

Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 293

bast

Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen

von

Justin Geistefeldt
Sandra Hohmann
Anja Estel

Lehrstuhl für Verkehrswesen
Planung und Management
Ruhr-Universität Bochum

Unterauftragnehmer:
Wilko Manz
Strata GmbH
Karlsruhe

Als Anhang beigelegt:
Zeitbewertung in ökonomischen Planungsrechnungen
Herbert Baum, Thomas Kranz
Institut für Verkehrswissenschaft,
Universität Köln 2012.

Im Rahmen des Forschungsprojektes
FE 03.440/2008/AGB erstellt.

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 293

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, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 03.440/2008/AGB:
Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts erstellt:
Zeitbewertung in ökonomischen Planungsrechnungen.

Fachbetreuung:
Kerstin Lemke

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-344-2

Bergisch Gladbach, September 2017

Kurzfassung – Abstract

Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen

Die Bemessung von Verkehrsanlagen erfolgt üblicherweise anhand einer bestimmten Spitzenstunde (n -te Stunde). In Deutschland wird dafür bislang die 30. Stunde der Dauerlinie der Verkehrsnachfrage zugrunde gelegt.

Im Rahmen der Untersuchung wurden die Eignung der 30. Stunde als Bemessungsgrundlage geprüft und alternative Bemessungskonzepte analysiert. Für 50 Messquerschnitte von Bundesautobahnen wurden anhand einer stochastischen Ganzjahresanalyse mit dem Simulationsprogramm KAPASIM staubedingte Fahrtzeitverluste ermittelt. In Verbindung mit den jeweiligen Fahrtzweckanteilen und den entsprechenden Zeitkostensätzen wurden so für jede Stunde des Jahres volkswirtschaftliche Zeitkosten berechnet. Darüber hinaus wurde der Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad und den überlastungsbedingten Zeitverlusten durch eine Modellfunktion beschrieben.

Bei vorwiegend von Urlaubs- und Freizeitverkehr geprägten Strecken entsteht der Großteil der staubedingten Zeitkosten in den 30 höchstbelasteten Stunden des Jahres. Bei Strecken mit überwiegendem Pendlerverkehr treten dagegen auch jenseits der 300. Stunde noch Zeitverluste auf, der Anteil der überlastungsbedingten Zeitkosten in den ersten 30 Stunden der Dauerlinie beträgt zwischen ca. 40 bis 80 %.

Für die Wahl des in der Bemessungsstunde relevanten Schwerverkehrsanteils wird der Median im Bereich der $(n - 5)$ -ten bis $(n + 5)$ -ten Stunde der Dauerlinie der Verkehrsnachfrage empfohlen.

Für alternative Bemessungskonzepte konnten im Ergebnis der Untersuchung keine Vorteile im Vergleich zum Ansatz der n -ten Stunde festgestellt werden. Hinsichtlich der Wahl einer n -ten Stunde ergeben sich nur geringe Unterschiede zwischen der 30. und der 50. Stunde, so dass im Sinne einer Harmonisierung der europäischen Bemessungsverfahren ein Wechsel von der 30. zur 50. Stunde erwogen werden kann.

Definition of a suitable design volume for highway capacity analysis

Road traffic facilities are usually designed on the basis of one specific peak hour (n^{th} hour). Hitherto in Germany, the volume in the 30th hour of the traffic demand duration curve is used.

Within the investigation, the suitability of using the 30th hour as the design volume was examined and alternative concepts were analyzed. Based on a stochastic whole-year analysis with the simulation program KAPASIM, congestion-related travel time losses were calculated for 50 cross sections on German federal motorways. In conjunction with the respective trip purposes and travel time unit costs, travel time costs were estimated for each hour of the year. Furthermore, the relationship between the degree of saturation and the congestion-related travel time losses were described by a model function.

On sections bearing high volumes of leisure traffic, most of the congestion-related travel time costs occur in the 30 hours of the year with the highest demand. On sections with mainly commuter traffic, time losses are caused even beyond the 300th hour, and the proportion of congestion-related travel time losses during the first 30 hours of the duration curve is between 40 and 80 percent.

For the definition of the heavy vehicle percentage in the design hour, using the median value within the span between the $(n - 5)^{\text{th}}$ and $(n + 5)^{\text{th}}$ hour of the traffic demand duration curve is recommended.

Overall, it was found that alternative design concepts do not provide any key benefits in comparison with applying the traffic volume in the n^{th} hour. Regarding the choice of a specific design hour, the differences between the 30th and the 50th hour are relatively small. With regard to a harmonization of European highway design standards, applying the traffic volume in the 50th instead of the 30th hour for highway design can be considered.

Inhalt

| | | | | | |
|----------|--|-----------|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 7 | 5.3 | Modellierung der Verkehrsnachfrage mit tagesindividuellen Typganglinien | 19 |
| 1.1 | Ausgangslage | 7 | 5.4 | Modellierung der Verkehrszusammensetzung | 21 |
| 1.2 | Untersuchungsziel und Vorgehen | 7 | 5.4.1 | Zielsetzung | 21 |
| 2 | Eigenschaften der Verkehrsnachfrage | 8 | 5.4.2 | Verwendete Daten und Modelle | 22 |
| 2.1 | Definition der Verkehrsnachfrage | 8 | 5.4.3 | Ablauf und Festlegungen | 22 |
| 2.2 | Ganglinien und Dauerlinien der Verkehrsstärke | 8 | 5.4.4 | Ergebnisse | 24 |
| 2.3 | Deskriptive Analyse von Dauerlinien | 9 | 5.5 | Variation der Verkehrsnachfrage | 28 |
| 2.4 | Zusammenhänge zwischen Verkehrsstärke und -nachfrage | 12 | 6 | Methodik der Ganzjahresanalyse | 29 |
| 3 | Bemessungsverfahren | 12 | 6.1 | Auswahl des Berechnungsmodells | 29 |
| 3.1 | Ansätze zur Bemessung von Verkehrsanlagen | 12 | 6.2 | Beschreibung des Berechnungsmodells | 29 |
| 3.1.1 | Bemessung auf Basis der Belastung einer bestimmten Stunde | 12 | 6.2.1 | Grundlagen des Modells | 29 |
| 3.1.2 | Bemessung auf Basis einer häufig wiederkehrenden Stundenbelastung | 13 | 6.2.2 | Eingangsgrößen und Einstellungen | 30 |
| 3.1.3 | Bemessung auf Basis einer Belastungsverteilung | 13 | 6.2.3 | Berücksichtigung der stochastischen Eigenschaft der Kapazität | 30 |
| 3.2 | Anforderungen an das Bemessungsverfahren | 14 | 6.2.4 | Ermittlung überlastungsbedingter Verlustzeiten | 31 |
| 3.3 | Definition der zu untersuchenden Bemessungsszenarien | 15 | 6.3 | Ermittlung der Gesamtverlustzeit | 34 |
| 3.3.1 | Szenarienauswahl | 15 | 7 | Bewertung der Bemessungsansätze aus planerischer Sicht | 35 |
| 3.3.2 | n-te Stunde | 15 | 7.1 | Bemessung nach unterschiedlichen n-ten Stunden | 35 |
| 3.3.3 | Verfahren der n-ten Stunde getrennt nach Tagestypen oder abhängig vom Dauerlinientyp | 16 | 7.2 | Bemessung nach unterschiedlichen Prozentwerten des DTV | 37 |
| 3.3.4 | Perzentilwerte der Verkehrsstärke | 17 | 7.3 | Differenzierte Bemessung nach Tagestypen | 38 |
| 3.3.5 | Prozentwert des DTV | 17 | 7.4 | Ermittlung des bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteils | 40 |
| 4 | Datengrundlage | 17 | 8 | Bewertung der Bemessungsansätze aus volkswirtschaftlicher Sicht | 44 |
| 4.1 | Auswahl der Untersuchungsstellen | 17 | 8.1 | Ermittlung der volkswirtschaftlichen Kosten durch Zeitverluste | 44 |
| 4.2 | Aufbereitung der Daten | 18 | 8.2 | Ergebnisse der Ganzjahresanalyse | 46 |
| 5 | Modellierung der Verkehrsnachfrage | 18 | 8.3 | Zusammenhang zwischen Verkehrsnachfrage und Zeitverlusten | 47 |
| 5.1 | Vorgehensweise | 18 | 8.4 | Zusammenhang zwischen Verkehrsnachfrage und Verlustzeitkosten | 47 |
| 5.2 | Modellierung der Verkehrsnachfrage mit festen Typganglinien | 19 | | | |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 8.5 | Zusammenhang zwischen Auslastungsgrad und Verlustzeitkosten . | 52 |
| 8.6 | Zusammenhang zwischen Tagestyp und Verlustzeitkosten | 53 |
| 8.7 | Vergleich der Kostensätze..... | 57 |
| 9 | Ermittlung von Zeitverlusten in Stunden-Intervallen | 58 |
| 9.1 | Kontext der Richtlinien..... | 58 |
| 9.2 | Analytische Ermittlung von Fahrtzeiten auf Autobahnen | 59 |
| 9.2.1 | Verfahrensansatz..... | 59 |
| 9.2.2 | Fahrtgeschwindigkeit im fließenden Verkehr | 59 |
| 9.2.3 | Fahrtzeitverluste bei Überlastungen..... | 60 |
| 10 | Zusammenfassung und Fazit | 65 |
| | Literatur | 67 |
| | Anhang | 70 |
| | Anhang A: Verzeichnis der untersuchten Messquerschnitte | 71 |
| | Anhang B: Charakteristik der untersuchten Strecken..... | 72 |
| | Anhang C: Ergebnisse mit variiertes Verkehrsnachfrage (N30) | 77 |
| | Anhang D: Ergebnisse der vier Verkehrsnachfrage-Szenarien | 78 |

Als pdf-Datei beigefügt und im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter:
<http://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar:
HERBERT BAUM; THOMAS KRANZ:
Zeitbewertung in ökonomischen Planungsrechnungen.
Institut für Verkehrswissenschaft an
der Universität Köln, 2012.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

In Deutschland erfolgt die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen auf der Grundlage von Verfahren, die im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen HBS (FGSV, 2001) zusammengefasst sind. Grundsätzlich basieren diese Verfahren unabhängig von der Art der Verkehrsanlage im Kfz-Verkehr auf dem Konzept, die zu erwartende Verkehrsqualität bei einer bestimmten stündlichen Verkehrsnachfrage zu schätzen und zu bewerten.

Die Bemessung der Verkehrsanlagen erfolgt für eine definierte Bemessungsstunde (n -te Stunde), für die eine bestimmte Mindestqualität vorgegeben wird. Damit soll einerseits sichergestellt werden, dass der nachgefragte Verkehr hinreichend gut abgewickelt werden kann, gleichzeitig jedoch wird ein sparsamer Umgang mit Ressourcen verfolgt. D. h. eine Verkehrsanlage soll nicht nach der größten, je zu erwartenden Verkehrsnachfrage ausgelegt werden, weil die damit zur Verfügung gestellte Kapazität nur selten ausgenutzt wird, die Verkehrsanlage in ihrer Herstellung und Instandhaltung jedoch sehr große finanzielle und natürliche Ressourcen verbraucht. Aus diesem Grund werden Überschreitungen der Kapazität und damit Überlastungen in einigen ($n-1$) Stunden des Jahres akzeptiert.

Zur Ermittlung der Verkehrsqualität muss diejenige Verkehrsnachfrage vorgegeben werden, die auf einer Verkehrsanlage auftritt oder zukünftig zu erwarten ist. Aus den oben genannten Gründen entspricht diese Verkehrsnachfrage der n -höchsten Stundenbelastung des gesamten Jahres. Eine Bemessung der Verkehrsanlage entsprechend dieser Bemessungsverkehrsstärke hat zur Folge, dass in allen ($8.760 - n$) Stunden des Jahres mit gleicher oder kleinerer Verkehrsnachfrage die festgelegte Mindestqualität erreicht wird. Die Festlegung dieser Spitzenstunde obliegt dem Baulasträger. Mit dem Einführungserlass des HBS im Jahr 2002 wurde vom BMVBS für die Bundesfernstraßen die 30. Stunde als maßgebend festgelegt. Die 30. Stunde der Dauerlinie wird schon seit den 1970er Jahren als Kennwert in den Verkehrsstatistiken des Bundes ausgewiesen.

Die 30. Stunde wurde in der Vergangenheit als Bemessungsverkehrsstärke in der Annahme gewählt, dass etwa in diesem Bereich ein stetiger Verlauf der Dauerlinien einsetzt. Es kann davon ausgegangen werden, dass nach diesem Übergang von einem steileren zu einem flacheren Ver-

lauf der Dauerlinie ein Bereich regelmäßig wiederkehrender Verkehrsstärken vorliegt. Dabei handelt es sich um die für die Bemessung maßgebenden Verkehrsstärken. Allerdings erstreckt sich dieser Bereich des Übergangs bis zur 200. Stunde und darüber hinaus. Dauerlinien verschiedener Strecken weisen sehr heterogene Verläufe auf. So ist z. B. der „Knick“ in der Dauerlinie unterschiedlich breit und in verschiedenen Bereichen der Dauerlinie angesiedelt. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass die Wahl der 30. Stunde eine eher willkürliche Entscheidung war und ist (ANTUSCH, 1981).

