenmitbenutzung	Befragung BAST
Ballungsraum	Abschnitt innerhalb eines Ballungsraums	nach eigenen Kriterien manuell vergeben
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr [Kfz/24h]	SVZ 2000, Fortschreibung 2001
SV-Anteil	Schwerverkehrsanteil am DTV [%]	SVZ 2000, Fortschreibung 2001
hoch_bel_SA	Streckenabschnitt mit hoch belastetem Einfahrbereich	manuell zugeordnet
DZ-Nr	Nummer der zugeordneten Dauerzählstelle nach BAST	Schlüssel zur Gangliniendatenbank
DZ-Bereich	tatsächliche Lage der Dauerzählstelle	DZSt 2000 und 2001
DZ-Ri	Erfassungsrichtung der Dauerzählstelle (Abgleich mit Ri)	DZSt 2000 und 2001, manuell zugeordnet
MZ	Nummer der Zählstelle aus der Straßenverkehrszählung	Schlüssel zur SVZ

Tab. 17: Grundstruktur der BAB-Datenbank – Abschnittstabelle

Attribut	Beschreibung	Quelle
K-Nr	Knotennummer des Knotens	BISStra, Zustand, NEMOBFStr (Schlüsselattribut)
K-Typ	Knotentyp: AS, AK, AD, AN, BG, BKMS, FS	AVERZ, NEMOBFStr
K-Name	Knotenname nach Bundesfernstraßengesetz	AVERZ
AVERZ-Nr	Nummer des Knotens auf der wegweisenden Beschilderung	AVERZ
AVERZ -Nr2	weitere Knotennummern bei AK und AD	AVERZ
x-koor	Koordinatenrechtswert des Knotens nach Gauss-Krüger	BISStra, NEMOBFStr
y-koor	Koordinatenhochwert des Knotens nach Gauss-Krüger	BISStra, NEMOBFStr
NK-BISStra	Knotennummer im BISStra	Schlüssel zum BISStra
NK-Zustand	Knotennummer in der Zustandserfassung	Schlüssel zur Zustandserfassung
NK-BVWP	Knotennummer im NEMOBFStr	Schlüssel zum NEMOBFStr
Land	Bundeslandzugehörigkeit des Knotens	BISStra
BAB-Nr	Autobahnnummer (bei AK und AD mehrere)	AVERZ, Zustand, NEMOBFStr

Tab. 18: Grundstruktur der BAB-Datenbank – Knotentabelle

aufgeführten Datenquellen werden zur Vervollständigung bei fehlenden Attributen herangezogen.

Auf Grund der Heterogenität der in den Datenquellen verwendeten Modelle zur Darstellung des Autobahnnetzes und der teilweise widersprüchlichen Angaben zur Lage der Netzelemente ist das Zusammenführen der verschiedenen Attribute in einem Datensatz nahezu ausschließlich nur manuell möglich. Um dennoch eine möglichst einfache Pflege und Fortschreibung zu gewährleisten, ist die Datenbank über charakteristische Attribute, die als Schlüssel dienen, an die Datenquellen angebunden. Die wesentlichen Inhalte der Datenbank werden nachfolgend näher beschrieben. Detailliertere Erläuterungen zur BAB-Datenbank enthält Anlage 1.

4.2.2 Daten zur Lage der Netzelemente

Daten zu den Netzelementen sind im Wesentlichen Attribute, die die Knoten nach ihrer geografischen Lage im Netz und die Strecken zwischen den Knoten nach ihrem Verlauf beschreiben. Für die Knoten wird eine einheitliche Codierung mit Hilfe einer Knotennummer vorgenommen. Diese Knotennummer entspricht bei realen Knoten (i. W. AS, AK, AD) der offiziellen ASB-Nummer, bei fiktiven Knoten am Übergang von Fahrstreifenänderungen einer inoffiziellen, im Rahmen des NEMOBFStr vergebenen Nummer und dient zugleich als Primärschlüssel zwischen der Abschnittstabelle und der Knotentabelle.

Einer Knotennummer sind in der Knotentabelle der Knotenname, der Knotentyp (AS, AK etc.), die Nummern aus der wegweisenden Beschilderung,

die Koordinaten und die Bundeslandzugehörigkeit zugeordnet. Die Betriebskilometrierung der Knoten wird in der Abschnittstabelle aufgeführt, da dieses Attribut bei Autobahnkreuzen oder -dreiecken je nach Autobahn mehrmals vorhanden ist. Neben der Betriebskilometrierung wird den Strecken eine Richtung im Streckenverlauf und eine Länge – berechnet aus der Betriebskilometrierung der angrenzenden Knoten – zugewiesen.

4.2.3 Daten zur Verkehrsnachfrage

Die zur Berechnung der Reisezeitverluste notwendigen Verkehrsnachfragedaten sind durch den in Kapitel 3.2.2 beschriebenen, auf kollektiven typisierten Ganglinien basierenden Modellierungsansatz (PINKOFSKY, 2003) vorgegeben.

Zu diesem Zweck werden jedem Streckenabschnitt in der Abschnittstabelle folgende Daten zugeordnet:

- richtungsbezogene durchschnittliche tägliche Verkehrsmenge (DTV) aus der SVZ 2000,
- Schwerverkehrsanteil SVA aus der SVZ 2000 und aus der Fortschreibung 2001,
- Dauerzählstelle aus den Auswertungen der DZSt 2000 und 2001.

Bei fehlenden DTV- oder/und SVA-Werten wird zwischen den benachbarten Werten linear interpoliert. Als Schlüsselattribut zu den Daten aus der Straßenverkehrszählung dient die Zählstellenummer. Da die von PINKOFSKY (2003) ermittelten Ganglinientypen ausschließlich Dauerzählstellen, nicht jedoch den Streckenabschnitten zugeordnet sind, wird jedem Streckenabschnitt manuell eine re-

präsentative Dauerzählstelle zugeordnet (siehe Kapitel 3.2.2).

Für die den Dauerzählstellen zugeordneten typisierten Ganglinien wird eine eigene Gangliniendatenbank vorgehalten. Sie enthält aus der Auswertung der Dauerzählstellen in den Jahren 2000 und 2001:

- Jahres-, Wochen- und Tagesanteilstwerte (einschließlich der Maximalstunden) der Verkehrsstärken,
- Zuordnung der Dauerzählstellen zu Jahres-, Wochen- und Tagesganglinientypen.

Die Gangliniendatenbank ist über die Dauerzählstellenummer (Schlüsselattribut) an die Abschnittstabelle der BAB-Datenbank angebunden.

4.2.4 Daten zur Kapazität/streckenbezogene Daten

Die Schätzung der Kapazität eines Streckenabschnittes geht, wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, von einer Grundkapazität aus, die mittels Faktoren näherungsweise an die tatsächlichen Strecken- und Verkehrsverhältnisse angepasst wird. Folgende Informationen werden zur Kapazitätsermittlung herangezogen:

- Fahrstreifenanzahl aus dem NEMOBFStr,
- Abschnitte mit Tempolimit aus dem NEMOBFStr,
- Abschnitte mit Streckenbeeinflussungsanlage (Grundlage: Anfrage BMVBW),
- offline berechnete repräsentative Längsneigungsattribute aus den Daten der Zustandserfassung (maßgebliche Längsneigung, Pkw-Äquivalenzwert),
- Lage innerhalb/außerhalb eines Ballungsraums (manuell vergeben).

Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Längsneigungsattribute ist in Kapitel 3.3.2 beschrieben.

5 Simulation

Zur Simulation des Verkehrsablaufs und zur Ermittlung der Reisezeitverluste für das Bezugsjahr 2000 wird das Programm QuantKap (Quantifizierung von Reisezeitverlustzeiten durch Kapazitätsengpässe) eingesetzt. In QuantKap sind die in Kapitel 3 dar-

gestellten methodischen Grundlagen softwaremäßig umgesetzt.

QuantKap berechnet die Nachfrage-, Kapazitäts- und Stauentwicklung in beliebigen Intervallen im Bereich von 1 Minute bis 1 Stunde. Die Intervalllänge muss vor Start des Programms festgelegt werden. Für die vorliegende Aufgabe ergibt sich aus der Bereitstellung der Eingangsdaten zur Dauer der Kapazitätsreduktion bei Unfällen und Nothalten ein Simulationszeitschritt von 5 min (siehe Kapitel 3.3.2).

QuantKap prognostiziert die Stauentwicklung an beliebig vielen Streckenabschnitten über ein oder mehrere Jahre hinweg. Die Verlustzeiten werden differenziert nach Fahrzeugart (Pkw, Lkw) und nach Verkehrszusammensetzung (werktags, sonntags) als Differenz zu einer festzulegenden Referenzgeschwindigkeit ausgegeben.

QuantKap ist weitgehend interaktiv steuerbar. Die wesentlichen Eigenschaften der aktuell bearbeiteten Streckenabschnitte bezüglich Verkehrsnachfrage, Kapazität und Lage im Netz können während der Simulation auf der Programmoberfläche in Tabellenform angezeigt werden. Der aus der Gegenüberstellung von aktueller Verkehrsnachfrage und Kapazität modellierte Verkehrsablauf einschließlich der Stauentwicklung des jeweiligen Berechnungstags kann auf zwei Chart-Diagrammen mit verfolgt werden. Zwischenergebnisse sind während des Berechnungsverlaufs auf der Programmoberfläche tabellarisch aufbereitet verfügbar. Die Berechnung kann jederzeit in ihrer Geschwindigkeit gedrosselt, unterbrochen und wieder fortgesetzt werden.

Die Berechnungsmodule des Programms QuantKap verarbeiten eine erhebliche Anzahl von Daten über das BAB-Netz (siehe Kapitel 4). Um dieses Datenvolumen sinnvoll zu gliedern und nachvollziehbar berechnen zu können, wird eine objektorientierte Modellstruktur gewählt (Bild 13). Die einzelnen Objekte speichern dabei eine Teilmenge aus den für eine Berechnung benötigten Daten in ihren Eigenschaften.

Eine ausführliche Dokumentation der Software, ihrer Module und internen Abläufe beinhaltet Anlage 2.

Um eine ausreichende Stabilität der Ergebnisse im Hinblick auf die stochastischen Komponenten der Modellierung der Verkehrsnachfrage, der Witterungsbedingungen und der Unfälle/Nothalte zu gewährleisten, wird jeder Simulationslauf für die als

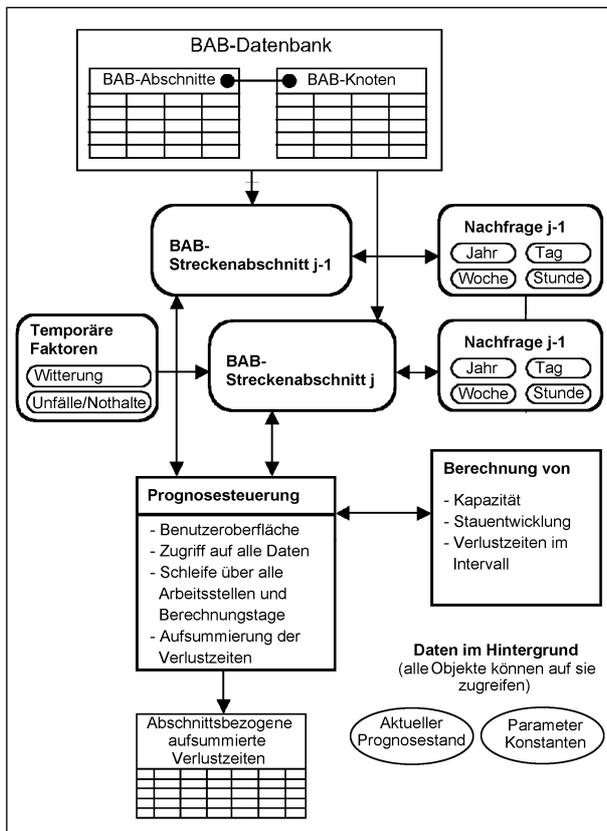


Bild 13: Objektstruktur des Programms QuantKap

Endergebnisse ausgewiesenen Reisezeitverluste dreifach durchgeführt. Diese Anzahl erscheint bei einer Variationsbreite der relativen Abweichungen von -1,03 % bis +1,04 % vom jeweiligen Erwartungswert bei 12 Simulationsläufen in 4 Ergebniskategorien als ausreichend. Die dargestellten Ergebniswerte repräsentieren jeweils den Mittelwert dieser Durchläufe.

Auf eine dreifache Simulation im Rahmen der Sensitivitätsanalysen wird verzichtet, da hier nicht absolute Zahlenwerte, sondern lediglich die relativen Tendenzen und Größenordnungen des Einflusses der Veränderung einzelner Eingangsdaten und Berechnungsmodelle abgeleitet werden sollen.

Einen detaillierten Simulationsplan mit den jeweils verwendeten Parametersätzen enthält Anlage 3.

Der Zeitaufwand eines ganzjährigen Simulationslaufs für das Gesamtnetz unter der Berücksichtigung aller beschriebenen Ansätze und Einflussfaktoren ist bei 4.752 Streckenabschnitten und ca. 105.000 Berechnungsintervallen bei einer PC-Konfiguration nach heutigem Stand der Technik mit etwa 25 Stunden anzusetzen.

6 Berechnungsergebnisse

6.1 Gesamtbetrachtung für das Bundesgebiet

Nachfolgend sind die Ergebnisse der jährlichen Verlustzeitberechnung auf Grund von infrastrukturbedingten Kapazitätsengpässen für das Bezugsjahr 2000 dargestellt.

Die hierzu durchgeführten Simulationsläufe schließen neben nachfragebedingten Überlastungssituationen auf der freien Strecke folgende Engpässe ein:

- Fahrstreifenreduktionen,
- Abschnitte mit hoher Längsneigung und hohem Schwerverkehrsanteil,
- Einfädelungsbereiche an hochbelasteten Knoten,
- Niederschlagsereignisse,
- Unfälle,
- Nothalte.

Auf Grund unterschiedlicher Bewertungsansätze der Zeitkosten werden die Ergebnisse differenziert nach unterschiedlichen Fahrzeuggruppen (Pkw/Lkw) sowie unterschiedlichen Zeitbereichen (Fahrzweckgruppen; Werktag/Sonn- und Feiertage) ausgewiesen.

Eine weitere Unterscheidung erfolgt hinsichtlich der zu Grunde gelegten Referenzgeschwindigkeit v_{Ref} : Aus Sicht der Straßennutzer wird die Richtgeschwindigkeit von 130 km/h bzw. ein vorhandenes Tempolimit als Referenzgeschwindigkeit angesetzt. Aus Sicht des Systembetreibers werden die Simulationsläufe mit einer Referenzgeschwindigkeit von $v_{\text{Ref}} = 80$ km/h durchgeführt.

Tabelle 19 enthält die Ergebnisse der Berechnung der Reisezeitverluste für das gesamte Autobahnnetz differenziert nach:

- Fahrzeugart (Pkw, Lkw),
- Fahrzweck (Werktag, Sonn- und Feiertage),
- Referenzgeschwindigkeit (130 km/h bzw. Tempolimit; 80 km/h).

Differenzierte Berechnungsergebnisse für alle Streckenabschnitte sind in einer separaten Daten-CD beigefügt.

		Referenzgeschwindigkeit			
		130 km/h		80 km/h	
Zeitverluste durch Stau [Mio. h] bzw. [%]	Pkw Werktage	125,7	87,0 %	114,8	86,1 %
	Pkw Sonn-/Feiertage	4,6	3,2 %	4,4	3,3 %
	Lkw	14,1	9,8 %	14,1	10,6 %
Summe [Mio. h] bzw. [%]		144,4	100,0 %	133,3	100,0 %

Tab. 19: Ergebnisse der Verlustzeitberechnung für das Gesamtnetz

		Referenzgeschwindigkeit	
		130 km/h	80 km/h
Zeitverluste durch Stau [Mio. h]	Pkw Werktage	43,2	44,1
	Pkw Sonn-/Feiertage	3,3	3,3
	Lkw	6,4	6,4
Summe [Mio. h]		52,9	53,8

Tab. 20: Ergebnisse der Verlustzeitberechnung für das Gesamtnetz – Unfälle und Nothalte

Bei Zugrundelegung einer Referenzgeschwindigkeit von 130 km/h ergeben sich Reisezeitverluste für alle Fahrzeugarten und Fahrtzweckgruppen in Höhe von 144,4 Mio. Stunden. Geht man bei der Berechnung der Reisezeitverluste von einer Referenzgeschwindigkeit von 80 km/h aus, ergibt sich bei einem Wert von 133,3 Millionen Stunden eine Differenz von 11,1 Mio. Stunden. Zurückzuführen ist die relativ geringe Veränderung vor allem auf die Tatsache, dass Streckenabschnitte mit hohen Zeitverlusten in Ballungsräumen bereits mit Tempolimits belegt sind und diese als Referenzgeschwindigkeit angesetzt werden. Der weitaus überwiegende Anteil an den Gesamtzeitverlusten entfällt auf die Fahrzeuggruppe Pkw im Werktagsverkehr mit 87 % bei $v_{\text{Ref}} = 130 \text{ km/h}$ bzw. 86,1 % bei $v_{\text{Ref}} = 80 \text{ km/h}$. Da in beiden Fällen als Referenzgeschwindigkeit für Lkw 80 km/h maßgebend ist, hängen die Ergebnisse bei dieser Fahrzeuggruppe nicht von der Referenzgeschwindigkeit ab. Ihr Anteil an den Gesamtzeitverlusten liegt mit 14,1 Mio. Stunden bei etwa 10 %. Bei Zugrundelegung dieses Wertes und unter Berücksichtigung der Zeitverluste an Arbeitsstellen kann das Geschwindigkeitsniveau von Lkw auf etwa 75 km/h abgeschätzt werden. Knapp über 3 % der Reisezeitverluste fallen an Sonn- und Feiertagen (nur Pkw) an.

Der Anteil der unfall- und nothaltbedingten Reisezeitverluste an den Gesamtreisezeitverlusten ist in Tabelle 20 dargestellt. Dabei können die Reisezeitverluste fast ausschließlich den unfallbedingten Störfällen zugewiesen werden, da für Nothalte eine uneingeschränkte Nothaltmöglichkeit außerhalb

der Fahrbahn und damit keine Fahrstreifenreduktionen angesetzt werden (siehe Kapitel 7.6.2).

Bei einer Referenzgeschwindigkeit von 130 km/h beträgt der Anteil der unfallbedingten Reisezeitverluste bei einer Verlustzeitsumme von 52,9 Mio. Stunden etwa 37 % an den Gesamtreisezeitverlusten. Der Anteilswert beträgt bei einer Referenzgeschwindigkeit von 80 km/h etwa 40 % (53,8 Mio. Stunden).

Ein Vergleich der Ergebnisse in Tabelle 20 macht deutlich, dass die tatsächlichen Erwartungswerte für die stochastische Größe „Zeitverluste durch Unfälle“ nicht getroffen werden (der Erwartungswert für die Verlustzeiten bei einer Referenzgeschwindigkeit von 80 km/h liegt real unter dem Erwartungswert für die Verlustzeiten bei einer Referenzgeschwindigkeit von 130 km/h). Hierzu wäre eine wesentlich höhere Anzahl an Berechnungsläufen notwendig gewesen. Da die vorliegenden Berechnungsergebnisse vermuten lassen, dass die Wahl der Referenzgeschwindigkeit hier einen marginalen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse hat, wurde hierauf aus Aufwandsgründen verzichtet.

6.2 Streckenabschnittsbezogene Betrachtung

Eine weitere Fragestellung, die sich aus der Untersuchung der berechneten Reisezeitverluste ergibt, zielt auf die Anteile einzelner Streckenabschnitte an den Gesamtreisezeitverlusten ab. Zur Darstellung der Konzentration der Reisezeitverluste auf be-

stimmte Streckenabschnitte werden Lorenzkurven erstellt, anhand derer auf einfache Weise die prozentualen Anteile der Zeitverluste sowie der jeweils zugehörige Anteil der Streckenabschnitte abgelesen werden können. Der zusätzlich ermittelte Konzentrations-Koeffizient gibt Aufschluss über das Maß der Konzentration.

In Bild 14 sind die Lorenzkurven für die Referenzgeschwindigkeit von 130 km/h sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung von Unfällen dargestellt. Die Konzentrations-Koeffizienten von 0,847 (Bild 14, links) und 0,934 (Bild 14, rechts) zeigen, dass sich die Reisezeitverluste grundsätzlich auf eine relativ geringe Anzahl von Streckenabschnitten konzentrieren. Der Konzentrationseffekt verstärkt sich bei einer Nichtberücksichtigung von Unfällen deutlich, da Unfälle und daraus resultierende Fahrstreifenreduktionen auch auf sonst kaum oder nicht überlasteten Streckenabschnitten größere Verlustzeiten verursachen. Deutlich wird dieser Zusammenhang dadurch, dass ohne Unfälle 72,3 %, mit Unfällen lediglich 8,7 % überlastungsfrei sind.

Bei einer Berücksichtigung von Unfällen treten 50 % der jährlichen Reisezeitverluste an 3,3 % der Streckenabschnitte auf. Auf eine streckenabschnittsbezogene Ausweisung der Ergebnisse wird an dieser Stelle verzichtet, da diese Werte insbesondere unter Berücksichtigung folgender Aspekte lediglich als grobe Schätzung anzusehen sind:

- Alle anfallenden Reisezeitverluste vor einem Engpass werden dem nächsten stromaufwärts

liegenden Streckenabschnitt zugewiesen. In der Realität ist – insbesondere bei den Streckenabschnitten mit sehr hohen Verlustzeiten – davon auszugehen, dass ein Teil der ermittelten Reisezeitverluste an weiteren stromaufwärtigen Abschnitten anfällt.

- Fehler in den Primärdatenquellen, vor allem hinsichtlich des stark kapazitätsrelevanten Attributs Fahrstreifenanzahl, können im Einzelfall zu hohen Abweichungen führen.
- Auf Grund des Fehlens von Knotengeometrien und Einfädelungsverkehrsstärken an kapazitätsreduzierenden Knoten basiert die Methodik der Kapazitätsschätzung auf der Grundlage des HBS (FGVS, 2001) im Wesentlichen auf Annahmen, die im Einzelfall mit hohen Unsicherheiten behaftet sein können.
- Staus, die sich möglicherweise auf den Einfahrampen bilden, werden vollständig der Richtungsfahrbahn zugewiesen.

7 Sensitivitätsuntersuchungen

7.1 Vorbemerkungen

Die Ermittlung der in Kapitel 6 dargestellten Reisezeitverluste infolge von infrastrukturbedingten Kapazitätsengpässen im deutschen Autobahnnetz basiert auf einer großen Anzahl von Eingangsdaten. Diese Eingangsdaten sind entweder durch die je-

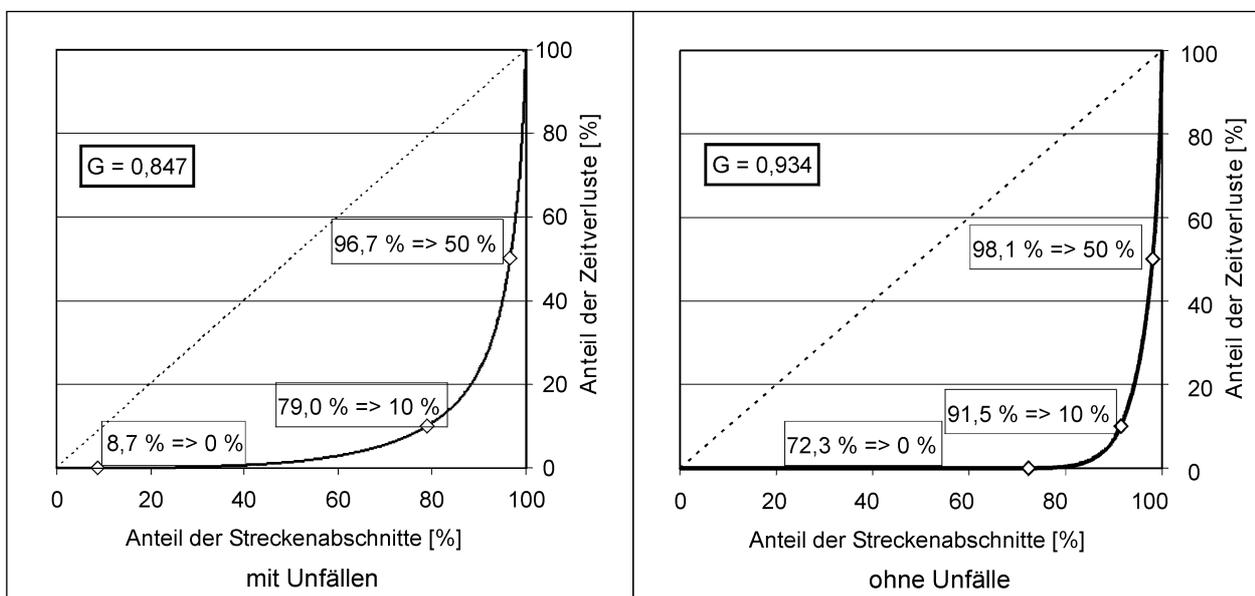


Bild 14: Konzentration der Reisezeitverluste auf Streckenabschnitte mit und ohne Berücksichtigung von Unfällen – $v_{\text{Ref}} = 130 \text{ km/h}$

weils verwendete Datenbasis festgelegt, oder sie sind in Form von Parametern Bestandteil der eingesetzten Modelle zur Ermittlung der Verkehrsnachfrage und der Kapazität sowie zur Modellierung der Stauentwicklung. Jede Änderung eines oder mehrerer Parameter zieht in mehr oder weniger ausgeprägter Form eine Veränderung der Gesamtergebnisse nach sich. Ziel der folgenden Analysen soll es daher sein, die Stabilität der Berechnungsergebnisse hinsichtlich der Veränderung einzelner Eingangsdaten zu bestimmen.