1.2 Untersuchungsziel und Vorgehen

Ziel der Untersuchung ist es, die Eignung der 30. Stunde der Dauerlinie als Bemessungsverkehrsstärke zu überprüfen und Auswirkungen alternativer Bemessungsansätze zu quantifizieren und volkswirtschaftlich zu bewerten. Dazu werden zunächst internationale Vorgaben zur Wahl der Bemessungsverkehrsstärke zusammengetragen und Methoden zur Ermittlung der Verkehrsnachfrage analysiert. Die Bewertung der Auswirkungen einer Verwendung unterschiedlicher Bemessungsverkehrsstärken bzw. Belastungsverteilungen erfolgt anhand einer stochastischen Ganzjahresanalyse. Dabei werden die stochastischen Eigenschaften sowohl der Verkehrsnachfrage als auch der Kapazität der Verkehrsanlage berücksichtigt. Eine nach Nutzergruppen differenzierte Betrachtung der Verkehrsnachfrage erfolgt auf der Grundlage eines Verkehrsmodells. Die mittels Ganzjahresanalyse berechneten Verlustzeiten werden über detaillierte Zeitkostensätze volkswirtschaftlich bewertet.

Als Ergebnis wird eine Schätzung der volkswirtschaftlichen Nutzen bei einer bedarfsgerechten Kapazitätsbemessung im Straßenverkehr bzw. der volkswirtschaftlichen Kosten, wenn eine solche Bemessung nicht erfolgt, geliefert. Dieses Ergebnis ergibt sich aus den Fahrtzeitverlusten, die bei sehr hoher Verkehrsnachfrage entstehen, und den ökonomischen Wertansätzen für die Zeitverluste. Auf dieser Grundlage können Empfehlungen für die Eignung bestimmter Stunden zur Wahl einer Bemessungsverkehrsstärke abgeleitet und alternative Bemessungskonzepte beurteilt werden.

Die durchgeführten Untersuchungen beschränken sich auf die Bewertung von Strecken von Autobahnen, da für diese Verkehrsanlagen umfangreiche Messdaten zur Analyse von Ganglinien und Dauerlinien der Verkehrsstärke zur Verfügung stehen.

2 Eigenschaften der Verkehrsnachfrage

2.1 Definition der Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsnachfrage bildet die Grundlage für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Dabei ist es Ziel der Bemessung, die Verkehrsanlagen so auszulegen, dass der nachgefragte Verkehr mit hinreichender Verkehrsqualität abgewickelt werden kann. Dem gegenüber steht die angebotsorientierte Bemessung, bei der die Verkehrsanlagen mit einem vorgegebenem Leistungsvermögen geschaffen werden, ohne dass die genaue Verkehrsnachfrage bekannt ist. Dies kann einhergehen mit einer absichtlichen Unterdimensionierung (z. B. Straßenverkehrsanlagen in Großstädten) oder auch mit einer attraktivitätsfördernden Überdimensionierung (z. B. ÖPNV). Die angebotsorientierte Denkweise ist nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

Die Verkehrsnachfrage kann in verschiedener Weise definiert werden. Abstrakt könnte die Verkehrsnachfrage als diejenige Verkehrsstärke, die sich bei freiem Verkehrsfluss ohne gegenseitige Beeinflussung der Verkehrsteilnehmer ergeben würde, aufgefasst werden. Ein solcher Idealzustand des freien Verkehrs bedeutet, dass jeder Verkehrsteilnehmer seine Fahrt vom Start bis zum Ziel mit seiner jeweiligen Wunschgeschwindigkeit, d. h. ohne verkehrsbedingte Verzögerungen, durchführen kann. Dies würde ein Verkehrsnetz voraussetzen, in dem alle Strecken und Knotenpunkte eine deutlich höhere Kapazität haben als die nachgefragte Verkehrsstärke. Für eine isolierte

Betrachtung einzelner Elemente des Straßenverkehrsnetzes ist diese Modellvorstellung jedoch nicht praktikabel, weil die Verkehrsnachfrage nach dieser Definition eine rein theoretische Größe darstellt, die bereits bei geringer Verkehrsbelastung im Zulauf zu dem betrachteten Netzelement nicht mehr mit der Realität übereinstimmt. Auch im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen wird eine Betrachtung des freien Verkehrs als Referenzzustand kritisch gesehen (vgl. z. B. GOODWIN, 2003).

Im US-amerikanischen Highway Capacity Manual HCM (TRB, 2000, 2010) wird die Verkehrsnachfrage als der während einer Zeiteinheit am Anfang der betrachteten Straßenverkehrsanlage ankommende Verkehr definiert. Dagegen entspricht die Verkehrsstärke dem abfließenden Verkehr. Diese Definition der Verkehrsnachfrage wird auch in den Bemessungsverfahren des deutschen HBS (FGSV, 2001) sowie im Konzept der Ganzjahresanalyse des Verkehrsablaufs (BRILON und ZURLINDEN, 2003) zugrunde gelegt und daher in der vorliegenden Untersuchung übernommen.

2.2 Ganglinien und Dauerlinien der Verkehrsstärke

Ganglinien der Verkehrsstärke beschreiben die zeitliche Abfolge der beobachtbaren Verkehrsstärken an einem bestimmten Straßenquerschnitt für einen festgelegten Zeitraum in einer bestimmten zeitlichen Auflösung (Bild 2-1). Sie können empirisch durch Verkehrszählungen ermittelt werden.

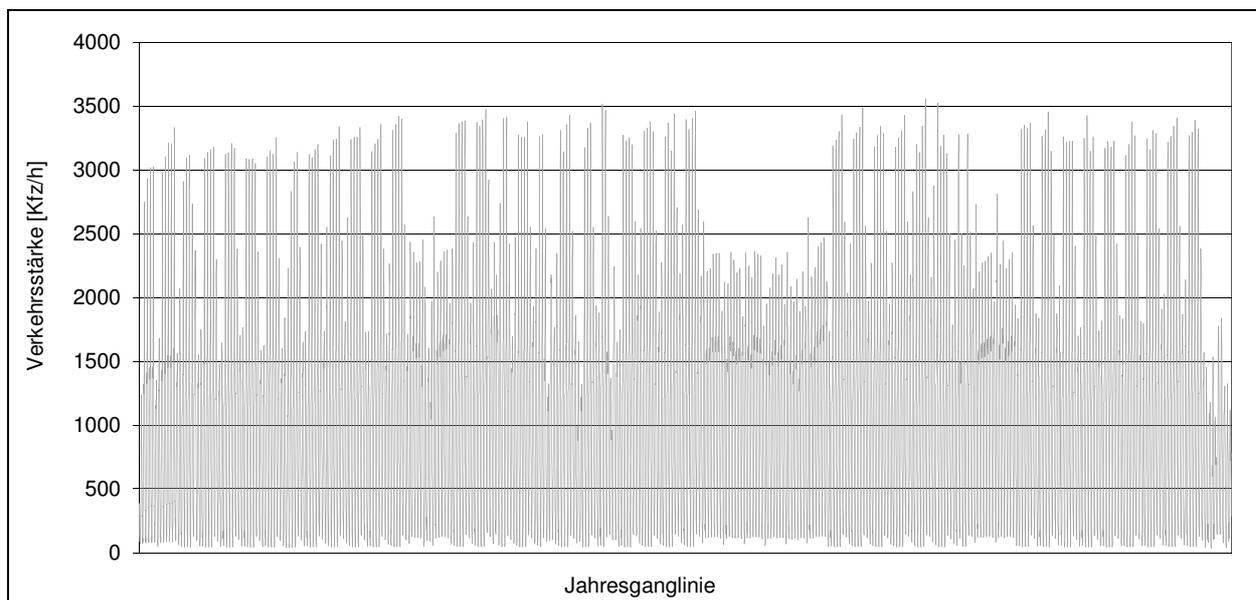


Bild 2-1: Jahresganglinie der Verkehrsstärke (Beispielquerschnitt: A66/4ZW)

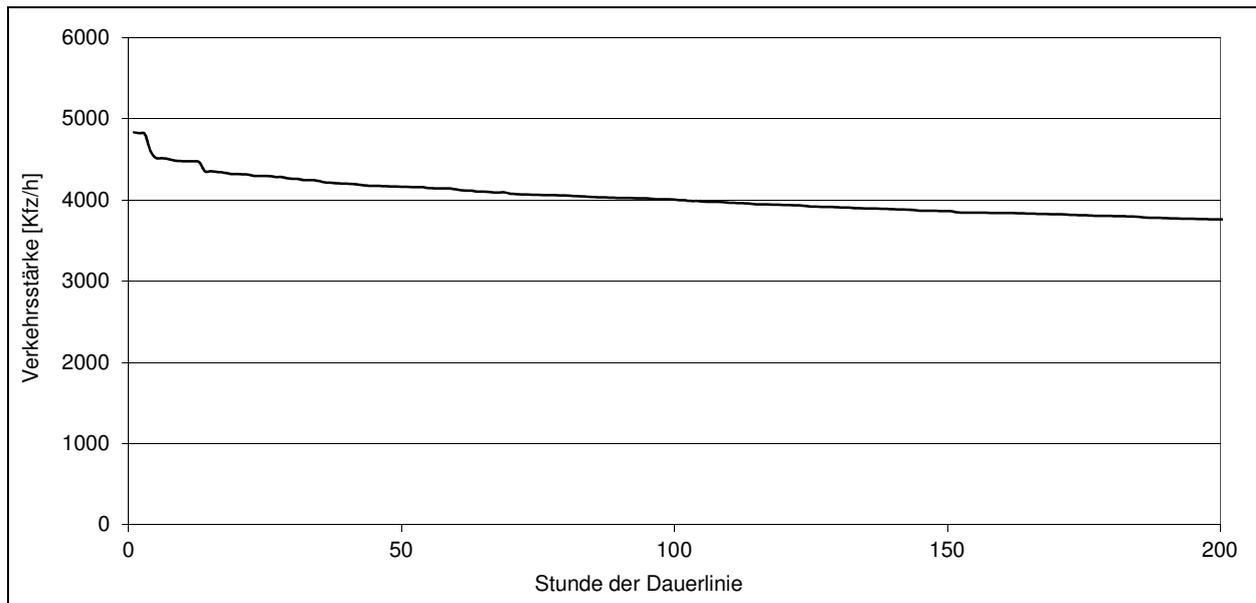


Bild 2-2: Dauerlinie der Verkehrsstärke (Beispielquerschnitt: A3/1IDN)

Durch die fortschreitende Ausrüstung der Bundesfernstraßen mit automatischen Dauerzählstellen stehen umfangreiche Datenquellen zur Ermittlung von Ganglinien zur Verfügung. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Daten hat sich in den vergangenen Jahren stetig verbessert (FGSV, 2006).

Dauerlinien der Verkehrsstärke enthalten nach ihrer Größe absteigend sortierte Verkehrsstärken über einen bestimmten Zeitraum. Für die Bemessung von Verkehrsanlagen werden die 8.760 stündlichen Verkehrsstärken über ein Jahr dargestellt (Bild 2-2). Damit lassen sich die höchste bzw. eine n-te Verkehrsstärke ablesen. Darüber hinaus können weitere wesentliche Kennwerte und Aussagen über die Verkehrszusammensetzung auf einer Strecke aus dem Verlauf einer Dauerlinie abgeleitet werden.

Die ersten (höchsten) Werte dieser Rangreihe der Verkehrsstärken sind dabei erfahrungsgemäß auf besondere Ereignisse (z. B. Ferienbeginn, Veranstaltungen) oder Auswirkungen von Verkehrsstörungen (z. B. Umleitungen bei unfallbedingten Streckensperrungen) zu beziehen.

2.3 Deskriptive Analyse von Dauerlinien

Eine umfassende Forschungsarbeit zur deskriptiven Analyse von Dauerlinien wurde von ARNOLD und BÖTTCHER (2005) durchgeführt. Schwerpunkt der Arbeit ist die Typisierung von Dauerlinien in Abhängigkeit von der vorwiegenden Verkehrszusammensetzung auf der Strecke sowie die Ermittlung wesentlicher, die Dauerlinie beschrei-

bender Kennwerte. Die Untersuchung basiert auf einer Analyse umfangreicher empirischer Daten von Dauerzählstellen aus den Jahren 1999 und 2000. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden Dauerlinien anhand eines Kennwertes, dem sog. d_{30} -Faktor, typisiert. Dieser Wert beschreibt das Verhältnis der Verkehrsstärke in der 30. Stunde der Dauerlinie zum durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV). Da der DTV bei Bemessungsaufgaben in der Praxis häufig aus vorliegenden Verkehrsprognosen oder Zählungen verfügbar ist, stellen die d_{30} -Faktoren einen wesentlichen Beitrag zur Schätzung geeigneter Bemessungsverkehrsstärken dar. Die Typisierung nach SCHMIDT (1976) erfolgte allerdings nur für den Gesamtquerschnitt.

ARNOLD und BÖTTCHER (2005) untersuchten deshalb, inwieweit die Dauerlinientypen nach SCHMIDT (1976) noch gültig sind. Aufgrund einer sehr ungleichen Besetzung der Dauerlinientypen durch Messquerschnitte (Analysejahr 2000) wurden neue Abgrenzungen zwischen den Typen vorgenommen. Die vier bis dahin verwendeten Typen mit vorwiegend hohen Freizeitverkehren wurden zu zwei Typen zusammengefasst, während die von Misch- und Berufsverkehr geprägten Typen weiter verfeinert wurden. Darüber hinaus wurde eine richtungsgetrennte Typisierung mithilfe clusteranalytischer Verfahren vorgenommen. Die Differenzierung lässt sich nicht durch einen einzelnen Kennwert ableiten. Die Zuweisung zu einem richtungsgetrennten Dauerlinientyp ist abhängig vom Dauerlinienniveau (niedrig, hoch, sehr hoch) sowie vom Verlauf der Dauerlinie in den 200 höchstbelasteten Stunden (gerade, konvex, konkav). In Kombination beider Eigenschaften

ergeben sich sechs statistisch signifikant unterschiedliche Typen. Diese sind in Bild 2-3 dargestellt und werden in Tab. 2-1 näher charakterisiert. Die Zuweisung von Strecken zu den sechs Dauerlinientypen anhand des Verhältnisses der Verkehrsstärken der Ränge 50, 100, 150 und 200 zum Wert der Verkehrsstärke des Rangs 30 wird in Kapitel 4.1 näher erläutert.