Zur Erhöhung der Signifikanz der untersuchten Einflüsse wird der jeweilige Referenzfall ohne die stochastisch modellierten und in den Ergebnissen streuenden externen Einflüsse Unfälle/Nothalte und Witterung simuliert. Als Referenzgeschwindigkeit wird $v_{\text{Ref}} = 130 \text{ km/h}$ angesetzt. Differenzierte Berechnungsergebnisse sind auf einer separaten Daten-CD verfügbar.

Weiterhin wird – sofern eine Vergleichbarkeit gegeben ist – eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen aus der Quantifizierung staubedingter Reisezeitverluste durch Arbeitsstellen nach OBER-SUNDERMEIER und OTTO (2003) vorgenommen.

7.2 Verkehrsnachfrage

7.2.1 DTV und Schwerverkehrsanteil

Die durchschnittliche tägliche Verkehrsmenge (DTV) sowie der zugehörige Schwerverkehrsanteil bilden die Grundlage für die Ermittlung der Verkehrsnachfrage. Beide Attribute sind den Streckenabschnitten direkt zugeordnet. Sie stellen in beiden Fällen die Hochrechnungsergebnisse der manuellen Straßenverkehrszählung dar.

		DTV	DTV + 10 %	DTV – 10 %
Zeitverluste durch Stau	Pkw Werktage	1,00	2,33	0,18
	Pkw Sonn-/Feiertage	-	-	-
	Lkw	1,00	2,80	0,18
Gesamt		1,00	2,36	0,18

Tab. 21: Einfluss eines über- bzw. unterschätzten DTV auf die Verlustzeiten (Beispielrechnung für 1 Streckenabschnitt)

		TG-Typ E17	TG-Typ F17
Zeitverluste durch Stau	Pkw Werktage	1,00	2,39
	Pkw Sonn-/Feiertage	-	-
	Lkw	1,00	2,10
Gesamt		1,00	2,37

Tab. 22: Einfluss der Zuordnung von Ganglinientypen zu Streckenabschnitten auf die Verlustzeiten (Beispielrechnung für 1 Streckenabschnitt)

Grundsätzlich kann die fehlerhafte oder ungenaue Angabe des DTV-Wertes oder des Schwerverkehrsanteils im Einzelfall zu einer Über- oder Unterschätzung der jeweiligen Reisezeitverluste führen.

An dem in Tabelle 21 dargestellten Beispiel eines relativ hochbelasteten 3-streifigen Streckenabschnitts (DTV = 62.500 Kfz/24h) wird dieser Zusammenhang besonders deutlich.

Bei einer systematischen Erhöhung des DTV um 10 % steigen hier die Verlustzeiten auf das 2,36-fache gegenüber der Basisvariante, eine Reduzierung um 10 % zieht eine Verringerung der Verlustzeiten von über 80 % nach sich.

Das Beispiel zeigt auch, dass vor allem Streckenabschnitte, die bereits an der Kapazitätsgrenze belastet oder überlastet sind, sehr sensitiv auf eine Über- oder Unterschätzung des DTV reagieren.

7.2.2 Wahl des Ganglinientyps

Die Modellierung der Verkehrsnachfrage hängt neben der zuverlässigen Schätzung des DTV in entscheidendem Maß von der Zuordnung der Wochen- und Tagesganglinientypen und der daraus resultierenden Disaggregation in Wochen-, Tages-, und Stundenwerte ab. Da nicht für jeden Streckenabschnitt repräsentative Dauerzählstellen vorliegen, werden Dauerzählstellen und korrespondierende Ganglinientypen manuell auf benachbarte Streckenabschnitte übertragen (siehe Kapitel 3.2.2).

Im Folgenden soll anhand eines Beispiels dargestellt werden, welchen Einfluss eine alternative Zuordnung eines Ganglinientyps auf die Reisezeitverluste hat. Zu diesem Zweck wird ein Streckenabschnitt ausgewählt, der an den Wochentagen Mon-

tag bis Freitag eine deutlich ausgeprägte Nachfragespitze in den Nachmittagsstunden aufweist (Ganglinientyp E18 – Spitzenstunde: 17-18 Uhr). In einer Vergleichsrechnung wird ein Ganglinientyp mit einer noch stärkeren Nachmittagsspitze verwendet (Ganglinientyp F18 – Spitzenstunde 17-18 Uhr).

Tabelle 22 zeigt, dass die mit einer Verstärkung der Nachfragespitze einhergehende zeitliche Konzentration zu einer deutlichen Erhöhung der Reisezeitverluste (Faktor 2,37) führt.

Für eine analoge Ganglinientypersetzung (F statt E) an einem Streckenabschnitt vor einer Arbeitsstelle längerer Dauer ermittelte OBER-SUNDERMEIER und OTTO (2003) mit einem Faktor von 2 eine ähnliche relative Abweichung.

7.2.3 Modellierung stochastischer Schwankungen

Da die auf der Basis des DTV-Wertes mittels Ganglinien disaggregierten Verkehrsnachfragewerte lediglich mittlere Erwartungswerte darstellen, wird eine stochastische Komponente eingeführt, die mit einer Normalverteilung bei einem Variationskoeffizienten von $V = 5\%$ eine weitere Disaggregation und eine realitätsnahe Schwankungsbreite der stündlichen Verkehrsmengen erzeugt (siehe Kapitel 3.2.2).

Zur Analyse des Einflusses der stochastischen Schwankungen der Verkehrsnachfrage werden weitere Simulationsläufe ohne stochastische Komponente bzw. mit einem höheren Variationskoeffizienten ($V = 10\%$) durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen für das Gesamtnetz zeigen, dass erwartungsgemäß mit höherem Variationskoeffizienten auch die berechneten Reisezeitverluste steigen, während eine Vernachlässigung stochastischer Schwankungen eine Reduktion der Verlustzeiten bewirkt (Tabelle 23).

Erkennbar ist darüber hinaus, dass bei einer linearen Erhöhung des Variationskoeffizienten die Verlustzeiten überproportional ansteigen. Im Vergleich zur Modifizierung des Variationskoeffizienten bei der Nachfragemodellierung im Rahmen der Quantifizierung staubedingter Reisezeitverluste an Arbeitsstellen, bei der die Variationsbreite der Abweichungen für den entsprechenden Vergleichsfall zwischen 0,99 ($V = 10\%$) und 1,04 ($V = 0\%$) liegt, ist der Einfluss bei infrastrukturbedingten Engpässen etwas höher. Mit ein Grund dafür könnte sein, dass die Verkehrsnachfrage bei Überschreiten der Kapazität der freien Strecke vor der Arbeitsstelle durch diesen Kapazitätswert ersetzt und damit wieder ein Teil der stochastischen Modellierung kompensiert wird.

7.2.4 Einfluss der Verlagerung von Verkehrsströmen bei bestehender Überlastung

Der Modellierung der Verkehrsnachfrage liegt eine Funktion zur Verlagerung von Verkehrsströmen bei steigender Überlastung zu Grunde. Da zur Ausprägung dieser Verlagerung bislang keine empirischen Untersuchungen vorliegen, wurde nach Analogie-betrachtungen eine ebenfalls geschätzte Verlagerungsfunktion von OBER-SUNDERMEIER und OTTO (2003) verwendet. Nachfolgend sollen der Einfluss einer alternativen Funktion mit stärkerer Verlagerung und ein Verzicht auf eine Verlagerung von Verkehrsströmen bei Überlastung untersucht werden.

Tabelle 24 zeigt, dass die Modellierung der Verlagerung der Verkehrsnachfrage einen extremen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Dies äußert sich insbesondere im Vergleich der Basisvariante mit der Variante ohne Berücksichtigung jeglicher Verlagerungseffekte mit einem Ergebnis, das um den Faktor 15,66 über dem Wert mit Verlagerung liegt.

Die große Abweichung resultiert aus überdurchschnittlich häufig auftretenden hohen Staulängen

		V = 5 %	V = 0 %	V = 10 %
Zeitverluste durch Stau	Pkw Werktage	1,00	0,95	1,15
	Pkw Sonn-/Feiertage	1,00	0,88	1,39
	Lkw	1,00	0,93	1,19
Gesamt		1,00	0,95	1,15

Tab. 23: Einfluss des Variationskoeffizienten bei der Modellierung stochastischer Schwankungen auf die Verlustzeiten (Berechnung für das Gesamtnetz)

		Basis	Stärkere Verlagerung	Ohne Verlagerung
Zeitverluste durch Stau	Pkw Werktage	1,00	0,79	15,69
	Pkw Sonn-/Feiertage	1,00	0,76	5,07
	Lkw	1,00	0,77	14,09
Gesamt		1,00	0,79	15,66

Tab. 24: Einfluss der Verlagerung von Verkehrsströmen bei bestehender Überlastung auf die Verlustzeiten (Berechnung für das Gesamtnetz)

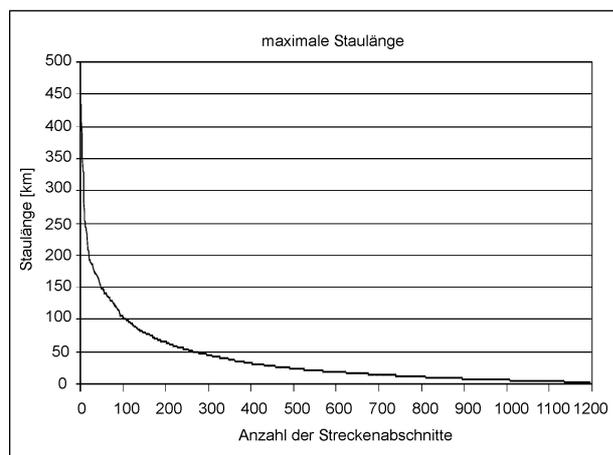


Bild 15: Maximale Staulängen je Streckenabschnitt ohne Berücksichtigung von Verlagerungseffekten (Berechnung für das Gesamtnetz)

bei einem Verzicht auf die Modellierung von Verlagerungseffekten. In Bild 15 sind hierzu für die insgesamt 1.197 von Staus betroffenen Streckenabschnitte die innerhalb des Bezugsjahres maximal auftretenden Staulängen aufgetragen. Demnach weisen 161 dieser Streckenabschnitte maximale Staulängen von 50 km bis 100 km auf und 107 maximale Staulängen von über 100 km. Derartige Überlastungen – insbesondere wenn wie im vorliegenden Fall der Verkehrsablauf ohne externe Störfälle simuliert wird – treten aber in der Realität nicht in dieser Häufigkeit und Stärke auf. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Verkehrsnachfragemodellierung auch einen Ansatz beinhalten muss, der die Verlagerung von Verkehrsströmen bei Überlastung berücksichtigt.

Dass auch der Einfluss des Verlagerungsfunktionsverlaufs selbst hoch ist, wird an der Abweichung von 21 % zu einer alternativen Verlagerungsfunktion (siehe Kapitel 3.2.2) mit ähnlicher Charakteristik, aber insgesamt etwas höherem Verlagerungsniveau, deutlich.

Analog zu den Arbeitsstellen – dort werden bei Arbeitsstellen längerer Dauer 12,5fache und bei den Arbeitsstellen kürzerer Dauer 4,3fache Reisezei-

ten ohne Verlagerung ermittelt – reagiert die Verlustzeitermittlung auf eine Veränderung des zu Grunde gelegten Verlagerungsansatzes also sehr sensibel.

Die von OBER-SUNDERMEIER und OTTO (2003) festgestellten Zusammenhänge im Hinblick auf eine Verlagerung von Verkehrsströmen bei Überlastungen an Arbeitsstellen sind grundsätzlich auch auf die infrastrukturbedingten Engpässe übertragbar:

- Verlagerungseffekte bei Überlastung haben im Vergleich zu den anderen Einflussfaktoren die weitaus größte Bedeutung. Da zur Übertragung dieser rein qualitativen Aussagen in ein mathematisches Modell bislang keine Untersuchungen vorliegen, ist die verwendete Verlagerungsfunktion lediglich als Erstversorgung anzusehen ist. Generell ist anzumerken, dass der Ansatz einer einheitlichen Verlagerungsfunktion hinsichtlich der Netzstruktur und damit der Verfügbarkeit von Alternativrouten, der Ortskundigkeit der Verkehrsteilnehmer und der Wirkung von Verkehrsinformations- und -leitsystemen zu überprüfen ist. In diesem Zusammenhang wäre auch der bereits im Ganglinienmodell der Verkehrsnachfrageermittlung berücksichtigte Anteil der nicht realisierten Nachfrage zu berücksichtigen.
- Der verwendete Staumodellierungsansatz auf der einen und die ausschließliche Berücksichtigung des Bundesautobahnnetzes auf der anderen Seite lassen eine Quantifizierung von überlastungsbedingten Reisezeitverlusten, die durch verlagerten Verkehr auf den Alternativrouten hervorgerufen werden, nicht zu. Hierzu wären ein anderer Ansatz zur Simulation des Verkehrsablaufs (Verflechtungsprognose mit dynamischer Umlegung) sowie eine Ausweitung des Netzmodells auf Alternativrouten im nachgeordneten Straßennetz zu verwenden.
- Es ist davon auszugehen, dass Alternativrouten vor dem Hintergrund einer angestrebten Fahr-

zeitoptimierung gewählt werden. Insgesamt ist anzunehmen, dass durch die räumliche und zeitliche Verlagerung von Fahrten merklich geringere Reisezeitverluste entstehen als ohne eine Verlagerung (Fahrt durch den Stau).

- Der in Tabelle 24 angegebene Wert ohne Ansatz einer Verlagerung der Verkehrsnachfrage kann also allenfalls als „theoretische“ (und in der Realität nicht erreichte) Obergrenze der möglichen Verlustzeiten im gesamten Straßennetz angesehen werden.

7.3 Kapazität

7.3.1 Grundkapazität

Das zur Modellierung der Kapazität verwendete deterministische Verfahren unter der Berücksichtigung von Anpassungsfaktoren zur Korrektur der Grundkapazität bei unterschiedlichen Randbedingungen basiert – soweit dort berücksichtigt – auf Ansätzen aus dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen – HBS (FGSV, 2001) bzw. auf teilweise noch weiter zu verifizierenden Ansätzen aus Forschungsprojekten und wissenschaftlichen Untersuchungen. Eine über alle Streckenabschnitte exakte Abbildung des Mittelwertes der Kapazität in Abhängigkeit der kapazitätsrelevanten Einflussfaktoren ist insbesondere für die neben dem HBS verwendeten Datengrundlagen nur eingeschränkt möglich.

Um den Einfluss einer systematischen Über- oder Unterschätzung der Kapazität auf die Berechnungsergebnisse zu untersuchen, wurden Simulationsläufe durchgeführt, in denen die fahrestreifenbezogene Grundkapazität um 5 % auf 2.100 Pkw-E/h angehoben bzw. um 5 % auf 1.900 Pkw-E/h reduziert wird. Die Ergebnisse sind in Tabelle 25 dargestellt.

Erwartungsgemäß bewirkt eine geringfügige Veränderung der Kapazität (+/-5 %) eine relativ starke Abweichung der Ergebnisse (-30,0 % bzw. +45,0 %). In ihrer Größenordnung liegen sie über den für Arbeitsstellen längerer Dauer (-18,0 % bzw. +24,5 %) ermittelten relativen Abweichungen. Bei einer systematischen Aufprägung für alle Streckenabschnitte sind die Abweichungen allerdings lediglich als untere bzw. obere Grenze zu betrachten. Vielmehr ist auf Grund der Anzahl der berechneten Datensätze über ein Jahr grundsätzlich davon auszugehen, dass starke Abweichungen bei einzelnen Streckenabschnitten ausgeglichen werden. Dennoch können systematische Fehler vor dem Hintergrund von Unsicherheiten bei der Schätzung der Kapazität nicht ausgeschlossen werden, dürften für die infrastrukturbedingten Engpässe aber auf Grund einer empirisch besser abgesicherten Datenbasis hinsichtlich der kapazitätsrelevanten Attribute grundsätzlich geringer als an Arbeitsstellen (OBER-SUNDERMEIER, OTTO, 2003) ausfallen.

7.3.2 Raumstrukturelle Lage

Die Zuordnung eines raumstrukturellen Lagekriteriums (Ballungsraum ja/nein) erfolgt unter Berücksichtigung des DTV manuell. Demnach werden in 10 nach außen abgegrenzten Bereichen (München, Stuttgart, Nürnberg, Rhein-Main, Saarbrücken, Rhein-Ruhr, Hannover, Berlin, Bremen, Hamburg) insgesamt 1.875 Streckenabschnitte mit dem Attribut Ballungsraum belegt. Außerhalb dieser Agglomerationen wird die Grundkapazität eines Streckenabschnitts um 10 % reduziert.

Wie sich die Zuordnung des Ballungsraumkriteriums und damit die Anzahl von Streckenabschnitten ohne Reduktion der Grundkapazität auf die Verlustzeiten auswirken, soll in einem Vergleich mit einem

		C	C + 5 %	C - 5 %
Zeitverluste durch Stau	Pkw Werktage	1,00	0,72	1,45
	Pkw Sonn-/Feiertage	1,00	0,65	1,60
	Lkw	1,00	0,70	1,52
Gesamt		1,00	0,70	1,45

Tab. 25: Einfluss der Über- bzw. Unterschätzung der Grundkapazität auf die Verlustzeiten (Berechnung für das Gesamtnetz)

		Basis	Alternative Zuordnung
Zeitverluste durch Stau	Pkw Werktage	1,00	1,40
	Pkw Sonn-/Feiertage	1,00	1,75
	Lkw	1,00	1,38
Gesamt		1,00	1,40

Tab. 26: Einfluss der Zuordnung des Ballungsraumkriteriums auf die Verlustzeiten (Berechnung für das Gesamtnetz)

alternativen systematischen Ansatz untersucht werden. ARNOLD (2003) weist – im Gegensatz zu der flächigen Zuordnung des Ballungsraumkriteriums – für bestimmte Kombinationen von Jahres-, Wochen- und Tagesganglinientypen einzelne Streckenabschnitte als Berufsverkehrsstrecken aus. Überträgt man diese Vorgehensweise auf den vorliegenden Fall, werden lediglich 1.338 Streckenabschnitte als ballungsraumzugehörig gekennzeichnet. Die Veränderung der Verlustzeiten in Tabelle 26 um 40 % macht deutlich, dass die Berücksichtigung der raumstrukturellen Lage von Streckenabschnitten einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis hat.

Die relativ hohe Abweichung ist vor allem dadurch zu erklären, dass bei einem Teil bereits stark überlasteter Streckenabschnitte in Ballungsräumen nach der Basisvariante das Ballungsraumkriterium wegfällt. Für diese Streckenabschnitte steigen die Verlustzeiten dann bei einer um 10 % reduzierten Kapazität überproportional an.

Eine abschließende Aussage, welcher Modellierungsansatz zur Berücksichtigung der raumstrukturellen Lage und damit zur Verkehrszusammensetzung als realitätsnäher zu bewerten ist, kann – auch vor dem Hintergrund der pauschalen Reduktion der Kapazität um 10 % ohne weitere Differenzierung – nicht gemacht werden.

7.3.3 Hochbelastete Knoten

An hochbelasteten Knoten bewirken hohe Einfädelungsverkehrsstärken eine gegenüber der stromabwärtigen freien Strecke reduzierte Kapazität. Dieser Einfluss wird mit einem im Wesentlichen auf plausiblen Annahmen basierenden Verfahren modelliert. Tabelle 27 zeigt, dass 17 % der Reisezeitverluste durch die Berücksichtigung der Kapazitätsreduktion im Einfädelungsbereich hochbelasteter Knoten anfallen. Diese zusätzlichen Verlustzeiten fallen zu über 80 % an 22 der insgesamt 52 von Kapazitäts-

		Basis	ohne
Zeitverluste durch Stau	Pkw Werktage	1,00	0,84
	Pkw Sonn-/Feiertage	1,00	0,65
	Lkw	1,00	0,84
Gesamt		1,00	0,83

Tab. 27: Einfluss der Berücksichtigung hochbelasteter Knoten auf die Verlustzeiten (Berechnung für das Gesamtnetz)

BAB-Nr.	von	bis	Faktor
1	Dreieck Hamburg-Südost	Kreuz Hamburg-Süd	0,61
3	Opladen	Kreuz Leverkusen	0,48
3	Köln-Dellbrück	Kreuz Köln-Ost	0,39
3	Dreieck Heumar	Kreuz Köln-Ost	0,40
3	Oberhausen-Lirich	Kreuz Oberhausen-West	0,23
5	Dreieck Darmstadt	Darmstädter Kreuz	0,17
7	Hamburg-Stellingen	Dreieck Hamburg-Nordwest	0,17
9	Garching-Süd	Kreuz München-Nord	0,15
30	Natbergen	Kreuz Osnabrück-Süd	0,54
42	Herne-Baukau	Kreuz Herne	0,19
43	Recklinghausen/Herten	Kreuz Recklinghausen	0,22
43	Recklinghausen-Hochlarmark	Kreuz Herne	0,23
43	Herne-Eickel	Kreuz Herne	0,14
43	Recklinghausen-Hochlarmark	Kreuz Recklinghausen	0,17
46	Haan-Ost	Sonnborner Kreuz	0,27
57	Chorweiler	Kreuz Köln-Nord	0,27
57	Longerich	Kreuz Köln-Nord	0,24
59	Dreieck Beuel	Dreieck Sankt Augustin-West	0,21
565	Bonn-Tannenbusch	Kreuz Bonn-Nord	0,26
661	Bad Homburg	Bad Homburger Kreuz	0,50
661	Frankfurt a. Main-Bonames	Bad Homburger Kreuz	0,41

Tab. 28: Reduzierung der Verlustzeiten für einzelne Streckenabschnitte bei Nichtberücksichtigung des Einflusses hoch belasteter Knoten

reduktionen an Knoten betroffenen Streckenabschnitte an (Tabelle 28).

Die im Einzelfall sehr hohen relativen Reduktionen der Verlustzeiten ohne Berücksichtigung hochbelasteter Knoten unterstreichen die Forderung, den Ansatz mit realitätsnahen Eingangsgrößen (Knoten-geometrie, Spuranzahl und -aufteilung, Einfädungsverkehrsstärken) sowie nach einer Überprüfung des HBS-Modells zur Kapazitätsschätzung zu verifizieren.

7.3.4 Anpassungsfaktoren für weitere kapazitätsrelevante Randbedingungen

Neben einer Variation der Grundkapazität bewirkt auch die Kombination verschiedener kapazitätsrelevanter Einflussfaktoren eine Veränderung der berechneten Reisezeitverluste. Die folgenden Betrachtungen konzentrieren sich deshalb auf die Fragestellung, wie die Verlustzeitermittlung im Hinblick auf die streckenbezogene Zuordnung unterschiedlicher Anpassungsfaktoren der Grundkapazität reagiert.

Tabelle 29 enthält verschiedene Kombinationen von Anpassungsfaktoren und korrespondierende relative Veränderungen der Reisezeitverluste für einen beispielhaft ausgewählten Streckenzug.

Variante 1 stellt dabei den Referenzfall mit einer Lage außerhalb eines Ballungsraums dar.

Variante 2 beinhaltet die Installation einer Streckenbeeinflussungsanlage (SBA) mit der Anzeige eines Tempolimits von 120 km/h im Grundzustand für den Gesamtbereich des Streckenzuges. Unter Berücksichtigung des in seiner Größenordnung nur bedingt als abgesichert anzusehenden kapazitätserhöhenden Einflusses der Streckenbeeinflussung

kann eine Verlustzeitreduktion von 21 % erreicht werden.

In Variante 3 wird dem Streckenabschnitt die Lage in einem Ballungsraum zugeordnet. Die Änderung des Lagekriteriums bewirkt eine deutliche Verlustzeitreduktion und unterstreicht die Feststellung aus Kapitel 7.3.2, dass der Abgrenzung von Ballungsräumen für die Verlustzeitberechnung eine hohe Bedeutung beizumessen ist.

Variante 4 berücksichtigt einen Ausbau auf 3 Fahrstreifen gegenüber dem Referenzfall. Die jährlichen Verlustzeiten gehen durch die Kapazitätserhöhung auf fast 0 h/a zurück.

Bei Variante 5 werden eine systematische Erhöhung des Pkw-Äquivalenzwertes und damit eine Reduzierung des Faktors zur Berücksichtigung des SV-Anteils vorgenommen. Die Erhöhung der Verlustzeiten um 23 % zeigt, dass die Reisezeitverluste bei Autobahnabschnitten mit starken Längsneigungen sehr sensitiv auf die Zuordnung einer repräsentativen Längsneigung und damit eines repräsentativen Äquivalenzwertes reagieren.