Strecken des Dauerlinientyps A zeichnen sich durch einen steil absinkenden Verlauf der d-Faktoren in den 200 höchstbelasteten Stunden des

Jahres aus. Das bedeutet, dass ein sehr hoher Anteil des Verkehrsaufkommens in wenigen Stunden des Jahres nachgefragt wird. Da diese Verkehrsstärken meist deutlich oberhalb der Bemessungsverkehrsstärke liegen, können diese hohen Belastungen zu besonders schwerwiegenden und lang anhaltenden Stauereignissen führen. Ein niedriger, nahezu horizontaler Verlauf hingegen weist auf eine sehr gleichmäßige Verteilung der stündlichen Verkehrsbelastungen in den ersten Stunden der Dauerlinie hin.

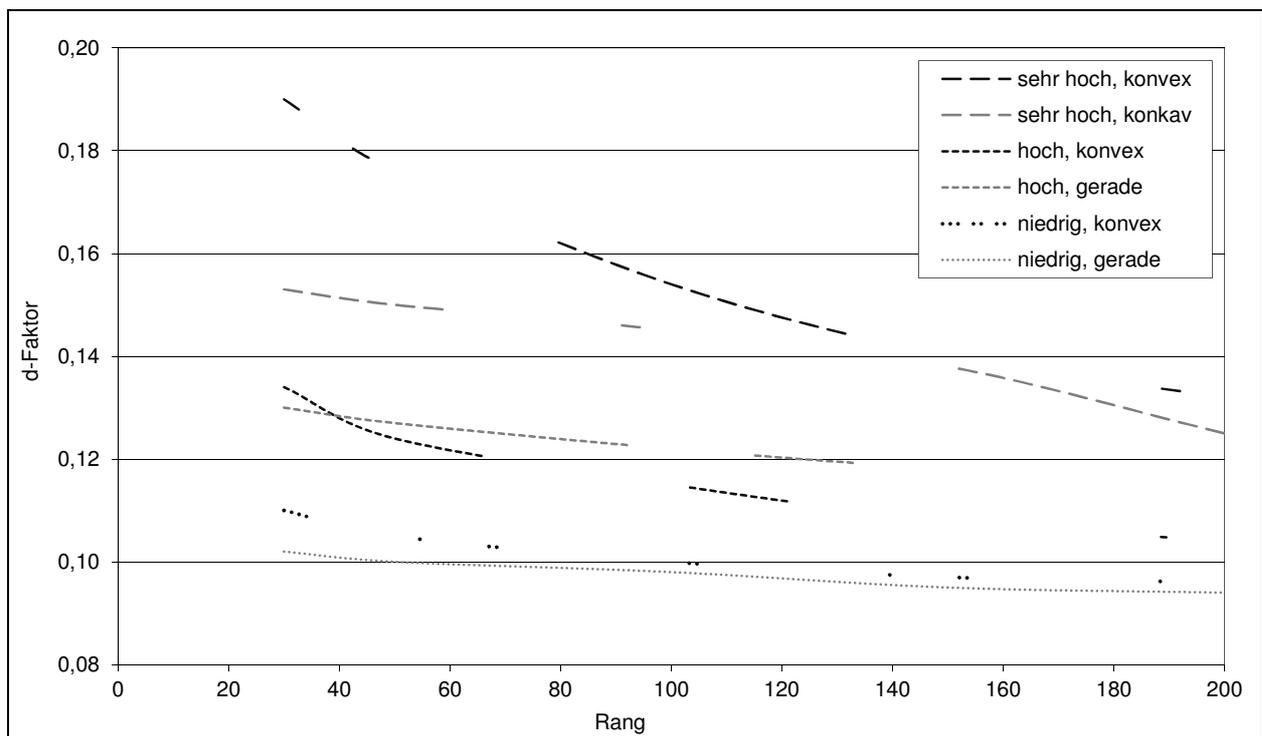


Bild 2-3: Darstellung richtungsgetrennter Dauerlinien (nach ARNOLD und BÖTTCHER, 2005; der d-Faktor beschreibt das Verhältnis der Verkehrsstärke in der jeweiligen Stunde zum durchschnittlichen täglichen Verkehr)

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

Tab. 2-1: Charakteristika richtungsgetrennter Dauerlinien (nach ARNOLD und BÖTTCHER, 2005)

Zusätzlich zur Typisierung richtungsgetrennter Dauerlinientypen leiteten ARNOLD und BÖTTCHER (2005) weitere Dauerlinien-Kennwerte wie z. B. die d_{50} -, d_{100} - oder d_{200} -Faktoren her. Mit Hilfe dieser Faktoren können die Verkehrsstärken in einer bestimmten Stunde der Dauerlinie für jede beliebige Strecke geschätzt werden, sofern deren DTV-Wert bekannt ist. Die Dauerlinienfaktoren (d-Faktoren) der nachrangigen Stunden werden unabhängig vom Dauerlinientyp nach Gleichung (2-1) durch einen Regressionsansatz geschätzt.

$$d_N = \beta_0 + \beta_1 \cdot \lg(\text{DTV}) + \beta_2 \cdot \lg(\text{DTV}_{\text{SV}}) + \beta_3 \cdot \text{fer} \\ + \beta_4 \cdot \text{fer}^2 + \beta_5 \cdot \text{bso} + \beta_6 \cdot \text{bso}^2 + \beta_7 \cdot \text{rifakt}^2 \\ + \beta_8 \cdot \text{tgfakt}^2 + u \quad (2-1)$$

mit

d_N = Dauerlinienfaktor für die n-te Stunde

β_i = Modellparameter

DTV = durchschnittlicher täglicher Verkehr [Kfz/d]

DTV_{SV} = durchschnittlicher täglicher Schwerverkehr [Lkw/d]

fer = Ferienfaktor

bso = Sonntagsfaktor

rifakt = Richtungsfaktor

tgfakt = Tagesganglinienfaktor

u = Konstante

Die Faktoren werden als Parameterschätzwerte angegeben. Sie haben folgende Bedeutung:

- Ferienfaktor: Verhältnis zwischen den DTV-Werten an Urlaubswerktagen und an Werktagen,
- Sonntagsfaktor: Verhältnis der Verkehrsmengen an Sonntagen zur Verkehrsmenge der Tagesgruppe Di-Do im Normalzeitbereich,
- Richtungsfaktor: Verhältnis der nachmittäglichen Verkehrsmenge (15:00 bis 18:00 Uhr) eines normalen Werktags (Di-Do) zwischen der betrachteten Fahrtrichtung und der Gegenrichtung,
- Tagesganglinienfaktor: Kennwert zur Beschreibung der Verteilung der Verkehre auf die morgendlichen (7:00 bis 9:00 Uhr) und nachmittäglichen (15:00 bis 18:00 Uhr) Stunden eines normalen Werktags (Di-Do).

Weiterhin wurden von ARNOLD und BÖTTCHER (2005) die Konsequenzen einer Umstellung des deutschen Bemessungsverfahrens von der 30. auf

die 50. Stunde untersucht. Diese Analyse erfolgte weitestgehend qualitativ. Demnach sind die Auswirkungen eines Wechsels auf die 50. Stunde in bedeutendem Maße von der Charakteristik der Strecke abhängig.

Bei Strecken mit hohen Verkehrsstärken an Werktagen (Pendlerstrecken) sind nur geringe Unterschiede in der Bemessungsverkehrsstärke zu beobachten. Die Verkehrsstärken der 50. Stunde liegen bei diesen Strecken lediglich um 1 bis 2,5 % unter denen der 30. Stunde.

Strecken mit starkem Urlaubs- und Ausflugsverkehr hingegen reagieren weitaus sensibler auf einen Wechsel zur 50. Stunde als Bemessungsgrundlage. Grund dafür ist, dass diese Strecken deutlich größere Verkehrsstärkeunterschiede von im Mittel 8 % aufweisen. Hinzu kommt, dass die Verkehrsstärkeunterschiede zwischen der 50. Stunde und dem Mittel der 49 unberücksichtigten Stunden gerade bei Strecken dieser Charakteristik erheblich sind. Eine Bemessung nach der 50. Stunde kann deshalb zu bedeutenden und lang anhaltenden Überlastungssituationen mit hohen Verlustzeiten führen.

Diese Aussagen lassen sich auch aus den Verläufen der richtungsgetrennten Dauerlinientypen ableiten: Je steiler der Abfall der Dauerlinie auf den ersten 200 Rängen der stündlichen Verkehrsstärke verläuft, desto stärker unterscheiden sich die Verkehrsstärken in der 30. und der 50. Stunde. Und je deutlicher dieser Unterschied ist, desto stärkere Überlastungen werden die 49 höher belasteten Stunden unter Umständen hervorrufen.

Somit ist das wesentliche Ergebnis der Analyse von ARNOLD und BÖTTCHER (2005), dass die Auswirkungen eines Wechsels auf die 50. Stunde sehr stark von der Verkehrszusammensetzung der einzelnen Strecke nach Fahrtzwecken abhängig sind. Daraus könnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass eine Auswahl der Bemessungsverkehrsstärke je nach Streckencharakteristik erfolgen sollte.

Auch Forschungsergebnisse von HEIDEMANN, WIMBER (1982) und PINKOFSKY (2006) zeigen, dass sich Dauerlinien der Verkehrsnachfrage je nach der Lage eines Querschnitts im Netz aus unterschiedlichen Fahrtzwecken zusammensetzen. Eine Zerlegung der Gesamtvolumina in die einzelnen Stunden eines Jahres differenziert nach zugrunde liegenden Fahrtzwecken wurde jedoch bislang bei derartigen Betrachtungen nicht durchgeführt.

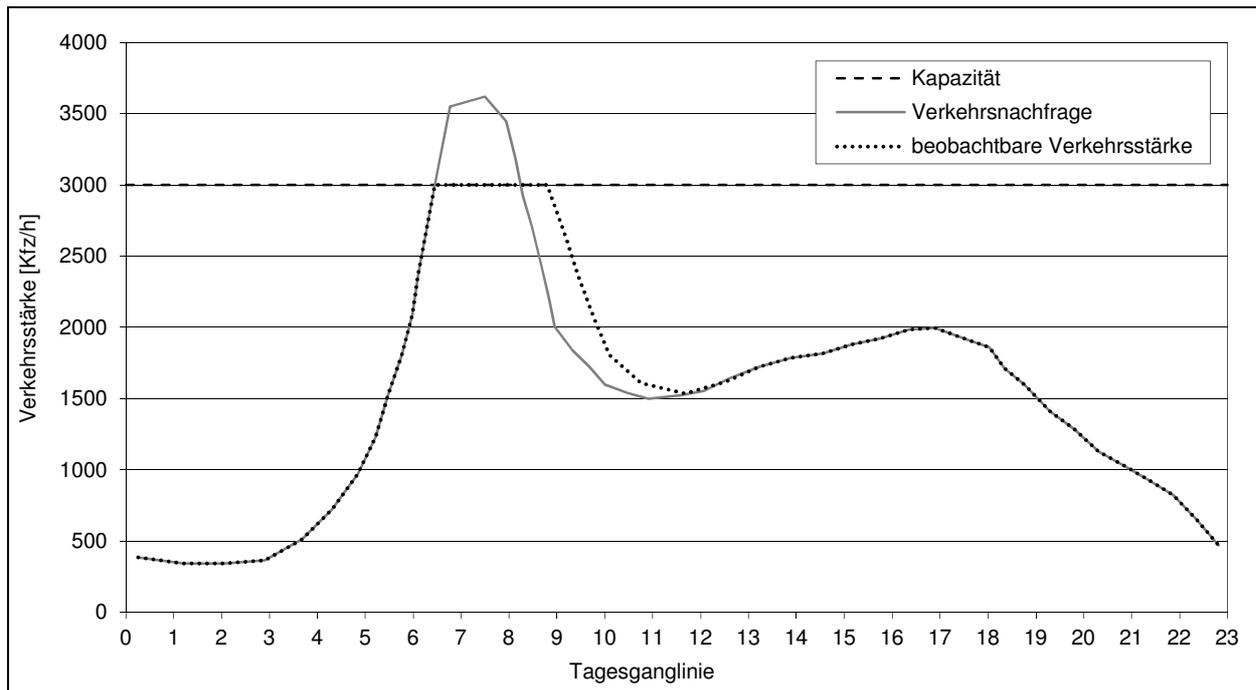


Bild 2-4: Zeitliche Verschiebung der Verkehrsstärke durch Überlastung (nach BRILON und ESTEL, 2008)

2.4 Zusammenhänge zwischen Verkehrsstärke und -nachfrage

Bei der Betrachtung von empirischen Ganglinien der Verkehrsstärke muss berücksichtigt werden, dass bei einer Überlastung einer Strecke die abfließende Verkehrsstärke durch die Kapazität der Verkehrsanlage begrenzt wird. Dabei kommt es zu einer zeitlichen und unter Umständen auch zu einer räumlichen Verlagerung des Verkehrs. Der Effekt der zeitlichen Verschiebung ist für den vereinfachten Fall einer konstanten Kapazität in Bild 2-4 veranschaulicht. Für eine Beobachtung von Überlastungssituationen bedeutet dies, dass die an Zählstellen stromabwärts des Engpasses erhobenen Verkehrsstärken nicht der Verkehrsnachfrage entsprechen. Daher können die beobachteten Auswirkungen der Überlastung (Verlustzeiten, Rückstaulängen, Geschwindigkeitsverluste) nicht einem bestimmten Verkehrsnachfragewert zugeordnet werden.