7.4 Staumodellierung – Verkehrsdichte

Die Dichte, die im Rahmen der Staumodellierung innerhalb des Staus angesetzt wird, hat einen direkten Einfluss auf die ermittelte Staulänge. Gering ist jedoch der Einfluss auf die Anzahl der im Stau befindlichen Fahrzeuge sowie auf die jeweiligen Einzelreisezeitverluste. Setzt man z. B. eine höhere Dichte im Stau an, wird die Staulänge kürzer, dafür sinken die zugehörigen Geschwindigkeiten.

Dieser Zusammenhang trifft allerdings nur dann zu, wenn man keine Verlagerung von Verkehrsströmen

Variante	SV-Anteil	Ballungsraum ja/nein	Tempolimit	SBA	Witterung	FS-Anzahl	rel. Veränderung Zeitverluste
Variante 1	$\frac{1}{(1-SVA+SVA-E)}$	0,90	-	-	-	2	1,00
Variante 2	$\frac{1}{(1-SVA+SVA-E)}$	0,90	$1/f_{BR}$	1,025	-	2	0,79
Variante 3	$\frac{1}{(1-SVA+SVA-E)}$	-	-	-	-	2	0,24
Variante 4	$\frac{1}{(1-SVA+SVA-E)}$	0,90	-	-	-	3	$t_R = 0$
Variante 5	$\frac{1}{(1-SVA+SVA-E+0,5)}$	0,90	-	-	-	2	1,23

Tab. 29: Einfluss von kapazitätsrelevanten Anpassungsfaktoren bei unterschiedlichen Randbedingungen für die Verlustzeiten (Beispielrechnung für einen Streckenzug)

bei Überlastung ansetzt. Rechnet man mit einer Verlagerungsfunktion und setzt eine höhere Dichte im Stau an, setzt die Verlagerung auf Grund der daraus resultierenden kürzeren Staulängen mit zeitlichem Verzug ein und ist insgesamt schwächer. Dadurch steigen die Verlustzeiten an. Tabelle 30 zeigt die starke Veränderung der Berechnungsergebnisse, wenn mit 1,5fach erhöhte Verkehrsdichte im Stau ($k = 75$ Kfz/km pro Fahrstreifen) gerechnet wird.

Die relative Abweichung der Summe der Reisezeitverluste (+57 %) ist in der Größenordnung mit dem Wert bei den Arbeitsstellen längerer Dauer vergleichbar (+51,5 %).

Festzuhalten bleibt der bereits von OBER-SUNDERMEIER und OTTO (2003) dargestellte Zusammenhang, dass der Einfluss primär auf der Verknüpfung der ermittelten Staulänge mit dem jeweils verlagerten Anteil der Verkehrsnachfrage basiert, d. h., die Berechnung nicht empfindlich gegenüber der Verkehrsdichte, sondern vielmehr gegenüber der Modellierung der Verlagerung der Verkehrsnachfrage ist.

7.5 Witterung

Der bereits bei der Quantifizierung staubedingter jährlicher Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen durch Arbeitsstellen festgestellte geringe Einfluss der Witterung (+1 %) zeigt sich bei einer geringfügig

höheren Abweichung von +3 % auch für die infrastrukturbedingten Engpässe (Tabelle 31). Für den geringen Einfluss – trotz einer Kapazitätsreduktion von 10 % – können zumindest zum Teil zwei Aspekte ausschlaggebend sein:

Zum einen werden lediglich Niederschläge und keine extremen Witterungsbedingungen wie Schneefall, Glatteis und Nebel berücksichtigt und zum anderen liegt der überwiegende Teil der Kapazitätsreduktionen durch die zufällige Verteilung der Niederschlagsereignisse in unkritischen Bereichen.

7.6 Unfälle und Nothalte

7.6.1 Dauer der Kapazitätseinschränkung bei Unfällen

Über die grundsätzliche Berücksichtigung des Einflusses von Unfällen (siehe Kapitel 6.1) hinaus soll nachfolgend auch der Einfluss von reduzierten Dauern der Kapazitätseinschränkung untersucht werden. Die Basisvariante in Tabelle 32 entspricht dabei den in Kapitel 3.2.2 dargestellten Werten. Die Alternativvariante weist im Vergleich dazu die gleichen Unfallraten auf, die Dauer der jeweiligen Kapazitätseinschränkung ist jedoch gegenüber der Basisvariante reduziert.

Die Ergebnisse in Tabelle 33 zeigen die Sensitivität der Ergebnisse hinsichtlich der Dauer der Kapazitätsreduktion.

		k = 50 Kfz/(km · FS)	k = 75 Kfz/(km · FS)
Zeitverluste durch Stau	Pkw Werktage	1,00	1,56
	Pkw Sonn-/Feiertage	1,00	1,46
	Lkw	1,00	1,64
Gesamt		1,00	1,57

Tab. 30: Einfluss der Verkehrsdichte im Stau auf die Verlustzeiten (Berechnung für das Gesamtnetz)

		ohne Witterung	mit Witterung
Zeitverluste durch Stau	Pkw Werktage	1,00	1,03
	Pkw Sonn-/Feiertage	1,00	1,05
	Lkw	1,00	1,04
Gesamt		1,00	1,03

Tab. 31: Einfluss der Berücksichtigung von ungünstigen Witterungsbedingungen auf die Verlustzeiten (Berechnung für das Gesamtnetz)

Unfall	Basis	Alternative
schwer	15 min/45 min ¹	10 min/30 min ¹
leicht	35 min	25 min
¹ Vollsperrung/Teilsperre		

Tab. 32: Dauer der Kapazitätseinschränkung

		Basis	Alternative
Zeitverluste durch Stau	Pkw Werktage	1,00	0,87
	Pkw Sonn-/Feiertage	1,00	0,73
	Lkw	1,00	0,83
Gesamt		1,00	0,87

Tab. 33: Einfluss unterschiedlicher Dauern der Kapazitätseinschränkung bei Unfällen auf die Verlustzeiten (Berechnung für das Gesamtnetz)

		Basis (uneingeschränkte Nothaltemöglichkeit)	Alternative (eingeschränkte Nothaltemöglichkeit)
Zeitverluste durch Stau	Pkw Werktage	1,00	1,17
	Pkw Sonn-/Feiertage	1,00	1,24
	Lkw	1,00	1,27
Gesamt		1,00	1,18

Tab. 34: Einfluss unterschiedlicher Nothaltemöglichkeiten auf die Verlustzeiten (Berechnung für das Gesamtnetz)

7.6.2 Nothaltemöglichkeit außerhalb der Fahrbahn

Da über das Vorhandensein von Seitenstreifen im Bundesautobahnnetz keine aussagekräftigen Datengrundlagen vorhanden sind, wird in der Basisvariante davon ausgegangen, dass bei allen Nothalten eine uneingeschränkte Nothaltemöglichkeit außerhalb der Fahrbahn vorhanden ist. Alternativ dazu wird eine Variante untersucht, die lediglich von eingeschränkten Nothaltemöglichkeiten außerhalb der Fahrbahn in Form von Nothaltebuchten ausgeht (Tabelle 34). Die Ergebnisse zeigen, dass der Extremfall einer durchgängig nur eingeschränkten Nothaltemöglichkeit in Form von Nothaltebuchten zu einer Erhöhung der Verlustzeiten von 18 % führt. Da der weitaus überwiegende Teil des Autobahnnetzes mit Seitenstreifen ausgestattet ist, ist davon auszugehen, dass die Nichtberücksichtigung von Streckenabschnitten mit eingeschränkten Nothaltemöglichkeiten außerhalb der Fahrbahn lediglich zu einer geringen Erhöhung der Reisezeitverluste führen wird.

8 Zusammenfassung

Zielsetzung und methodische Grundlagen

Staus auf Autobahnen lassen sich ihrer Ursache nach im Wesentlichen in folgende Kategorien einteilen:

- Staus auf Grund von dauerhaften infrastrukturbedingten Kapazitätsengpässen,
- Staus auf Grund von temporären Kapazitätseinschränkungen durch Arbeitsstellen,

- Staus auf Grund von temporären Kapazitätseinschränkungen durch Unfälle und Nothalte.

Störungen im Netz werden im Rahmen des öffentlich-rechtlichen Verkehrswarndienstes und privater Verkehrsinformationsdienste beobachtet und ausgewertet. Hier existieren viel versprechende Ansätze hinsichtlich der Ableitung von Zeitverlusten auf der Grundlage von Daten aus verschiedenen Erfassungssystemen. Es ist allerdings (auch zukünftig) nicht zu erwarten, dass auf Basis dieser Systeme eine nach Störungsursachen differenzierte Analyse vorgenommen werden kann.

Reisezeitverluste auf Grund von Arbeitsstellen kürzerer und längerer Dauer für die Bezugsjahre 1998 und 2000 wurden im FE-Vorhaben „Quantifizierung staubedingter Reisezeitverluste auf Autobahnen – Störungsursache: Arbeitsstellen“ der Bundesanstalt für Straßenwesen ermittelt (OBER-SUNDERMEIER, OTTO, 2003).

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Quantifizierung sämtlicher durch infrastrukturbedingte Kapazitätsengpässe sowie Unfälle und Nothalte verursachter Zeitverluste auf Bundesautobahnen für das Bezugsjahr 2000. Die Arbeit ist in ihrem methodischen Ansatz als komplementär zum Projekt „Quantifizierung staubedingter Reisezeitverluste auf Autobahnen – Störungsursache: Arbeitsstellen“ angelegt. Zusammen mit den dort ermittelten Ergebnissen kann somit abgeschätzt werden, wie sich die Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen anteilmäßig und in ihrer Größenordnung auf die oben genannten Störungsursachen aufteilen.

Voraussetzung für eine sinnvolle Quantifizierung von infrastrukturbedingten Reisezeitverlusten ist

die Kenntnis der tatsächlichen Verkehrsabläufe. Hierzu waren methodisch im Wesentlichen folgende Aspekte zu behandeln:

- Aufbau eines Autobahnnetzmodells,
- Modellierung der Verkehrsnachfrage,
- Modellierung der Kapazität,
- Staumodellierung und Ermittlung der Reisezeitverluste.

Zur Simulation des Verkehrsablaufs und zur Ermittlung der Reisezeitverluste wurde das Programm QuantKap (Quantifizierung von Reisezeitverlustzeiten durch Kapazitätsengpässe) eingesetzt. In QuantKap sind die genannten methodischen Grundlagen softwaremäßig umgesetzt.

Auf der Grundlage von Sensitivitätsanalysen wurde die Stabilität der Modelle insbesondere in Abhängigkeit von den zur Verfügung stehenden Datengrundlagen beurteilt. Die grundsätzliche Anwendbarkeit im Rahmen einer fortlaufenden jährlichen Anwendung des Verfahrens wurde nachgewiesen. Die hierzu notwendigen Aktionspunkte hinsichtlich der Verbesserung der Datengrundlage und der Beseitigung bestehender Wissenslücken in der Empirie wurden identifiziert und dargestellt.

Als weiteres Ziel – neben der Quantifizierung der staubedingten Reisezeitverluste – hat sich im Verlauf der Projektbearbeitung die Schaffung einer einheitlichen Datenbasis aus den verschiedenen zur Verfügung stehenden Primärdatenquellen herauskristallisiert. Sie ist auch die notwendige Voraussetzung für eine optimale Versorgung des Simulationsprogramms.

Hierzu werden Informationen aus den Datenquellen

- Autobahnverzeichnis – AVERZ,
- Bundesinformationssystem Straße – BISStra,
- Zustandserfassung des BAB-Netzes,
- Netzmodell für die Bundesfernstraßenplanung – NEMOBFStr,
- Straßenverkehrszählung – SVZ,
- Auswertung der automatischen Dauerzählstellen auf Bundesfernstraßen – DZSt

zusammengeführt und in einer streckenbezogenen BAB-Datenbank zusammengefasst.

Die BAB-Datenbank enthält über die zur Verlustzeitberechnung notwendigen Daten hinaus weitere

Informationen und ist so aufgebaut, dass sie als Basis-Informationssystem auch für andere Problemstellungen geeignet ist.

Reisezeitverluste durch infrastrukturbedingte Kapazitätsengpässe

Die Ergebnisse der jährlichen Verlustzeitberechnung schließen infrastrukturbedingte Kapazitätsengpässe mit folgenden Randbedingungen ein:

- Fahrstreifenreduktionen,
- Abschnitte mit hoher Längsneigung und hohem Schwerverkehrsanteil,
- Einfädelungsbereiche an hochbelasteten Knoten.

Unfälle und Nothalte sowie Niederschlag werden als stochastische Ereignisse berücksichtigt.

Eine Unterscheidung erfolgt hinsichtlich der zu Grunde gelegten Referenzgeschwindigkeit v_{Ref} : Aus Sicht der Straßennutzer wird die Richtgeschwindigkeit von 130 km/h bzw. ein vorhandenes Tempolimit als Referenzgeschwindigkeit angesetzt. Aus Sicht des Systembetreibers werden die Simulationsläufe mit einer Referenzgeschwindigkeit von $v_{\text{Ref}} = 80$ km/h durchgeführt. Für Lkw beträgt die Referenzgeschwindigkeit generell 80 km/h.

Bei Zugrundelegung einer Referenzgeschwindigkeit von 130 km/h ergeben sich Reisezeitverluste für alle Fahrzeugarten und Fahrtzwecke in Höhe von 144,4 Mio. Stunden. Geht man bei der Berechnung der Reisezeitverluste von einer Referenzgeschwindigkeit von 80 km/h aus, ergibt sich ein Wert von 133,3 Millionen Stunden. Die relativ geringe Differenz von 11,1 Mio. Stunden ist vor allem darauf zurückzuführen, dass Streckenabschnitte mit hohen Zeitverlusten in Ballungsräumen bereits mit Tempolimits belegt sind und diese als Referenzgeschwindigkeit angesetzt werden.

Den weitaus überwiegenden Anteil an den Gesamtzeitverlusten haben bei einer Referenzgeschwindigkeit von 130 km/h die Pkw im Werktagsverkehr mit 87 %. Der Anteil der Lkw an den Gesamtzeitverlusten liegt bei etwa 9,8 %. 3,2 % der Reisezeitverluste fallen an Sonn- und Feiertagen (nur Pkw) an. Für eine Referenzgeschwindigkeit von 80 km/h verschieben sich die Anteilswerte auf Grund der Tatsache, dass für Lkw in beiden Fällen dieselbe Referenzgeschwindigkeit von 80 km/h angesetzt wird, geringfügig.

Der Anteil der unfall- und nothaltbedingten Reisezeitverluste an den Gesamtreisezeitverlusten liegt bei beiden diskutierten Referenzgeschwindigkeiten in der Größenordnung von 50 bis 55 Mio. Stunden. Eine exakte Angabe ist wegen des Zufallseinflusses in der Unfallmodellierung nicht möglich.

Eine weitere Fragestellung, die sich aus der Untersuchung der berechneten Reisezeitverluste ergibt, zielt auf die Konzentration der Reisezeitverluste auf bestimmte Streckenabschnitte ab. Hierzu wurden Lorenzkurven erstellt, anhand derer auf einfache Weise die prozentualen Anteile der Zeitverluste sowie der jeweils zugehörige Anteil der Streckenabschnitte abgelesen werden können. Der zusätzlich ermittelte Konzentrations-Koeffizient gibt Aufschluss über das Maß der Konzentration.

Zur Veranschaulichung der Anteile einzelner Streckenabschnitte an den Gesamtreisezeitverlusten sind in Bild 16 die Lorenzkurven für die Referenzgeschwindigkeit von 130 km/h dargestellt.

Anhand dieser Darstellung wird deutlich, dass ein überwiegender Anteil der Reisezeitverluste auf relativ wenig Streckenabschnitten anfällt, wobei folgende Aspekte berücksichtigt werden müssen:

- Alle anfallenden Reisezeitverluste vor einem Engpass werden dem nächsten stromaufwärts liegenden Streckenabschnitt zugewiesen. In der Realität ist – insbesondere bei den Streckenabschnitten mit sehr hohen Verlustzeiten – davon auszugehen, dass ein Teil der ermittelten Reisezeitverluste an weiteren stromaufwärtigen Abschnitten anfällt.

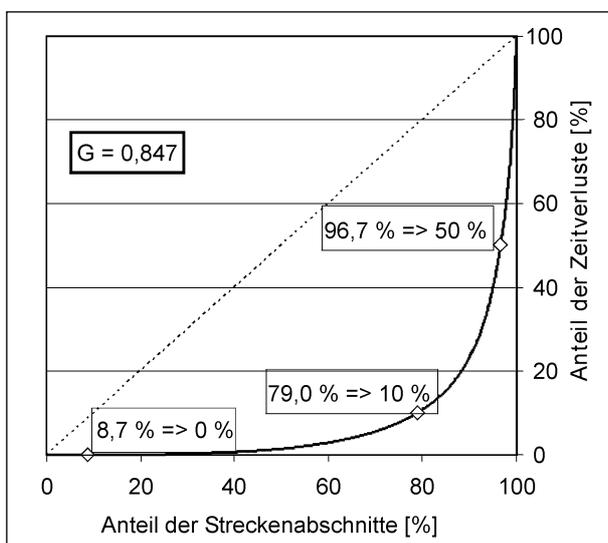


Bild 16: Konzentration der Reisezeitverluste auf Streckenabschnitte – $v_{\text{Ref}} = 130 \text{ km/h}$

- Fehler in den Primärdatenquellen, vor allem hinsichtlich des stark kapazitätsrelevanten Attributs Fahrstreifenanzahl, können im Einzelfall zu hohen Abweichungen führen.
- Das Fehlen von Informationen über Knotengeometrien und Einfädelungsverkehrsstärken an kapazitätsreduzierenden Knoten kann im Einzelfall mit hohen Unsicherheiten behaftet sein.
- Staus, die sich möglicherweise auf den Einfahrampen bilden, werden vollständig der Richtungsfahrbahn zugewiesen.

Differenzierung nach Bundesländern

Differenziert man das Ergebnis nach Bundesländern, ergeben sich die in Tabelle 35 dargestellten infrastruktur- und unfallbedingten Verlustzeiten sowie die Gesamtreisezeitverluste pro Jahr, wobei die ausgewiesenen Werte für die unfallbedingten Verlustzeiten – wie bereits oben beschrieben – größeren Unsicherheiten unterworfen sind.

Tabelle 35 enthält auch die Gesamtverlustzeiten bezogen auf die abgewickelte Fahrleistung und bezogen auf die Einwohnerzahl je Bundesland.

Hierbei ist anzumerken, dass bei Streckenabschnitten, die in zwei Bundesländern liegen, die Verlustzeiten dem Land mit dem Engpass zugewiesen werden.

Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

Die Ermittlung der Reisezeitverluste basiert auf einer großen Anzahl von Eingangsdaten. Diese Eingangsdaten sind entweder durch die jeweils verwendete Datenbasis festgelegt, oder sie sind in Form von Parametern Bestandteil der eingesetzten Modelle zur Ermittlung der Verkehrsnachfrage und der Kapazität sowie zur Modellierung der Stauentwicklung. Jede Änderung eines oder mehrerer Parameter zieht in mehr oder weniger ausgeprägter Form eine Veränderung der Gesamtergebnisse nach sich.

In Sensitivitätsanalysen wird deshalb die Stabilität der Berechnungsergebnisse hinsichtlich der Veränderung einzelner Eingangsdaten bestimmt.

Wesentliche Erkenntnis dieser Sensitivitätsanalyse ist, dass die Modellierung der Verlagerung der Verkehrsnachfrage bei vorhandener Überlastung einen herausragenden Einfluss auf die Ergebnisse hat. Ohne Berücksichtigung dieser Verlagerung liegen

die ermittelten Reisezeitverluste um ein Vielfaches höher als mit Berücksichtigung dieses Effekts. Eine Analyse der Einzeldaten zeigt, dass ohne Ansatz einer Verlagerung an einem Großteil der Streckenabschnitte unplausible Staulängen und damit auch unplausible Verlustzeiten ermittelt werden.

Von einer merklichen Verkehrsverlagerung bei sonst erheblichen Auswirkungen auf den Verkehrsablauf muss insbesondere vor dem Hintergrund der verfügbaren Verkehrsinformation und der Verkehrssteuerung ausgegangen werden. Da zum Ausmaß der Verlagerung bislang keine Untersuchungen vorliegen, ist die Modellierung an dieser Stelle mit großen Unsicherheiten behaftet.

Die von OBER-SUNDERMEIER und OTTO (2003) festgestellten Zusammenhänge im Hinblick auf die Differenzen zwischen den Ergebnissen mit und ohne Verlagerung von Verkehrsströmen und einer Verlagerung von Verkehrsströmen bei Überlastungen an Arbeitsstellen sind grundsätzlich auch auf die infrastrukturbedingten Engpässe übertragbar und folgendermaßen zu bewerten: Die Reisezeit-

verluste, die unter Berücksichtigung einer Verlagerungsfunktion ermittelt wurden, beziehen sich auf die realen Verkehrszustände der betroffenen Autobahnabschnitte. Reisezeitverluste, die durch eine Verlagerung von Verkehrsströmen insbesondere ins nachgeordnete Netz entstehen, bleiben hier unberücksichtigt. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass Alternativrouten auf Grund einer angestrebten Fahrzeioptimierung gewählt werden, so dass durch die Verlagerung von Fahrten merklich geringere Reisezeitverluste entstehen als ohne eine Verlagerung (Fahrt durch den Stau). Somit können die Reisezeitverluste, die ohne Ansatz einer Verlagerung ermittelt wurden, als „theoretische“ (und in der Realität nicht erreichte) Obergrenze aufgefasst werden.

Auf der Angebotsseite sind insbesondere folgende Faktoren anzuführen, auf deren Veränderung die Ergebnisse sensibel reagieren:

- Zuweisung eines raumstrukturellen Lagekriteriums (Ballungsraum ja/nein),
- Modellierung hochbelasteter Autobahnknoten.

Land	Abschnittslängen in km	Einwohner in Mio. E	Fahrleistung in Mrd. Fz-km	Infrastrukturbedingte Zeitverluste in h	Unfallbedingte Zeitverluste in h	Zeitverluste in h	Zeitverluste pro Mio. Fz-km	Zeitverluste pro 1.000 E
SH	962	2,782	6,672	350.000	1.256.000	1.606.000	240	575
HH	162	1,710	2,310	5.003.000	958.000	5.961.000	2.595	3.505
NI	2.698	7,911	22,900	6.593.000	5.305.000	11.899.000	514	1.489
HB	118	0,662	0,969	329.000	386.000	715.000	797	1.167
NW	4.356	18,000	46,783	41.275.000	17.608.000	58.884.000	1.251	3.252
HE	1.912	6,058	21,651	17.222.000	8.063.000	25.285.000	1.172	4.188
RP	1.678	4,030	11,500	2.580.000	2.719.000	5.299.000	517	1.476
BW	2.058	10,493	20,738	5.361.000	4.867.000	10.228.000	490	968
BY	4.566	12,188	38,354	9.598.000	9.207.000	18.805.000	490	1.541
SL	472	1,070	2,585	398.000	495.000	893.000	346	836
BL	124	3,384	1,580	2.390.000	363.000	2.752.000	1.753	818
BB	1.532	2,601	9,989	4.000	592.000	596.000	55	212
MV	672	1,783	1,928	0	55.000	55.000	32	35
SN	904	4,443	5,612	337.000	482.000	819.000	154	194
ST	640	2,633	3,959	9.000	177.000	185.000	47	71
TH	570	2,440	4,010	48.000	368.000	416.000	102	168
Summe/ Durchschnitt	23.424	82,875	201,540	91.497.000	52.901.000	144.398.000	716	1.742

Tab. 35: Reisezeitverluste differenziert nach Bundesländern für das Bezugsjahr 2000 aus Nutzersicht – $v_{Ref} = 130$ km/h

Staubedingte Gesamtzeitverluste im Autobahnnetz

In einer Gesamtbetrachtung der Reisezeitverluste ergibt sich bei einer nutzerorientierten Betrachtung und nach Ursachen differenziert die in Bild 17 dargestellte Verteilung.

Um die genannten Summen der Reisezeitverluste weniger abstrakt erscheinen zu lassen und damit einen Eindruck vom Ausmaß der Reisezeitverluste zu erhalten, lassen sich zum Vergleich die Gesamtfahrleistungen und -fahrzeiten bei störungsfreiem Verkehrsablauf im deutschen Autobahnnetz heranziehen.

Für das Bezugsjahr 2000 wurde auf Grundlage der für die Untersuchung vorliegenden Datenquellen die Gesamtfahrleistung auf Autobahnen mit 201,5 Mrd. Fz-km abgeschätzt. Bei einer Aufsummierung der nach Geschwindigkeitsbeschränkungen für Lkw und Pkw sowie der Richtgeschwindigkeit für Pkw differenzierten Fahrleistungsanteile ergibt sich eine Gesamtfahrzeit in Höhe von 1,74 Mrd. Stunden pro Jahr ohne Verluste durch Stau (Pkw: 1,36 Mrd. h; Lkw: 0,38 Mrd. h).