Bei Daten von Zählstellen auf Autobahnen ergibt sich damit das Problem, dass die Verkehrsnachfrage im Bereich von Überlastungssituationen nicht direkt aus den an Dauerzählstellen erfassten Verkehrsstärken abgeleitet werden kann. Zur Modellierung der Verkehrsnachfrage sind daher Schätzverfahren erforderlich. Mögliche Ansätze zur Ermittlung von Ganglinien der Verkehrsnachfrage anhand gemessener Verkehrsstärken werden in Kapitel 5 dargestellt.

3 Bemessungsverfahren

3.1 Ansätze zur Bemessung von Verkehrsanlagen

3.1.1 Bemessung auf Basis der Belastung einer bestimmten Stunde

Die im HBS (FGSV, 2001) dargestellten Bemessungsverfahren basieren auf dem Konzept der n -ten Stunde. Dabei wird im Kfz-Verkehr die Verkehrsnachfrage in der n -ten Stunde der Dauerlinie als Bemessungsverkehrsstärke verwendet. Das Bezugsintervall entspricht einer vollen Stunde. Gemäß Einführungserlass zum HBS 2001 ist im Kfz-Verkehr für Bundesfernstraßen in der Regel die 30. Stunde als maßgebende Bemessungsstunde anzusetzen. Dieses Konzept basiert auf dem Prinzip einer wirtschaftlich effizienten Planung der Verkehrsanlagen. Diese werden nicht entsprechend der maximal zu erwartenden Verkehrsnachfrage ausgebaut, sondern es wird eine Überlastung der Anlage in $n-1$ Stunden des Jahres in Kauf genommen. Die mittlere Verkehrsnachfrage in den für die Bemessung unberücksichtigten Stunden liegt im Mittel ungefähr 5 % über der Bemessungsverkehrsstärke in der 30. Stunde ($q_{1-29} = 1,05 \cdot q_{30}$). Je nach Streckencharakteristik bezüglich der maßgebenden Nutzung schwankt dieser Wert jedoch beträchtlich zwischen 1 % bei starkem Pendlerverkehr und 10 % bei starkem Ferien- und Freizeitverkehr. Die durch die Ver-

kehrsnachfrage in den ersten 10 bis 20 Stunden der Dauerlinie verursachten Überlastungssituationen treten zumeist zufällig und als sich nicht wiederholende Einzelereignisse im Zusammenhang mit Unfällen, Umleitungen oder Witterungseinflüssen auf (ARNOLD und BÖTTCHER, 2005).

In europäischen Verkehrsstatistiken wird als Spitzenstundenbelastung die Verkehrsstärke in der 50. Stunde angegeben, nur für Deutschland wird ersatzweise die Verkehrsstärke in der 30. Stunde ausgewiesen. Die Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) empfiehlt die Verwendung der Verkehrsstärke in der 50. Stunde als Bemessungsverkehrsstärke für Europastraßen (UNECE 2003, 2009).

Beispiele aus dem europäischen Ausland zeigen, dass für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen unterschiedliche Ansätze hinsichtlich der Wahl der maßgebenden Bemessungsstunde existieren. In Frankreich wird in den aktuellen Entwurfs- und Bemessungsrichtlinien für Autobahnen (SETRA, 2000) die 30. Stunde als maßgebende Bemessungsstunde definiert. Auch in Schweden werden Straßenverkehrsanlagen üblicherweise nach der Verkehrsstärke in der 30. Stunde ausgelegt (BERGH et al., 2011). In Dänemark wird für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen entweder die 30. oder 100. Stunde angesetzt. Die 30. Stunde wird dabei oft für Straßenverkehrsanlagen außerhalb von Ballungsräumen zugrunde gelegt, während bei Anlagen mit starkem Pendlerverkehr eher die 100. Stunde verwendet wird (SORENSEN, 2011). In Polen wurde wie in Deutschland bis 1990 die Verkehrsstärke in der 30. Stunde als Bemessungsgrundlage verwendet. Seit 1990 wird jedoch die Verkehrsnachfrage der 50. Stunde für die Bemessung angesetzt. Die Verwendung der 50. Stunde war von 1995 bis 1999 in den polnischen Richtlinien festgeschrieben (GDDKIA, 1995) und findet in der Praxis noch immer Verwendung, obwohl das aktuelle Regelwerk (MINISTER TRANSPORTU, 1999) keine konkreten Vorgaben bezüglich der Bemessungsstunde mehr enthält. In Bulgarien wird ebenfalls die Verkehrsstärke der 50. Stunde für die Bemessung herangezogen (UNECE, 1995).

3.1.2 Bemessung auf Basis einer häufig wiederkehrenden Stundenbelastung

Obwohl die Idee der 30. Stunde aus dem ersten HCM von 1950 stammt, schreibt das heutige US-amerikanische Regelwerk HCM (TRB, 2000, 2010) keine feste Stunde für die Bemessung vor. Als Bemessungsverkehrsstärke wird stattdessen die Ver-

kehrsnachfrage der am häufigsten wiederkehrenden Spitzenstunde vorgeschlagen. Mit dieser Vorgehensweise kann die Bemessung stärker an die im konkreten Anwendungsfall vorliegenden Gegebenheiten und den Verlauf der zugehörigen Dauerlinie angepasst werden.

Das niederländische Handbuch „Capaciteiten Infrastructuur Autosnelwegen“ (RIJKSWATERSTAAT, 2011) empfiehlt für die Bemessung von Autobahnen die Verwendung einer über die Werktagsspitzenstunden eines Jahres gemittelten Verkehrsstärke. Diese Verkehrsstärke kann aus Zählungen über alle Werktagsspitzenstunden (morgens oder abends) eines Jahres gemittelt oder aber aus einem Umlegungsmodell abgeleitet werden. Um die Infrastruktur auch für zukünftige Verhältnisse leistungsfähig zu gestalten, wird für Planungen eine Prognose der Verkehrsströme aus Prognosemodellen empfohlen. Bei Projekten von Rijkswaterstaat wird dazu ein „Neues regionales Modell“ (NRM) verwendet. Das NRM gibt Verkehrsstärken für die beiden Spitzenstunden im modellierten Jahr aus, allerdings als 2-Stundenwert. Zur Umwandlung in einen für die Bemessung maßgebenden Stundenwert wird der Faktor 0,55 verwendet. Verkehrszählungen liegen fast immer als Stundenwerte vor. Liefert ein Verkehrsmodell oder eine Verkehrszählung Verkehrsstärken nur als Tageswerte, werden überschlägig 10 % des Tagesverkehrs als Spitzenstundenwert angesetzt. Sind aus einer Zählung Verkehrsstärken der Morgen- und Abendspitze bekannt, wird für die Bestimmung der Verkehrsqualität der jeweils höhere Wert als maßgebend angenommen. Anhand der so ermittelten Bemessungsverkehrsstärke ist zu prüfen, ob ein Auslastungsgrad von maximal 80 % erreicht wird.

3.1.3 Bemessung auf Basis einer Belastungsverteilung

Die Bemessung von Verkehrsanlagen in der Schweiz erfolgt anhand einer Ganzjahresanalyse der Fahrtzeiten (BERNARD und AXHAUSEN, 2008). Als Ergebnis werden die über gewichtete Kostensätze der Zahlungsbereitschaft berechneten jährlichen Fahrtzeitkosten als Bewertungsgröße ermittelt. Dabei werden neben den zeitlichen Schwankungen der Verkehrsnachfrage im Jahresverlauf auch kurzfristige Variationen berücksichtigt.

Als Eingangsgrößen werden die 8.760 stündlichen Verkehrsnachfragewerte eines Jahres benötigt. Wenn diese nicht genauer bekannt sind, werden sie entsprechend der Schweizer Gangliniennorm (VSS, 1999) aus der durchschnittlichen täglichen

Verkehrsstärke ermittelt. Um kurzfristige Schwankungen nachbilden zu können, wird die Standardabweichung der Verkehrsstärke berücksichtigt. Für alle Stunden des Jahres wird eine mittlere Geschwindigkeit ohne Überlastung in Abhängigkeit von der Auslastung für den Personen- und den Schwerverkehr ermittelt. Im Falle einer Überlastung – definiert als das Überschreiten der Kapazität durch die Verkehrsnachfrage – erfahren die Verkehrsteilnehmer für die durchschnittliche Dauer eines Staus eine Reduktion der mittleren Geschwindigkeit. Dabei wird auch die Kapazität als Zufallsgröße aufgefasst. Für drei verschiedene Klassen des Schwerverkehrsanteils werden Parameter zur Beschreibung der Kapazität als Normalverteilung bereitgestellt. Die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einem Zusammenbruch kommt, sowie die Staudauer und die Geschwindigkeitsreduktion können anhand von Diagrammen in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad bestimmt werden. Die Diagramme resultieren aus der Analyse empirischer Stauereignisse von 14 Autobahnen in der Schweiz. Die Reduktion der Geschwindigkeit wird für den Personen- und den Schwerverkehr getrennt ermittelt. Durch die verringerte Geschwindigkeit im Stau kommt es zu einer verlängerten Fahrtzeit. Aus dem Verhältnis von freiem zu gestautem Verkehr lässt sich ein Erwartungswert der mittleren Geschwindigkeit für einen gegebenen stündlichen Auslastungsgrad getrennt nach Personen- und Schwerverkehr bestimmen.

Darüber hinaus wird eine geplante Fahrtgeschwindigkeit berechnet, die der Reisezeitplanung der Verkehrsteilnehmer entsprechen soll. Demnach werden mögliche Verkehrszusammenbrüche in der Zeitplanung berücksichtigt, so dass im Falle des Ausbleibens jeglicher Überlastung eine Verfrühung eintritt. Die geplante Fahrtgeschwindigkeit wird durch eine Gewichtung der Zahlungsbereitschaft zur Verminderung von Verfrühungen und dem Kostensatz für Verspätungen ermittelt. Auf Basis dieser Geschwindigkeiten lassen sich die mittleren generalisierten Fahrtzeitkosten pro Person und Stunde berechnen. Diese können auf eine bestimmte Streckenlänge bezogen und über alle Stunden des Jahres aufsummiert werden. Die resultierenden Gesamtfahrtzeitkosten dienen als vergleichbares, kontinuierliches Bewertungskriterium.

Vorteil dieser Bemessung ist es, verschiedene Alternativen, unterschiedliche Verkehrsanlagen sowie eine Folge von Verkehrsanlagen vergleichend bewerten zu können. Allerdings erfolgt die Ermittlung der Fahrtzeiten und -kosten jeder Stunde unabhängig vom Verkehrszustand der vorherigen Stunde. Auswirkungen einer Überlastung auf Folgeintervalle werden demnach nur sehr indirekt –

über mittlere Staudauern und Geschwindigkeitsreduktionen – nachgebildet.

3.2 Anforderungen an das Bemessungsverfahren

Ein praktikables Bemessungsverfahren beruht auf zwei wesentlichen Säulen: Einfach zu ermittelnden Eingangsgrößen sowie einem übersichtlichen und nachvollziehbaren Rechenverfahren. Im Vordergrund der vorliegenden Untersuchung steht die Ermittlung einer geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage für Autobahnen. Bisher wird im Einführungsersass zum HBS (FGSV, 2001) die 30. Stunde für die Bemessung von Autobahnen vorgegeben. Dazu kann für vorhandene Autobahnen die Bemessungsverkehrsstärke aus den in kurzen zeitlichen Abständen erscheinenden Verkehrsstatistiken der Dauerzählstellen der BAST oder der manuellen Straßenverkehrszählung (SVZ) abgegriffen werden. Um auch in Zukunft den Aufwand für den Anwender nicht unnötig zu erhöhen, sollte die als geeignet erscheinende Bemessungsverkehrsstärke entweder durch einen einfachen Algorithmus aus Daten von Dauerzählstellen abgeleitet oder aus anderen zur Verfügung stehenden Daten berechnet werden können.

Neben der Ermittlung der Bemessungsverkehrsstärke ist auch der in der maßgebenden Stunde anzusetzende Schwerverkehrsanteil festzulegen, da dieser ein notwendiger Parameter für die Anwendung des Bemessungsverfahrens ist. Der Schwerverkehrsanteil variiert deutlich im Verlauf eines Tages. Darüber hinaus treten an Sonn- und Feiertagen infolge des Fahrverbots für schwere Lkw systematisch geringere Schwerverkehrsanteile auf als an Werktagen. Die Verwendung eines mittleren Schwerverkehrsanteils zur Schätzung der Kapazität und zur Ermittlung des Auslastungsgrades kann nicht als ausreichend genau angesehen werden. Da der Schwerverkehrsanteil mit zunehmender Gesamtverkehrsstärke in der Regel abnimmt, führt die Verwendung des mittleren Schwerverkehrsanteils zu einer deutlichen Unterschätzung der Kapazität und der Verkehrsqualität. Aus diesem Grund ist auch für die Ermittlung des maßgebenden Schwerverkehrsanteils ein einfaches und praktikables Konzept aufzustellen.