Sieht man die staubedingten Verlustzeiten in Höhe von 234 Mio. Stunden in Relation zu den bei ungestörtem Verkehrsablauf abgewickelten Fahrzeiten, kann ein staubedingter mittlerer Reisezeitzuschlag von 13 bis 14 Prozent angesetzt werden.

Bezogen auf die mittlere Pkw-Geschwindigkeit bedeutet dies eine Reduzierung von ca. 125 km/h bei ungestörtem Verkehrsablauf auf ca. 109 km/h unter Berücksichtigung staubedingter Verlustzeiten.

Bewertet man die staubedingten Zeitverluste im deutschen Autobahnnetz für das Bezugsjahr 2000

monetär mit an die Bundesverkehrswegeplanung angelehnten Sätzen, können bei einer nutzerorientierten Betrachtung folgende Beträge nach Stauursache differenziert abgeschätzt werden:

• infrastrukturbedingte Kapazitätsengpässe:	1.350 Mio. €
• Unfälle:	940 Mio. €
• Arbeitsstellen:	<u>1.260 Mio. €</u>
Summe:	3.550 Mio. €

Nothalte an Streckenabschnitten mit nur eingeschränkter Nothaltemöglichkeit außerhalb der Fahrbahn, die auf Grund ihrer temporären Kapazitätsreduktion zusätzliche Reisezeitverluste und damit Zeitkosten verursachen, sowie Zeitverluste auf Grund von Umwegfahrten sind in diesen Angaben nicht enthalten.

Ausblick: Konzept einer jährlichen Fortschreibung

Nachdem die Eignung des im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten und angewendeten Verfahrens zur Quantifizierung von jährlichen Reisezeitverlusten durch infrastrukturbedingte Kapazitätsengpässe einschließlich Unfällen und Nothalten nachgewiesen werden konnte, stellt sich wie für die Quantifizierung staubedingter Verlustzeiten durch Arbeitsstellen die Frage nach der Möglichkeit der Fortschreibung der Untersuchung für weitere Bezugsjahre. Ziel einer jährlichen Durchführung der Berechnungen könnten statistische Auswertungen im Hinblick auf eine längerfristige Analyse der staubedingten Verlustzeitentwicklung, aber auch die Ableitung von Maßnahmen im Autobahnnetz sein. Es ist allerdings zu empfehlen, eine Fortschreibung

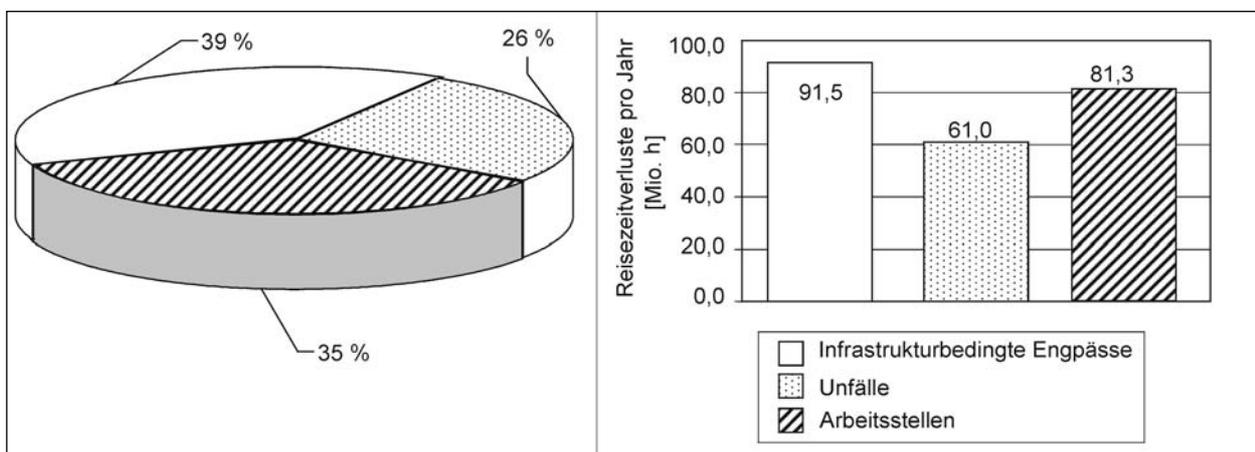


Bild 17: Verteilung der staubedingten Reisezeitverluste im Autobahnnetz nach Stauursachen

auf der Basis der verwendeten Methodik mit folgenden Aufgaben zu verknüpfen:

1. Weitere Verbesserung der Datenbasis

Grundsätzlich sind im Hinblick auf eine Fortschreibung und auf eine eventuelle Erweiterung der Datenbank folgende Verbesserungen in den Datengrundlagen anzustreben:

- Vereinheitlichung von Richtungsdefinitionen in den Primärdatenquellen,
- Bereitstellung von Informationen über Knotengeometrien und Einfädelungsverkehrsstärken,
- Verbesserung der Datenqualität der Dauerzählstellen durch Reduzierung von Datenausfällen und durch räumliche Verdichtung,
- Bereitstellung von typisierten Ganglinien außerhalb des Normalzeitbereichs,
- bessere Dokumentation von Verkehrsbeeinflussungsanlagen,
- Kennzeichnung von Streckenabschnitten ohne bzw. mit Seitenstreifen,
- Überprüfung der Zuweisung eines raumstrukturellen Lagekriteriums (Ballungsraum ja/nein).

2. Überprüfung und Validierung des entwickelten Ansatzes zur Verlagerung von Verkehrsströmen bei Überlastungen

Analog zur Quantifizierung staubedingter Verlustzeiten an Arbeitsstellen gilt: Der Ansatz zur Verlagerung von Teilen der Verkehrsnachfrage bei starker Überlastung des Arbeitsstellenengpasses basiert im Wesentlichen auf Plausibilitätsüberlegungen und ist bislang empirisch kaum untersucht worden. Mittels Sensitivitätsanalysen konnte jedoch nachgewiesen werden, dass gerade dieser Ansatz einen entscheidenden Einfluss auf die Berechnungsergebnisse hat. Im Vorfeld einer Ausweitung der Untersuchung auf weitere Bezugsjahre sollte daher ein besonderes Augenmerk auf die Validierung und gegebenenfalls Differenzierung der entwickelten Verlagerungsfunktion gelegt werden.

3. Verbesserung der Modellierung von Unfällen und Nothalten sowie Witterung

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten stochastischen Ansätze zur Modellie-

rung von Unfällen, Nothalten und Niederschlagsereignissen bedürfen ebenfalls einer weiteren Validierung. Dies betrifft vor allem aber die Zuordnung von Unfallwirkungen (Ausmaß und Dauer von Fahrstreifensperrungen) zu den verschiedenen Unfallkategorien sowie die Anzahl, Dauer und räumliche Differenzierung von Niederschlagsereignissen.

4. Optional: Zusammenführung der Programme QuantKap und QuantAs

Vor dem Hintergrund, dass die zur softwaremäßigen Umsetzung der methodischen Grundlagen entwickelten Programme QuantAs (Quantifizierung von Reisezeitverlusten an Arbeitsstellen) und QuantKap (Quantifizierung von Reisezeitverlustzeiten durch Kapazitätsengpässe) neben dem gleichen Staumodellierungsansatz zum Teil auch auf dieselben Eingangsdaten zurückgreifen, wäre eine Fusion der beiden Werkzeuge sowohl hinsichtlich der Funktionalitäten als auch der Bedienoberfläche denkbar.

Abschließend sei angemerkt, dass die errechneten und mit über 3,5 Mrd. € bewerteten Zeitverluste pro Jahr der Thematik der Untersuchung eine erhebliche volkswirtschaftliche Bedeutung zukommen lassen.

Literatur

ARNOLD, M. (2001): Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsuntersuchung einer befristeten Umnutzung von Standstreifen für Zwecke des fließenden Verkehrs, Schriftenreihe Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des BMVBW, Heft 820, Bonn 2001

ARNOLD, M. (2003): Bemessungsverkehrsstärken von Straßen vor dem Hintergrund veränderter Pegel, Schlussbericht (Entwurf) zum FE-Projekt 01.154 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 2003

BÄUMER, H. (2002): Einsatzkriterien für Nothaltemöglichkeiten an ein- und zweibahnigen Straßen, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen an der Ruhr-Universität Bochum, Heft 26, Bochum 2002

BMVBW – Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (2000): Ferienverkehrs-kalender 2000, Berlin 2000

- BMVBW – Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (2001): Autobahnverzeichnis, Stand 2000, Berlin 2001
- BMVBW – Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (2001a): Verkehr in Zahlen 2001/2002, Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg 2001
- BMVBW – Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (2001a): Anweisung Straßeninformationsbank – Stand 2001, 2001
- BMVBW – Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (2002): Bundesverkehrswegeplan 2003 – Grundzüge der gesamtwirtschaftlichen Bewertungsmethodik, Berlin 2002
- BRILON, W., ZURLINDEN, H. (2003): Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen, Schriftenreihe Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des BMVBW, Heft 870, Bonn 2003
- DAMMANN, W., FRIEDRICH, B., SCHNÜLL, R. (2003): Erforschung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten unter Dauerhochlast während der EXPO 2000 in Hannover, Forschungsbericht für die Deutsche Forschungsgemeinschaft – DFG, Hannover 2003
- ENGELMANN, F. (2003): Fahrstreifenreduktionen an Autobahnen – Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und den Verkehrsablauf, Veröffentlichungen des Instituts für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Heft 31, Hannover 2003
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (1997): Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS), Aktualisierung der RAS-W-86, Entwurf, Köln 1997
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2000): Begriffsbestimmungen, Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb, Köln 2000
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2001): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS), Köln 2001
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2003): Hinweise zur Datenvervollständigung und Datenaufbereitung in verkehrstechnischen Anwendungen, Köln 2003
- FRANK, D., SUMPFF, J. (1997): Abschätzung der volkswirtschaftlichen Verluste durch Stau im Straßenverkehr, Studie der BMW – Bayerische Motorenwerke AG – Verkehr und Umwelt, München 1997
- GERICKE, S. (1998): Auswertung von Meldungen über Verkehrsstörungen auf Autobahnen in Nordrhein-Westfalen und Brandenburg 1994 – 1997, in: Straßenverkehrstechnik Heft 11/1998
- HEIDEMANN, D., WIMBER, P. (1982): Typisierung von Verkehrsstärkeganglinien durch clusteranalytische Verfahren, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Straßenverkehrszählungen, Heft 26, Bergisch Gladbach 1982
- HOFFMANN, G., LEICHTER, K. (1996): Untersuchung der Auswirkungen der Verkehrsbeeinflussungsanlage auf der A 5 Friedberg-Frankfurt auf Verkehrsablauf, Verkehrssicherheit und Reisezeit, Untersuchung für das Hessische Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen, Berlin 1996
- HOFFMANN, S. (1999): Einsatzbereiche betrieblicher Maßnahmen in planfreien Knotenpunkten, Veröffentlichungen des Instituts für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen, und Städtebau der Universität Hannover, Heft 22, Hannover 1999
- KELLER, H., HAMPE, H., SCHMICKL, J. (1983): Störungen im Fahrt- und Verkehrsablauf auf Schnellstraßen, Schriftenreihe Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des BMV, Heft 396, Bonn 1983
- KELLER, H., SACHSE, T. (1992): Einfluss des Bezugsintervalls in Fundamentaldiagrammen auf die zutreffende Beschreibung der Leistungsfähigkeit von Straßenabschnitten, Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des BMV, Heft 614, Bonn 1992
- LAFFONT, S., NIERHOFF, G., SCHMIDT, G. (2002): Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2000 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Verkehrstechnik, Heft V9, Bergisch Gladbach 2002
- LEMKE, K., MORITZ, K. (2002): Freigabe von Seitenstreifen auf Autobahnen – Beiträge zum Erfahrungsaustausch am 20. Juni 2001 in der