Bei der Bemessung nach der n-ten Stunde ist zu prüfen, ob es sich in dieser Stunde maßgeblich um Pendler- oder Urlaubs-/ Freizeitverkehr handelt. Diese Differenzierung ist für die richtige Zuordnung der dann in dieser Stunde anzusetzenden Kapazität der Verkehrsanlage von Bedeutung. So konnte in zahlreichen Untersuchungen festgestellt

werden, dass die Kapazität deutlich von der Fahrtweckzusammensetzung abhängig ist, die im HBS näherungsweise durch das Lagekriterium (innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen) berücksichtigt wird. Im Pendlerverkehr ergibt sich durch die gute Streckenkenntnis der Fahrer sowie durch ein ausgeglichenes Fahrerkollektiv in der Regel eine höhere Kapazität als bei starkem Urlaubs-/ Freizeitverkehr. Auf Strecken, auf denen sowohl starke Pendlerströme als auch starker Urlaubs- oder Freizeitverkehr auftreten, ist es möglich, dass in nachrangigen Stunden $n > n_B$ (mit n_B = Bemessungsstunde) trotz der geringeren Verkehrsstärke eine höhere Auslastung aufgrund der geringeren Kapazität resultiert. In diesem Fall kann in einer solchen Stunde trotz der geringeren Verkehrsnachfrage eine schlechtere Qualität des Verkehrsablaufs vorliegen. Ziel ist es deshalb, das Auftreten dieser Konstellation an den vorliegenden Messquerschnitten zu untersuchen und Möglichkeiten für eine konsistente Betrachtung der Verkehrsqualität zu finden. Ein möglicher Ansatz dazu besteht in einer getrennten Bewertung einer maßgeblichen Spitzenstunde im Werktags- und im Urlaubsverkehr. In diesem Fall kann die jeweils geeignete Kapazität in die Berechnung einfließen. Hier sollen über das Verfahren der Ganzjahresanalyse sinnvolle Vorschläge für die dann jeweils maßgebende Bemessungsverkehrsstärke für die zwei Zeitbereiche erarbeitet werden.

Eine ähnliche Problemstellung ergibt sich bei genauerer Betrachtung des Schwerverkehrs. Auch dessen Variation über alle Stunden eines Jahres führt zu veränderlichen maßgebenden Kapazitäten und damit über die Berechnung der Auslastung u. U. zu unterschiedlichen Qualitätsstufen.

Eine mögliche Alternative zur Verwendung der Dauerlinie der Verkehrsstärke zur Bestimmung der maßgebenden Bemessungsverkehrsstärke stellt die Generierung einer Dauerlinie der Auslastungsgrade dar. Grundlage dafür ist die Kenntnis aller Stundenbelastungen, der zugehörigen Schwerverkehrsanteile und des jeweiligen Zeitbereiches (Werktag oder Sonn-/ Feiertag). Mit diesen Informationen kann für jede Strecke die Kapazität und damit die Auslastung in jeder Stunde ermittelt werden. Durch Neusortierung der 8.760 Stunden des Jahres kann eine Dauerlinie erzeugt werden, die eine konsistente Bewertung der Verkehrsqualität ermöglicht. Aus dieser Dauerlinie könnte dann eine entsprechende n-te Stunde ausgewählt werden. Bei dieser Vorgehensweise ist jedoch zu bedenken, dass in der Generierung der resultierenden Dauerlinie letztendlich ebenfalls eine vollständige Ganzjahresanalyse enthalten ist, um am Ende die Qualität des Verkehrsablaufs in einer

einzelnen Stunde zu bestimmen. Hier stellt sich die Frage nach der praktischen Umsetzbarkeit. Darüber hinaus ist dieses Vorgehen nur bei Strecken mit einer Dauerzählstelle anwendbar.

3.3 Definition der zu untersuchenden Bemessungsszenarien

3.3.1 Szenarienauswahl

Um Alternativen zu dem in Deutschland gängigen Verfahren der 30. Stunde zu analysieren, werden unterschiedliche Methoden zur Bestimmung der Bemessungsverkehrsstärke q_B entwickelt. Dabei sollte gewährleistet sein, dass mit den in der Praxis zur Verfügung stehenden Daten oder mit geeigneten Bemessungsvorgaben eine Bemessungsverkehrsstärke ermittelt werden kann. Ausgewählt werden zur weiteren Betrachtung daher folgende Methoden:

- n-te Stunde (bestimmte Stunde der Dauerlinie der Verkehrsnachfrage, vorrangig die 30., 50. und 100. Stunde),
- Verfahren der n-ten Stunde getrennt nach Tagestypen oder abhängig vom Dauerlinientyp,
- Perzentile der Verkehrsstärke,
- Prozentwerte des DTV.

3.3.2 n-te Stunde

Angelehnt an das zurzeit gebräuchliche Verfahren wird die Methode der n-ten Stunde näher untersucht. Dabei werden die Werte für die 30., 50. und 100. Stunde geprüft. In der Untersuchung von ARNOLD und BÖTTCHER (2005) werden Schätzmodelle für die Berechnung der Verkehrsnachfrage in diesen Stunden zur Verfügung gestellt.

Als Beispiel ist in Bild 3-1 die Dauerlinie einer dreistreifigen Richtungsfahrbahn im Zuge der Autobahn A 3 in Hessen zwischen den Anschlussstellen Bad Camberg und Limburg-Süd dargestellt. Hierbei lässt sich der Unterschied für die Bemessungsstunden erkennen, die im weiteren Verlauf untersucht werden. Für diesen Bemessungsansatz werden die stündlichen Verkehrsstärken über ein Jahr benötigt, die dann der Größe nach sortiert als Dauerlinie abgebildet werden können. Bei der Sortierung der Verkehrsstärke in Form einer Dauerlinie geht der zeitliche Zusammenhang der einzelnen Stunden verloren. Dieser Zusammenhang ist allerdings wesentlich für die verkehrliche Wirkung von Überlastungen. So verursacht z. B. eine durchgehende Überlastung in zwei aufeinanderfolgenden Stunden eine höhere Überlastung als zwei getrennte Überlastungen.

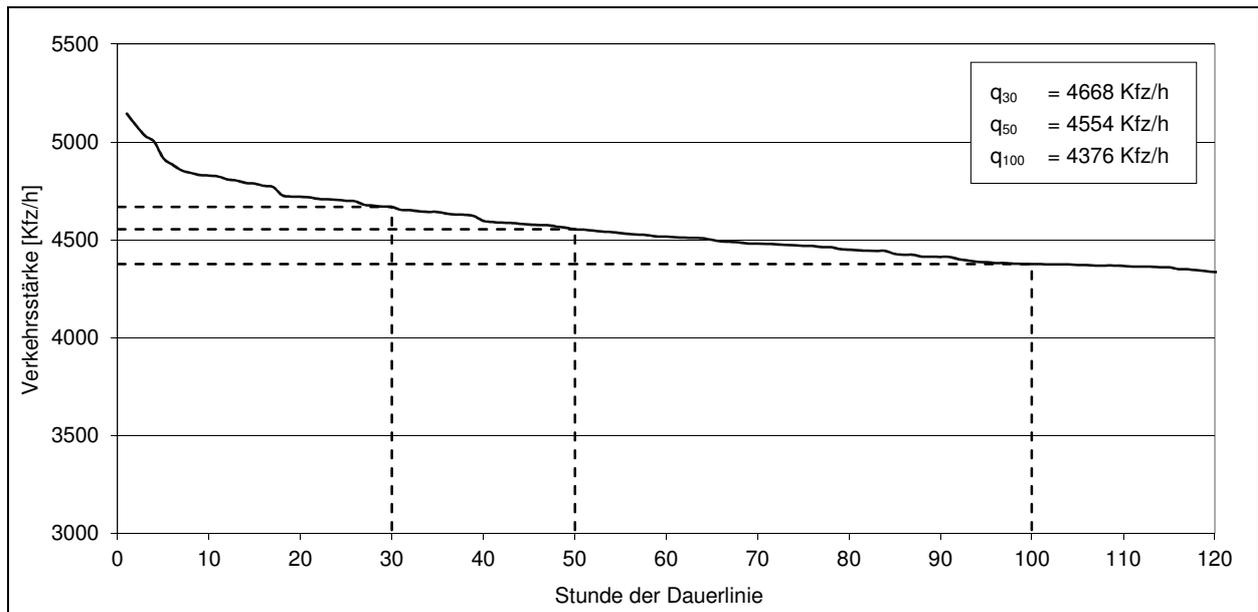


Bild 3-1: Wert der 30., 50. und 100. Stunde der Dauerlinie (Beispielquerschnitt: A3/13IDN)

ander folgenden Stunden in der Regel höhere Zeitverluste als die Summe von zwei Überlastungsereignissen in einzelnen Stunden.

3.3.3 Verfahren der n-ten Stunde getrennt nach Tagestypen oder abhängig vom Dauerlinientyp

Zusätzliche Bemessungsszenarien ergeben sich aus der Überlegung, für unterschiedliche Zeitbereiche (Werktage und Urlaubswerktag sowie Samstag, Sonn- und Feiertage) oder für Strecken mit unterschiedlicher Fahrtzweckzusammensetzung (überwiegend Pendler- und Geschäftsverkehr oder Urlaubs- und Freizeitverkehr) verschiedene Bemessungsstunden anzusetzen.

Zur Verdeutlichung des Einflusses der unterschiedlichen Fahrtzweckzusammensetzungen ist in Tab. 3-1 die Verteilung der Zeitbereiche auf die ersten 50 Stunden der Dauerlinie am Beispiel von sechs Messquerschnitten, an denen die Verteilung der Verkehrsnachfrage den Dauerlinientypen (DLT) A bis F entspricht, dargestellt. Dabei steht die Abkürzung W in der Darstellung für Werktag, U für Urlaubswerktag, Sa für Samstag und S für

Sonntag. Erkennbar ist, dass abhängig vom Dauerlinientyp unterschiedliche Tagestypen in den ersten 50 Stunden der Dauerlinie dominieren. Bei den Dauerlinientypen A und B überwiegen die Samstage, Sonn- und Feiertage in den oberen Bereichen der Dauerlinie, bei den Dauerlinientypen C bis F hingegen sind es die Werktage. Somit kommt einerseits eine Bemessung nach einer n-ten Stunde für Werktag und Urlaubswerktag sowie einer m-ten Stunde für Samstag, Sonn- und Feiertage in Betracht (siehe Kapitel 7.3). Andererseits wäre der Ansatz einer unterschiedlichen Bemessungsstunde für Strecken mit DLT A und B sowie DLT C bis F denkbar (siehe Kapitel 8.4).

Die Fahrtzweckgruppen werden bei allen weiteren Betrachtungen wie folgt voneinander abgegrenzt:

- Werktag (W): alle Werktag (Mo-Fr) außerhalb der Schulferien des jeweiligen Bundeslandes,
- Urlaubswerktag (U): alle Werktag in den Schulferien des jeweiligen Bundeslandes,
- Samstag (Sa): alle Samstag,
- Sonn- und Feiertage (S): alle Sonn- und Feiertage des jeweiligen Bundeslandes.

| DLT | Beispiel | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | | |
|-----|-----------|----|---|----|----|---|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|
| A | 2540R2 | S | S | S | S | S | S | S | S | Sa | S | S | S | S | S | S | Sa | S | Sa | S | S | S | S | S | S | S | Sa | Sa | S | Sa | S | S | S | S | S | Sa | S | S | S | S | S | | | |
| B | MQ9051RIG | Sa | S | Sa | Sa | S | Sa | S | Sa | S | S | S | Sa | Sa | Sa | S | Sa | Sa | Sa | S | S | Sa | S | S | S | S | S | Sa | Sa | S | S | S | Sa | Sa | S | S | S | S | Sa | Sa | S | S | S | Sa | S | S | S | S | S | S | Sa | | |
| C | A45/1EHS | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | U | W | W | W | W | U | U | W | W | W | W | W | W | W | W | U | U | W | W | W | W | U | W | W | W | U | W |
| D | A3/9DBN | U | W | W | W | U | W | W | W | U | W | U | W | W | W | U | W | U | U | W | W | U | W | W | W | W | W | U | W | W | W | U | U | W | W | W | W | W | W | W | U | U | W | W | U | U | W | W | W | W | U | W | |
| E | A3/1IDN | W | W | W | W | W | W | W | U | W | U | U | U | W | U | W | U | U | W | W | W | W | W | W | U | U | U | S | W | U | W | W | W | U | W | W | W | U | W | W | W | S | U | W | U | U | W | W | U | W | U | W | |
| F | A66/4ZO | W | W | W | U | W | W | W | W | W | U | U | W | U | U | W | U | U | W | U | U | W | W | W | W | W | W | W | W | W | U | U | W | W | W | W | W | W | U | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W | W |

Tab. 3-1: Verteilung der Zeitbereiche (W = Werktag, U = Urlaubswerktag, Sa = Samstag, S = Sonntag) auf die ersten 50 Stunden der Dauerlinie in Abhängigkeit vom Dauerlinientyp

3.3.4 Perzentilwerte der Verkehrsstärke

Statt die statistische Häufigkeit einer bestimmten Verkehrsbelastung über die n-te Stunde auszu-drücken, können auch sog. Perzentile verwendet werden. Das Perzentil q_p bedeutet: In p % aller Stunden des Jahres ist die Verkehrsnachfrage kleiner (oder gleich) der Verkehrsstärke q_p . Per Definition entspricht dabei die Verkehrsstärke in der 30. Stunde dem 99,66 %-Perzentil. Eine Bemessung nach einem bestimmten Perzentilwert wäre somit lediglich die Umrechnung einer n-ten Stunde. Da die n-te Stunde bei Betrachtung einer Dauerlinie ein Wert ist, der anschaulicher und einfacher zu berechnen ist, wird die Bemessung nach einer n-ten Stunde vorgezogen und der Ansatz eines Perzentilwertes verworfen.

3.3.5 Prozentwert des DTV

In einer weiteren Methode werden verschiedene prozentuale Anteile der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) betrachtet. Hierfür werden die Werte der 30. Stunde aller Messquer-schnitte in Prozentwerte des DTV umgerechnet, um einen Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Ansätzen zu erkennen. Dabei zeigt sich, dass die Verkehrsstärken in der 30. Stunde üblicherweise zwischen 8 % und 20 % des DTV betragen. Die Darstellung erinnert an die traditionelle, in der Praxis gebräuchliche Faustformel, nach der die Bemessungsverkehrsstärke vereinfacht als 10 % des DTV angesetzt wird. Für diesen Bemessungsansatz wird lediglich die Angabe bzw. Schätzung des DTV benötigt.

4 Datengrundlage

4.1 Auswahl der Untersuchungsstellen

Für die empirische Analyse makroskopischer Kenngrößen des Verkehrsablaufs wurden Daten automatischer Dauerzählstellen verwendet, da diese eine Ermittlung der Verkehrsnachfrage über einen langen Zeitraum mit vertretbarem Aufwand ermöglichen. Dazu wurden insgesamt 50 Untersuchungsstrecken ausgewählt. Die Auswahl erfolgte in erster Linie mit der Maßgabe, ein möglichst breites Spektrum verschiedener Fahrtzweckzusammensetzungen abzubilden. Der Untersuchung lagen in erster Linie Daten von Dauerzählstellen an Autobahnen in Hessen zugrunde. Da jedoch

davon ausgegangen werden muss, dass im hessischen Autobahnnetz nicht alle Fahrtzwecke in ausreichendem Umfang vertreten sind, wurde ergänzend auf Messstellen aus Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Bayern zurückgegriffen.

Um zu gewährleisten, dass die gewählten Querschnitte sowohl Strecken mit einem sehr hohen Anteil an Urlaubs- und Ausflugsverkehr als auch Strecken mit vorwiegend Berufsverkehr abbilden, wurde vorab der Dauerlinientyp für die infrage kommenden Messstellen bestimmt. Die bislang gebräuchliche Typisierung für richtungsgemeinsame Dauerlinien anhand des d_{30} -Faktors wurde hier nicht vorgenommen, da die Werte richtungsgetreunt untersucht wurden. Um in diesem Fall eine Zuordnung zum Dauerlinientyp vorzunehmen, muss primär der Verlauf der Dauerlinien in den ersten Stunden betrachtet werden. Dies geschieht, indem das Verhältnis der Verkehrsstärken der Ränge 50, 100, 150 und 200 zum Wert der Verkehrsstärke des Rangs 30 bestimmt wird. Diese Verhältnisse können gemäß der Einteilung nach ARNOLD und BÖTTCHER (2005) einem Dauerlinientyp zugeordnet werden (vgl. Tab. 4-1). Bei der Ermittlung der Verhältniswerte wurde die Dauerlinie der empirischen Verkehrsstärkewerte verwendet, nachdem die fehlenden Werte ergänzt wurden (vgl. Kapitel 4.2). Somit ist gewährleistet, dass die Dauerlinie die realen Verkehrsverhältnisse abbildet und gleichzeitig vollständig beschrieben ist.

Nach Einteilung der verfügbaren Messstellen in Dauerlinientypen wurde eine Auswahl vorgenommen, mit der ein möglichst breites Spektrum an verschiedenen Verkehrszusammensetzungen abgebildet wird. ARNOLD und BÖTTCHER (2005) haben in ihrer Untersuchung von knapp 3.500 Messstellen an Bundesautobahnen einen hohen Anteil des Dauerlinientyps D aufgezeigt. Daher wurde bei der Auswahl der Messstellen ebenfalls darauf geachtet, eine große Zahl an Beispielen für diesen Dauerlinientyp einzubeziehen. Tab. 4-2 zeigt die Anteile der Dauerlinientypen für die von ARNOLD und BÖTTCHER betrachteten Messstellen im Vergleich mit der jeweiligen Anzahl der für die vorliegende Untersuchung ausgewählten Messstellen.

| DLT | 50 | 100 | 150 | 200 |
|-----|---------|----------|----------|----------|
| A | - 8,0 % | - 19,6 % | - 26,4 % | - 31,1 % |
| B | - 6,8 % | - 15,1 % | - 19,4 % | - 22,4 % |
| C | - 3,5 % | - 8,3 % | - 11,3 % | - 13,5 % |
| D | - 1,7 % | - 4,6 % | - 6,9 % | - 8,9 % |
| E | - 2,4 % | - 6,2 % | - 9,4 % | - 12,3 % |
| F | - 1,8 % | - 5,3 % | - 9,6 % | - 18,7 % |

Tab. 4-1: Mittlere Prozentwerte, um die die Verkehrsstärken der Ränge 50, 100, 150 und 200 unter der Verkehrsstärke der 30. Stunde liegen (nach ARNOLD und BÖTTCHER, 2005)

| DLT | Anteil Dauerlinientyp | Anzahl gewählter Messstellen |
|-----|-----------------------|------------------------------|
| A | 3,9 % | 2 |
| B | 11,6 % | 6 |
| C | 19,0 % | 6 |
| D | 34,4 % | 30 |
| E | 26,8 % | 5 |
| F | 4,2 % | 1 |

Tab. 4-2: Anteilswerte der Dauerlinientypen nach ARNOLD und BÖTTCHER (2005) und Anzahl der gewählten Messstellen

Für die Analyse des Verkehrsablaufs wurden somit 50 Messquerschnitte aus Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein und Bayern ausgewählt. Die Autobahnabschnitte, auf denen die Messquerschnitte liegen, weisen unterschiedliche Streckencharakteristika auf. So unterscheiden sie sich z. B. in der Steigung, der Fahrstreifenanzahl und der Geschwindigkeitsregelung. Darüber hinaus variieren auf der Strecke in Abhängigkeit von ihrer räumlichen Lage die hauptsächlich maßgebenden Fahrtzwecke.

Im Anhang sind die untersuchten Messquerschnitte durch Angaben zur jeweiligen Streckencharakteristik detailliert beschrieben.

4.2 Aufbereitung der Daten

Grundlage für die Untersuchung bildeten Daten automatischer Dauerzählstellen an Bundesautobahnen. Zur Verfügung standen Daten aus dem Jahr 2007. Diese Daten wurden von der Verkehrszentrale Hessen, dem Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein, dem Landesamt für Straßenbau und Verkehr Mecklenburg-Vorpom-

mern und der Autobahndirektion Südbayern bereitgestellt. Die in 1- bzw. 5-Minuten-Intervallen vorliegenden Messdaten wurden jeweils in Stundenwerte für das betrachtete Jahr aggregiert. Durch Sortierung nach der Verkehrsstärke kann so unter anderem die Verkehrsstärke für eine bestimmte n-te Stunde ermittelt werden. Darüber hinaus ist der Anteil des Schwerverkehrs aus jedem Intervall bekannt.

Im Zuge der Aufbereitung der Daten wurde zum Teil ein erheblicher Anteil fehlender Intervalle festgestellt. Fehlende Intervalle wurden mit dem Verfahren der tagesindividuellen Typganglinien gefüllt (vgl. Kapitel 5.3). Bei langfristigem Ausfall der Detektoren wurde jedoch auf die Verwendung des betreffenden Querschnitts verzichtet. Ausgeschlossen wurden auch solche Messstellen, bei denen während der Aufbereitung der Daten längerfristige Beeinträchtigungen der Datenerfassung, z. B. aufgrund einer Baustelle, ermittelt wurden.

5 Modellierung der Verkehrsnachfrage

5.1 Vorgehensweise

Ziel der Nachfragemodellierung ist es, eine realitätsnahe Abbildung der Verkehrsnachfrage, disaggregiert nach Fahrtzwecken sowie Pkw und Schwerverkehr, zu erzeugen. Das Vorgehen kann in drei Teile gegliedert werden: In einem ersten Schritt werden aggregierte Nachfrageganglinien aus empirischen Daten von Dauerzählstellen erzeugt. Parallel dazu wird in einem zweiten Schritt ein verhaltensorientiertes Verkehrsmodell erstellt, welches die zeitliche Verteilung von Ortsveränderungen disaggregiert für verschiedene Fahrzeuggruppen sowie Fahrtzwecke erzeugt. Im Anschluss werden die empirisch begründeten Nachfrageganglinien zur Kalibrierung der disaggregierten Ganglinien verwendet. Als Ergebnis werden Nachfrageganglinien für verschiedene Fahrtzwecke und Fahrzeuggruppen erzeugt, die in der Summe der Nachfrageganglinie entsprechen, die auf Basis der Dauerzählstellen für eine bestimmte Strecke ermittelt wurde.

5.2 Modellierung der Verkehrsnachfrage mit festen Typganglinien

Ein möglicher Ansatz zur Modellierung der Verkehrsnachfrage ist die Überlagerung realer Tageswerte mit typisierten Ganglinien (BRILON und ZURLINDEN, 2003). Dabei werden Typganglinien nach PINKOFSKY (2002, 2006) verwendet. Grundgedanke dieses Verfahrens ist es, dass im Falle einer Überlastung die gemessene Verkehrsstärke nicht zwingend der Verkehrsnachfrage entsprechen muss. Da sich jedoch Überlastungen in den meisten Fällen nach einigen Stunden wieder auflösen und praktisch nie über einen Tag hinaus andauern, kann davon ausgegangen werden, dass die Tagesverkehrsstärke der Tagesnachfrage entspricht. Dies gilt, solange es nicht in Folge der Überlastung zu räumlichen Verkehrsverlagerungen kommt. Stehen keine empirischen Tageswerte zur Verfügung, werden sie durch die Verwendung von typisierten Wochen- und Jahresganglinien geschätzt.

Die Erzeugung der Ganglinie der Verkehrsnachfrage erfolgt durch Multiplikation der Anteilswerte der Typganglinien mit dem durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV):

$$q_N(i,j,k) = \text{DTV} \cdot 365 \cdot f_T(i) \cdot f_W(j) \cdot f_J(k) \quad (5-1)$$

mit

$$q_N(i,j,k) = \text{Verkehrsnachfrage} \quad [\text{Kfz/h}]$$

$$\text{DTV} = \text{Durchschnittlicher täglicher Verkehr (richtungsbezogen)} \quad [\text{Kfz/d}]$$

$$f_T(i) = \text{Anteilswert der typisierten Tagesganglinie für Stunde } i \text{ (} i = 1 \dots 24 \text{)}$$

$$f_W(j) = \text{Anteilswert der typisierten Wochenanglinie für Tag } j \text{ (} j = 1 \dots 7 \text{)}$$

$$f_J(k) = \text{Anteilswert der typisierten Jahresganglinie für Woche } k \text{ (} k = 1 \dots 52 \text{)}$$

Für die Ermittlung von Verkehrsnachfragewerten des Normalzeitbereichs hat sich dieses Verfahren als geeignet herausgestellt. Insbesondere die Behandlung von Feiertagen, von Tagen vor und nach einem Feiertag sowie von sogenannten Brückentagen (Tag zwischen einem Feiertag und einem Wochenende) erweist sich jedoch als problematisch. Durch die Verwendung der empirischen Tageswerte wird zwar die mitunter eintretende Verkehrsabnahme oder -zunahme an diesen Tagen im Vergleich zum Normalwerktag berücksichtigt, jedoch weisen die Ferien- und Feiertage zum Teil deutlich andere Muster im Tagesverlauf auf. Die vereinfachte Vorgehensweise nach Tab. 5-1 ist somit relativ ungenau.

| Tag | Verwendete Typganglinie |
|-------------------------|-------------------------|
| Feiertag | Sonntag |
| Tag vor einem Feiertag | Freitag |
| Tag nach einem Feiertag | Montag |
| Brückentag | Samstag |

Tab. 5-1: Im Bereich von Feiertagen verwendete Typganglinien (nach BRILON und ZURLINDEN, 2003)

Bei Ferienwerktagen ist das Ausmaß der Unterschiede zwischen modellierter Verkehrsnachfrage und empirischen Daten von der überwiegenden Fahrtzweckzusammensetzung abhängig. Wird eine Strecke überwiegend von Pendlern befahren, so unterscheidet sich lediglich die absolute Höhe der Verkehrsstärke im Vergleich zum Normalwerktag, der Verlauf der Ganglinie stimmt jedoch weitestgehend überein. Je stärker der Einfluss von Freizeitverkehren zunimmt, desto deutlicher weichen die relativen Tagesganglinien der Verkehrsstärke im Vergleich zum Normalwerktag ab. Dies hat zur Folge, dass bei einer Übertragung der Typganglinien des Normalwerktag auf Feiertage und Ferienwerktag die zu erwartende Spitzenstundennachfrage unter Umständen erheblich unter- oder überschätzt wird.

Darüber hinaus ist aufgrund der begrenzten Anzahl an gegebenen Typganglinien eine passende Zuordnung in vielen Fällen nicht möglich. Liegt der gegebene Wert zwischen zwei möglichen Typganglinien, kommt es zu systematischen Unter- oder Überschätzungen der Nachfragewerte.