- Bundesanstalt für Straßenwesen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Verkehrstechnik, Heft V94, Bergisch Gladbach 2002
- LENSING, N. (2003): Straßenverkehrszählung 2000 – Ergebnisse, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Verkehrstechnik, Heft V103, Bergisch Gladbach 2003
- LIGHTHILL, M. J., WHITHAM, G. B. (1955): On Kinematic Waves, A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads, Proceedings of the Royal Society, 229a, London 1955
- MATTHEIS, C. (2002): Auswirkungen der Umnutzung von BAB-Standstreifen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Verkehrstechnik, Heft V92, Bergisch Gladbach 2001
- OBER-SUNDERMEIER, A. (2003): Entwicklung eines Verfahrens zur Stauprognose an Engpässen auf Autobahnen unter besonderer Berücksichtigung von Arbeitsstellen, Dissertation, Schriftenreihe Verkehr der Universität Kassel, Heft 15, Kassel 2003
- OBER-SUNDERMEIER, A., OTTO, J. C. (2003): Quantifizierung staubedingter jährlicher Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen – Störungsursache Arbeitsstellen, Forschungsbericht für die Bundesanstalt für Straßenwesen, Kassel 2003
- PINKOFSKY, L. (2003): Typisierung von Tages-, Wochen- und Jahresganglinien, Forschungsbericht zu FE 00621 und FE 00623 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 2003
- PISCHNER, T., HANGLEITNER, S., LAMBACHER, U., TRUPAT, S., KÜHNE, R., SCHICK, P. (2003): Ermittlung und Bewertung von Nutzenkomponenten von Streckenbeeinflussungsanlagen im Hinblick auf den Verkehrsablauf, Schriftenreihe Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des BMVBW, Heft 866, Bonn 2003
- PÖPPEL-DECKER, M., SCHEPERS, A., KOSSMANN, I. (2003): Grundlagen streckenbezogener Unfallanalysen auf Bundesautobahnen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Mensch und Sicherheit, Heft M153, Bergisch Gladbach 2003
- PONZLET, M. (1996): Auswirkungen von systematischen und umfeldbedingten Schwankungen des Geschwindigkeitsverhaltens und deren Beschreibung in Verkehrsflussmodellen, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen an der Ruhr-Universität Bochum, Heft 16, Bochum 1996
- RÖHR, T., ZACKOR, H., LINDENBACH, A. (1996): Entwicklung eines Verfahrens zur großräumigen Prognose der Verkehrsentwicklung und Folgerungen für den Datenaustausch von Verkehrsrechnerzentralen, Teil 1: Prognoseverfahren, Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des BMVBW, Heft 727, Bonn 1996
- TRB – Transportation Research Board (2000): Highway Capacity Manual (HCM 2000), Washington D.C. 2000
- ZACKOR, H. (1976): Untersuchung von Steuerungsmodellen zur Verkehrstromführung mit Hilfe von Wechselwegweisern – Teil III: Entwicklung von Steuerungsmodellen, Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des BMV, Heft 199, Bonn 1976

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2002

V 88: Tägliches Fernpendeln und sekundär induzierter Verkehr
Vogt, Lenz, Kalter, Dobeschinsky, Breuer € 17,50

V 89: Verkehrsqualität auf Busspuren bei Mitnutzung durch andere Verkehre
Baier, Kathmann, Schuckließ, Trapp, Baier, Schäfer € 13,50

V 90: Anprallversuche mit Motorrädern an passiven Schutzeinrichtungen
Bürkle, Berg € 16,50

V 91: Auswirkungen der Umnutzung von BAB-Standstreifen
Mattheis € 15,50

V 92: Nahverkehrsbevorrechtigung an Lichtsignalanlagen unter besonderer Berücksichtigung des nichtmotorisierten Verkehrs
Friedrich, Fischer € 14,00

V 93: Nothaltemöglichkeiten an stark belasteten Bundesfernstraßen
Brilon, Bäumer € 17,00

V 94: Freigabe von Seitenstreifen an Bundesautobahnen
Lemke, Moritz € 17,00

V 95: Führung des ÖPNV in kleinen Kreisverkehren
Topp, Lagemann, Derstroff, Klink, Lentze, Lübke, Ohlschmid, Pires-Pinto, Thömmes € 14,00

V 96: Mittellage-Haltestellen mit Fahrbahnanhebung
Angenendt, Bräuer, Klöckner, Cossé, Roeterink, Sprung, Wilken € 16,00

V 97: Linksparken in städtischen Straßen
Topp, Riel, Albert, Bugiel, Elgun, Roßmark, Stahl € 13,50

V 98: Sicherheitsaudit für Straßen (SAS) in Deutschland
Baier, Bark, Brühning, Krumm, Meewes, Nikolaus, Räder-Großmann, Rohloff, Schweinhuber € 15,00

V 99: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2000 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Laffont, Nierhoff, Schmidt € 21,00

2003

V 100: Verkehrsqualität unterschiedlicher Verkehrsteilnehmerarten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage
Brilon, Miltner € 17,00

V 101: Straßenverkehrszählung 2000 – Ergebnisse
Lensing € 13,50

V 102: Vernetzung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen
Kniß € 12,50

V 103: Bemessung von Radverkehrsanlagen unter verkehrstechnischen Gesichtspunkten
Falkenberg, Blase, Bonfranchi, Cossé, Draeger, Kautzsch, Stapf, Zimmermann € 11,00

V 104: Standortentwicklung an Verkehrsknotenpunkten – Randbedingungen und Wirkungen
Beckmann, Wulfhorst, Eckers, Klönne, Wehmeier, Baier, Peter, Warnecke € 17,00

V 105: Sicherheitsaudits für Straßen international
Brühning, Löhe € 12,00

V 106: Eignung von Fahrzeug-Rückhaltesystemen gemäß den Anforderungen nach DIN EN 1317

Ellmers, Balzer-Hebborn, Fleisch, Friedrich, Keppler, Lukas, Schulte, Seliger € 15,50

V 107: Auswirkungen von Standstreifenumnutzungen auf den Straßenbetriebsdienst
Moritz, Wirtz € 12,50

V 108: Verkehrsqualität auf Streckenabschnitten von Hauptverkehrsstraßen
Baier, Kathmann, Baier, Schäfer € 14,00

V 109: Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf auf b2+1-Strecken mit allgemeinem Verkehr
Weber, Löhe € 13,00

2004

V 110: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2001 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Laffont, Nierhoff, Schmidt, Kathmann € 22,00

V 113: Car-Sharing in kleinen und mittleren Gemeinden
Schweig, Keuchel, Kleine-Wiskott, Hermes, van Acken € 15,00

V 114: Bestandsaufnahme und Möglichkeiten der Weiterentwicklung von Car-Sharing
Loose, Mohr, Nobis, Holm, Bake € 20,00

V 115: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2002 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Kathmann, Laffont, Nierhoff € 24,50

V 116: Standardisierung der Schnittstellen von Lichtsignalanlagen – Zentralrechner/Knotenpunktgerät und Zentralrechner/Ingenieurarbeitsplatz
Kroen, Klod, Sorgenfrei € 15,00

V 117: Standorte für Grünbrücken – Ermittlung konfliktreicher Streckenabschnitte gegenüber großräumigen Wanderungen jagdbarerer Säugetiere
Surkus, Tegethof € 13,50

V 118: Einsatz neuer Methoden zur Sicherung von Arbeitsstellen kürzerer Dauer
Steinauer, Maier, Kemper, Baur, Meyer € 14,50

2005

V 111: Autobahnverzeichnis 2004
Kühnen € 21,50

V 119: Alternative Methoden zur Überwachung der Parkdauer sowie zur Zahlung der Parkgebühren
Boltze, Schäfer, Wohlfarth € 17,00

V 120: Fahrleistungserhebung 2002 – Inländerfahrleistung
Hautzinger, Stock, Mayer, Schmidt, Heidemann € 17,50

V 121: Fahrleistungserhebung 2002 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko
Hautzinger, Stock, Schmidt € 12,50

V 122: Untersuchungen zu Fremdstoffbelastungen im Straßenseitenraum
Beer, Herpetz, Moritz, Peters, Saltzmann-Koschke, Tegethof, Wirtz € 18,50

V 123: Straßenverkehrszählung 2000: Methodik
Lensing € 15,50

V 124: Verbesserung der Radverkehrsführung an Knoten
Angenendt, Blase, Klöckner, Bonfranchi-Simović, Bozkurt, Buchmann, Roeterink € 15,50

V 125: PM₁₀-Emissionen an Außerordnungsstraßen – mit Zusatzuntersuchung zum Vergleich der PM₁₀-Konzentrationen aus Messungen an der A1 Hamburg und Ausbreitungsberechnungen
Düring, Böisinger, Lohmeyer € 17,00

- V 126: Anwendung von Sicherheitsaudits an Stadtstraßen
Baier, Heidemann, Klemps, Schäfer, Schuckließ € 16,50
- V 127: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2003
Fitschen, Koßmann € 24,50
- V 128: Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen – Sicherheitsüberprüfung vorhandener Lichtsignalanlagen und Anpassung der Steuerung an die heutige Verkehrssituation
Boltze, Reusswig € 17,00
- V 129: Modell zur Glättewarnung im Straßenwinterdienst
Badelt, Breitenstein € 13,50
- V 130: Fortschreibung der Emissionsdatenmatrix des MLuS 02
Steven € 12,00
- V 131: Ausbaustandard und Überholverhalten auf 2+1-Strecken
Friedrich, Dammann, Irzik € 14,50
- V 132: Vernetzung dynamischer Verkehrsbeeinflussungssysteme
Boltze, Breser € 15,50

2006

- V 133: Charakterisierung der akustischen Eigenschaften offener Straßenbeläge
Hübelt, Schmid € 17,50
- V 134: Qualifizierung von Auditoren für das Sicherheitsaudit für Innerortsstraßen
Gerlach, Kesting, Lippert € 15,50
- V 135: Optimierung des Winterdienstes auf hoch belasteten Autobahnen
Cypra, Roos, Zimmermann € 17,00
- V 136: Erhebung der individuellen Routenwahl zur Weiterentwicklung von Umlegungsmodellen
Wermuth, Sommer, Wulff € 15,00
- V 137: PM_x-Belastungen an BAB
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,00
- V 138: Kontinuierliche Stickoxid (NO_x)- und Ozon (O₃)-Messwertaufnahme an zwei BAB mit unterschiedlichen Verkehrsparametern 2004
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,50
- V 139: Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Taumittelsprühanlagen
Wirtz, Moritz, Thesenvitz € 14,00
- V 140: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2004 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 15,50
- V 141: Zählungen des ausländischen Kraftfahrzeugverkehrs auf den Bundesautobahnen und Europastraßen 2003
Lensing € 15,00
- V 142: Sicherheitsbewertung von Maßnahmen zur Trennung des Gegenverkehrs in Arbeitsstellen
Fischer, Brannolte € 17,50
- V 143: Planung und Organisation von Arbeitsstellen kürzerer Dauer an Bundesautobahnen
Roos, Hess, Norkauer, Zimmermann, Zackor, Otto € 17,50
- V 144: Umsetzung der Neuerungen der StVO in die straßenverkehrsrechtliche und straßenbauliche Praxis
Baier, Peter-Dosch, Schäfer, Schiffer € 17,50
- V 145: Aktuelle Praxis der Parkraumbewirtschaftung in Deutschland
Baier, Klemps, Peter-Dosch € 15,50
- V 146: Prüfung von Sensoren für Glättemeldeanlagen
Badelt, Breitenstein, Fleisch, Häusler, Scheurl, Wendl € 18,50
- V 147: Luftschadstoffe an BAB 2005
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,00

- V 148: Berücksichtigung psychologischer Aspekte beim Entwurf von Landstraßen – Grundlagenstudie –
Becher, Baier, Steinauer, Scheuchenpflug, Krüger € 16,50
- V 149: Analyse und Bewertung neuer Forschungserkenntnisse zur Lichtsignalsteuerung
Boltze, Friedrich, Jentsch, Kittler, Lehnhoff, Reusswig € 18,50
- V 150: Energetische Verwertung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst
Rommeiß, Thrän, Schlägl, Daniel, Scholwin € 18,00

2007

- V 151: Städtischer Liefer- und Ladeverkehr – Analyse der kommunalen Praktiken zur Entwicklung eines Instrumentariums für die StVO
Böhl, Mause, Kloppe, Brückner € 16,50
- V 152: Schutzeinrichtungen am Fahrbahnrand kritischer Streckenabschnitte für Motorradfahrer
Gerlach, Oderwald € 15,50
- V 153: Standstreifenfreigabe – Sicherheitswirkung von Umnutzungsmaßnahmen
Lemke € 13,50
- V 154: Autobahnverzeichnis 2006
Kühnen € 22,00
- V 155: Umsetzung der Europäischen Umgebungslärmrichtlinie in Deutsches Recht
Bartolomaeus € 12,50
- V 156: Optimierung der Anfeuchtung von Tausalzen
Badelt, Seliger, Moritz, Scheurl, Häusler € 13,00
- V 157: Prüfung von Fahrzeugrückhaltesystemen an Straßen durch Anprallversuche gemäß DIN EN 1317
Klöckner, Fleisch, Balzer-Hebborn € 14,50
- V 158: Zustandserfassung von Alleebäumen nach Straßenbaumaßnahmen
Wirtz € 13,50
- V 159: Luftschadstoffe an BAB 2006
Baum, Hasskelo, Siebertz, Weidner € 13,50
- V 160: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2005 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 25,50
- V 161: Quantifizierung staubedingter jährlicher Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen
Listl, Otto, Zackor € 14,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.