5.3 Modellierung der Verkehrsnachfrage mit tagesindividuellen Typganglinien

Da bei der Ermittlung des Ausmaßes von Überlastungen vor allem eine genaue Abbildung der Verkehrsspitzen erforderlich ist, wird hier für die Modellierung von Ganglinien der Verkehrsnachfrage das Verfahren nach BRILON und GEISTEFELDT (2007) verwendet. Dabei werden die einzelnen Werte der Ganglinie der Verkehrsnachfrage durch Überlagerung realer Tageswerte der Verkehrsstärke mit tagesindividuellen Typganglinien erzeugt. Die tagesindividuelle Typganglinie wird als Linearkombination aus drei Basis-Typganglinien generiert. Dabei werden für jeden Tag individuelle Typganglinien nachgebildet, wodurch die Variabilität der zeitlichen Verteilung Berücksichtigung findet.

| Tagestyp | Basistypen | | |
|---------------|------------|---|---|
| Montag | A | C | F |
| Normalwerktag | A | C | F |
| Freitag | A | C | F |
| Samstag | A | F | G |
| Sonntag | A | F | G |

Tab. 5-2: Basis-Typganglinien (BRILON und GEISTEFELDT, 2007)

$$f(i) = c_1 \cdot f_1(i) + c_2 \cdot f_2(i) + c_3 \cdot f_3(i) \quad (5-2)$$

mit

$$f(i) = \text{Anteilswert der gesuchten Typganglinie in Stunde } i \text{ (} i = 1, 2, \dots, 24 \text{)} \quad [-]$$

$$f_1(i), f_2(i), f_3(i) = \text{Anteilswerte der Basis-Typganglinien } 1, 2, 3 \quad [-]$$

$$c_1, c_2, c_3 = \text{Linearfaktoren} \quad [-]$$

Die Basis-Typganglinien werden so festgelegt, dass durch die Linearkombination eine hohe Variationsbreite an möglichen Ganglinienverläufen abgedeckt ist. Gewählt werden hierfür passende Typganglinien von PINKOFSKY (2002, 2006), vgl. Tab. 5-2.

Für die Bestimmung der Linearfaktoren werden drei Gleichungen benötigt. Die erste Gleichung resultiert aus der Randbedingung, dass die Summe der Linearfaktoren (d. h. die Summe der Anteilswerte der generierten tagesindividuellen Typganglinie) den Wert 1 ergeben muss:

$$c_1 + c_2 + c_3 = 1 \quad (5-3)$$

Da die Struktur von Tagesganglinien an Werktagen (Montag bis Freitag) in erster Linie durch die Höhe der Morgen- und Nachmittagsspitze bestimmt wird, können die Anteile der Verkehrsnachfrage in der Morgen- und Nachmittagsspitzenstunde oder in mehrstündigen Zeiträumen im Bereich der Morgen- und Nachmittagsspitze als

Bestimmungsgrößen verwendet werden. An Normalwerktagen können z. B. die Zeitbereiche zwischen 6 und 10 Uhr am Morgen sowie zwischen 15 und 19 Uhr am Nachmittag angesetzt werden. Die Bestimmungsgrößen lauten dann:

$$\sum_{i=7}^{10} (c_1 \cdot f_1(i) + c_2 \cdot f_2(i) + c_3 \cdot f_3(i)) = q_{7-10} \quad (5-4)$$

$$\sum_{i=16}^{19} (c_1 \cdot f_1(i) + c_2 \cdot f_2(i) + c_3 \cdot f_3(i)) = q_{16-19} \quad (5-5)$$

mit

$$q_{7-10} = \text{Anteil des Verkehrs in der 7. - 10. Stunde (d. h. 6 - 10 Uhr) am Tagesverkehr} \quad [-]$$

$$q_{16-19} = \text{Anteil des Verkehrs in der 16. - 19. Stunde (d. h. 15 - 19 Uhr) am Tagesverkehr} \quad [-]$$

Die analog für die anderen Wochentage zu verwendenden Zeitbereiche sind Tab. 5-3 zu entnehmen. An Sonntagen werden die Mittagsspitze zwischen 12 und 16 Uhr sowie die Abendspitze zwischen 16 und 20 Uhr verwendet, da dort die Verkehrsspitzen im Vergleich zu Werktagen später auftreten.

Sofern jeweils ein mehrstündiger Zeitraum im Bereich der Spitzenstunden betrachtet wird, kann die Bestimmung der Linearfaktoren in Gleichung (5-2) anhand realer Verkehrsdaten erfolgen. Dabei wird davon ausgegangen, dass Überlastungen nur im Bereich der Spitzenbelastungen auftreten und sich innerhalb weniger Stunden (d. h. an Werktagen vor 10 oder 19 Uhr) wieder abbauen. Diese Annahme trifft für Überlastungen, die ausschließlich durch eine hohe Verkehrsnachfrage verursacht werden, in den meisten Fällen zu. Bei Überlastungen infolge von Unfällen oder anderen Sonderereignissen kann das Verfahren allerdings zu Ungenauigkeiten oder Implausibilitäten führen.

Durch Multiplikation der tagesindividuellen Typganglinie mit empirischen Tageswerten können so analog zum bisher gebräuchlichen Verfahren nach BRILON und ZURLINDEN (2003) die Stunden-

| Tagestyp | Morgenspitzenstunde | Nachmittagsspitzenstunde |
|---------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Montag | 7. - 10. Stunde (6 - 10 Uhr) | 16. - 19. Stunde (15 - 19 Uhr) |
| Normalwerktag | 7. - 10. Stunde (6 - 10 Uhr) | 16. - 19. Stunde (15 - 19 Uhr) |
| Freitag | 7. - 10. Stunde (6 - 10 Uhr) | 16. - 19. Stunde (15 - 19 Uhr) |
| Samstag | 10. - 13. Stunde (9 - 13 Uhr) | 14. - 17. Stunde (13 - 17 Uhr) |
| Sonntag | 13. - 16. Stunde (12 - 16 Uhr) | 17. - 20. Stunde (16 - 20 Uhr) |

Tab. 5-3: Maßgebende Spitzenstunden (BRILON und GEISTEFELDT, 2007)

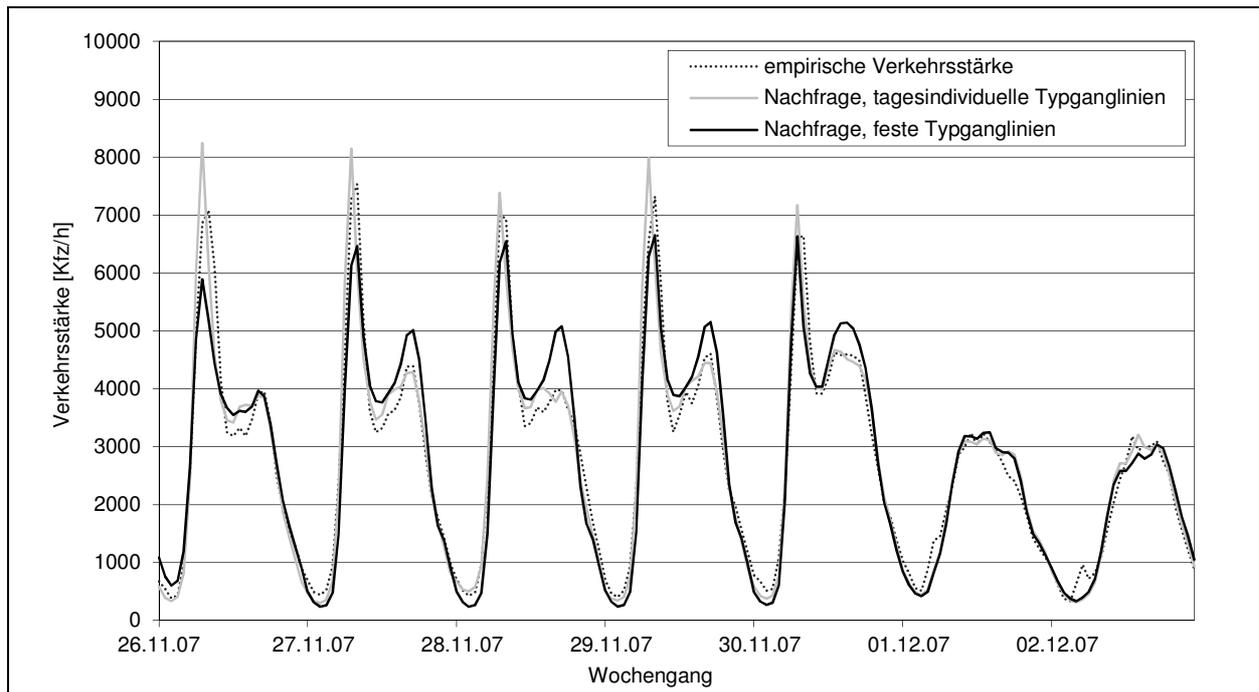


Bild 5-1: Gegenüberstellung von Verkehrsnachfrage und empirischen Verkehrsstärken in der Woche vom 25.11. bis 03.12.2007 bei Verwendung fester und tagesindividueller Typganglinien (Beispielquerschnitt: A3/22RS)

werte der Verkehrsnachfrage ermittelt werden. Durch die zusätzliche Variation der tageszeitlichen Verteilung werden die in Kapitel 5.1 beschriebenen Nachteile aufgehoben. Die Unterschiede zwischen der Modellierung der Verkehrsnachfrage mit festen und tagesindividuellen Typganglinien sind in Bild 5-1 am Beispiel einer Wochenganglinie dargestellt.

5.4 Modellierung der Verkehrszusammensetzung

5.4.1 Zielsetzung

Eine wirtschaftliche Bemessung von Straßenquerschnitten setzt fundierte Kenntnisse über die Häufigkeit und den Umfang von Zeitverlusten in Folge von Staus auf einzelnen Strecken voraus. Derartige Zeitverluste werden über Zeitkostenansätze monetarisiert und in Nutzen-Kosten-Analysen berücksichtigt.

Nach dem aktuellen Stand der Forschung sind für die einzelnen Fahrtzwecke spezifische Zeitkostenansätze zu berücksichtigen, um den jeweiligen volkswirtschaftlichen Nutzen einzelner Fahrten entsprechend abbilden zu können. So ist der morgendliche Zeitverlust in einem Ballungsraum aufgrund des hohen Anteils an beruflichen Fahrten anders zu bewerten als ein vom Umfang gleichartiger Stau am Samstag auf einer Zufahrt zu einem touristischen Anziehungspunkt. Aus den Daten von Dauerzählstellen lassen sich jedoch

keine Fahrtzwecke rekonstruieren, um derartige unterschiedliche Zeitkostenansätze berücksichtigen zu können. Daher sind weitergehende Ansätze erforderlich, die eine Ausweisung der Fahrtzwecke für verschiedene Straßenquerschnitte ermöglichen. Eine zusätzliche Herausforderung ergibt sich dadurch, dass für Analysezwecke im Projekt die zeitliche Variation der Fahrtzwecke über die einzelnen Stunden eines Jahres erforderlich ist, um für die an den Dauerzählstellen gemessenen Stauereignisse Aussagen zu den betroffenen Fahrtzwecken treffen zu können.

Daher wurde für alle im Projekt betrachteten Messquerschnitte die Zusammensetzung der Fahrtzwecke für die 8.760 Stunden eines Jahres ermittelt. Die beschriebene Fragestellung lässt sich mit aktuell verfügbaren Modellen nicht originär beantworten, da bislang kein Modell verfügbar ist, das umfassend für alle Segmente der Verkehrsnachfrage die Variation über ein ganzes Jahr abbildet. Es existieren jedoch verschiedene Ansätze, die Teile der zeitlichen Variation für bestimmte Segmente abbilden können. Durch eine Integration der unterschiedlichen Ansätze und Modellverfahren lässt sich die vorliegende Fragestellung beantworten. Aufgrund des großen Aufwandes bundesweiter Netzumlegungen ist es im Rahmen des Projektes nicht möglich, Matrizen für alle 8.760 Stunden eines Jahres zu erstellen und diese dann in einem Netzmodell umzulegen und auszuwerten. Stattdessen wird mittels Umlegungen für eine

typische Woche die räumliche Situation der einzelnen zu betrachtenden Messquerschnitte analysiert. Unter Berücksichtigung der aus den Modellen und Daten bekannten jahres- und tageszeitlichen Variation der Verkehrsnachfrage der einzelnen Fahrtzwecke können die Ergebnisse der Umlegungsrechnungen auf alle Stunden des Jahres übertragen werden.

5.4.2 Verwendete Daten und Modelle

Die STRATA GmbH verfügt über das Modellsystem CustoMiner®, das zur detaillierten Abbildung der Zusammensetzung der Verkehrsnachfrage im Personenfernverkehr entwickelt wurde und das insbesondere die zeitlichen Strukturen berücksichtigt. Der verwendete Ansatz ist mikroskopisch, d. h. es werden für einzelne Haushalts- und Personentypen konkrete Fahrten gebildet. Dabei werden neben dem Fahrtziel und dem verwendeten Verkehrsmittel insbesondere die Fahrtzeitpunkte der Hin- und Rückfahrt abgebildet. Dies geschieht mittels eines mehrstufigen Ansatzes, der die Fahrdauer in Tagen, die Kalenderwoche und den Wochentag der Abreise aufeinander abstimmt. Der gewählte Ansatz gewährleistet darüber hinaus die Berücksichtigung zeitlicher Regime, z. B. der Schulferiengewohnheiten bestimmter Haushalte und die besonderen Reisegewohnheiten infolge von Feier- und Brückentagen im Jahresverlauf. Die Matrizen umfassen ein vollständiges Kalenderjahr und differenzieren vier übergeordnete Fahrtzwecke und bis zu 20 Fahrtzweckuntergruppen. Die räumliche Auflösung erfolgt auf Kreisebene (NUTS2). Zur Abbildung des Nah- und Regionalverkehrs (im Folgenden Regionalverkehr genannt) werden die bestehenden Matrizen der Bundesverkehrswegeplanung (BVWP-Matrizen) verwendet. Diese Matrizen differenzieren sechs Fahrtzwecke, repräsentieren einen mittleren Werktag und bieten als räumliche Auflösung Kreise (NUTS2).

Das für die Umlegungsrechnungen verwendete Netzmodell für Deutschland umfasst ein vereinfachtes Fernstraßennetz mit allen Autobahnen und wichtigen Bundesstraßen. Für jede NUTS2-Region (Kreis) sind ein bis fünf Einspeisepunkte festgelegt. Diese Auflösung bietet hinreichend genaue Ergebnisse für die erforderliche Analyse, auch wenn bei Dauerzählstellen in unmittelbarer Nähe von Zellanbindungen mit Ungenauigkeiten bei der Abbildung des Regionalverkehrs zu rechnen ist, da z. T. größere Anteile der zellbezogenen Verkehrsnachfrage über wenige Anschlussstellen ins Netz eingespeist werden. Dies betrifft nicht die Zweckzusammensetzung, sondern ausschließlich die absoluten Nachfragemengen.

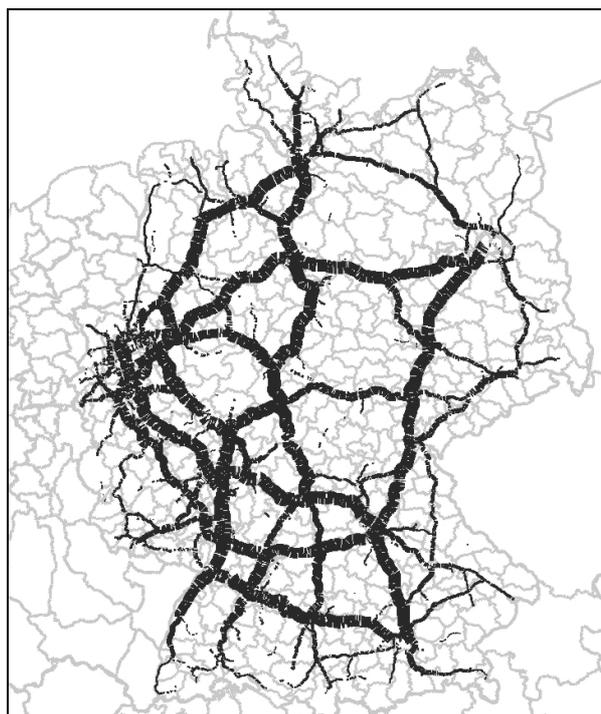


Bild 5-2: Umlegungsergebnis Verkehrsnachfrage im Fernverkehr (Samstag)

Für die Analysen zum Nah- und Regionalverkehr werden die Daten des Deutschen Mobilitätspanels (MOP) verwendet. Das Deutsche Mobilitätspanel erhebt jährlich das Verkehrsverhalten von ca. 1.500 Personen über eine vollständige Woche. Dieser Erhebungsansatz ermöglicht intrapersonelle Analysen zum Verkehrsverhalten sowohl im Tages- als auch im Wochenverlauf und ist daher für die erforderlichen Analysen vollumfänglich geeignet.

5.4.3 Ablauf und Festlegungen

Ein Teil der Verkehrsnachfrage auf Autobahnen gehört zum regionalen Verkehr. Diese Ströme sind dem Alltagsverkehr zuzurechnen und umfassen die täglichen Routinen der Fahrt zur Arbeit, zum Einkauf, zur Freizeit und andere Fahrtzwecke. Diese Fahrten weisen einen starken Wochenzyklus auf, die saisonale Variation über das Jahr ist eher gering. Darüber hinaus sind auf den Bundesautobahnen Fernverkehrsströme zu finden, die neben einem starken Wochenzyklus auch eine deutlich saisonale Variation aufweisen; insbesondere Schulferien und Feiertage führen zu den sichtbaren Nachfragespitzen. Diese unterschiedlichen Charakteristika der Nachfragesegmente werden berücksichtigt, indem für den Regional- und den Fernverkehr unterschiedliche Ansätze und verschiedene Modelle angewendet werden.

Die grundsätzliche Vorgehensweise ist sowohl für den Fern- als auch den Regionalverkehr gleich und umfasst jeweils drei Arbeitsschritte. Der Ablauf ist in Bild 5-3 graphisch dargestellt.

1. Die **räumliche Situation** jedes Messquerschnitts wird bei der Umlegungsrechnung berücksichtigt: Durch Umlegungen von sieben Wochentagsmatrizen wird die Zweckzusammensetzung für den Fernverkehr für eine „durchschnittliche Kalenderwoche“ an jedem Querschnitt ermittelt. Für den Regionalverkehr erfolgt eine Umlegung eines „typischen Werk-tages“. Als Ergebnis liegt die mittlere Zweckzusammensetzung jedes Querschnitts vor.
2. Die **Variation im Zeitverlauf** an jedem Messquerschnitt wird mittels Analysen und Modellrechnungen bestimmt. Für den Fernverkehr wird mithilfe des CustoMiner® die Verkehrsnachfrage über die 365 Tage des Jahres 2007 simuliert. Durch die Quotientenbildung mit den Umlegungsergebnissen der „durchschnittlichen Kalenderwoche“ aus Schritt 1 kann die Variation der Fahrtzwecke für jeden Kalendertag ermittelt werden. Für den Regionalverkehr werden auf Basis detaillierter Wochenganglinien aus dem Deutschen Mobilitätspanel die relativen Veränderungen der Zweckanteile je

Wochentag gegenüber dem „typischen Werktag“ ermittelt. Als Ergebnis aus Schritt 1 und 2 liegen für den Fernverkehr tagesfeine Zweckzusammensetzungen für ein ganzes Kalenderjahr und für den Regionalverkehr der Wochengang der Verkehrsnachfrage auf Tagesbasis vor.

3. Die **Tagesganglinie** wird durch eine kombinierte Betrachtung von Informationen aus drei Quellen zusammengesetzt und harmonisiert. Zum einen wird der tatsächliche Tagesgang jedes Messquerschnitts aus den Ergebnissen der Zählungen der Dauerzählstellen ermittelt. Für den Fernverkehr liegen zweckfeine Tagesganglinien aus dem Modellsystem CustoMiner® vor. Für den Regionalverkehr werden Analysen des MOP verwendet. Als Ergebnisse liegen Stundenwerte der Verkehrsnachfrage für die 365 Tage eines Jahres vor.

Diese drei Arbeitsschritte – jeweils für den Regional- und Fernverkehr durchgeführt – ermöglichen nach der Zusammenführung aller Ergebnisse die Ausweisung der Zweckzusammensetzung an allen Messquerschnitten im Netz für die 8.760 Stunden eines Jahres. Im Ergebnis liegt für jede Stunde des Jahres die prozentuale Zusammensetzung der Verkehrsnachfrage nach Verkehrszwecken an allen Messquerschnitten vor.

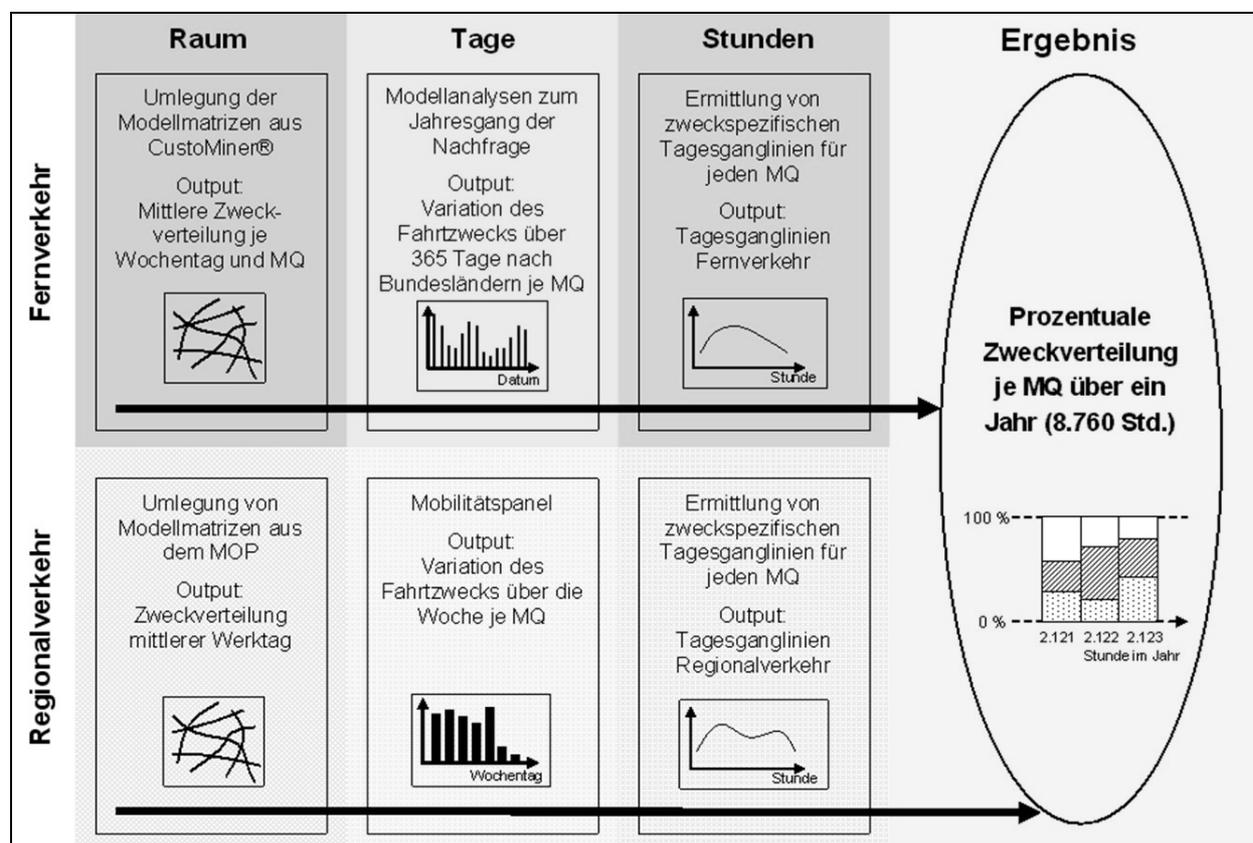


Bild 5-3: Ablauf der Verkehrsnachfragemodellierung

Die folgenden Festlegungen wurden getroffen:

- Es werden ausschließlich Personenverkehrsströme berücksichtigt, Güterverkehrsströme bleiben unberücksichtigt.
- Als Verkehrszwecke werden die Fahrtzwecke
 - geschäftliche und dienstliche Fahrten,
 - Fahrten zum Arbeits-/ Ausbildungsplatz,
 - sonstige private Fahrten (z. B. Einkauf, Freizeit, Urlaubs-/ Privatreisen)
 unterschieden.
- Alle Rückwege (Wege vom Aktivitätssort zurück nach Hause) werden den jeweiligen Hauptaktivitäten zugeordnet, d. h. ein Weg vom Arbeitsplatz nach Hause wird entsprechend als Arbeitsweg verarbeitet. Die Aggregation der Fahrtzwecke in drei Kategorien erfolgte aufgrund von Restriktionen bei der Differenzierung der Zeitkostensätze.
- Als Analysejahr wird das Jahr 2007 betrachtet.

5.4.4 Ergebnisse

Die verwendeten Modellmatrizen für den Fernverkehr wurden bereits im Rahmen vorangegangener Projekte eingesetzt und umfangreichen Prüfungen und wiederholten Kalibrierungsvorgängen unterzogen. Dabei wurden die Ergebnisse auch bereits bundesweit mit Daten von Dauerzählstellen abgeglichen.

Die Matrizen der Bundesverkehrswegeplanung wurden ohne weitere Anpassungen übernommen. Im Rahmen der Qualitätssicherung wurden die absoluten Verkehrsmengen aus den Modellberechnungen mit den Ergebnissen der Dauerzählstellen abgeglichen. Hierbei ergeben sich für die Qualität zwischen tatsächlichen Messwerten an den Querschnitten und den Modellberechnungen die nachfolgend dargestellten Befunde.

Insgesamt wird über alle Querschnitte im Modell ca. 13 % mehr Verkehr abgebildet, als durch die Zählwerte ermittelt werden kann. Hierbei wurde bereits berücksichtigt, dass bei den Dauerzählstellen in manchen Zeitbereichen Ausfälle zu verzeichnen sind. Die Abbildungsgenauigkeit an den einzelnen Querschnitten korreliert mit dem Fernverkehrsanteil auf diesen Strecken. So werden an den überregionalen Messquerschnitten sehr gute Abbildungsgenauigkeiten erreicht, während insbesondere an den untergeordneten Netzelementen im Großraum Frankfurt größere Abweichungen zu beobachten sind. Ursache dieser Abweichungen

sind die Überlagerung von Matrizen aus unterschiedlichen Modellen (Fernverkehr: STRATA/CustoMiner, Alltagsverkehr: BVWP) mit unterschiedlichen Granularitäten und Detaillierungen sowie die eigene Auflösungsgenauigkeit im untergeordneten Netz und die Zellanbindung des deutschlandweiten Netzmodells.

Dies betrifft insbesondere die Messquerschnitte auf der A 66 (A66/40LSW und A66/40LSO). Hier liegt im Netzmodell eine ungünstige Situation in Hinblick auf die Anbindung der Zelle Main-Kinzig-Kreis vor, so dass große Teile der Verkehrsnachfrage an wenigen Ausfahrten die Autobahn verlassen, während sich in der Realität die Nachfrage über viele Ausfahrten sukzessive reduziert. Die Messquerschnitte A66/40LSW und A66/40LSO liegen im Netzmodell unmittelbar vor der Ausfahrt, die den größten Teil der Verkehrsnachfrage bewältigt, daher werden hier zu viele Fahrten des Nah- und Regionalverkehrs im Modell erfasst. Weiterhin als kritisch einzustufen sind die Querschnitte A66/4ZW und A66/4ZO innerhalb des Stadtgebietes Wiesbaden. Hier fehlen Teile des kleinräumigen Verkehrs (z. T. innerstädtischer Binnenverkehr), weshalb eine deutlich zu geringe Verkehrsmenge im Modell abgebildet wird. An weiteren vier Messquerschnitten in den Ballungsräumen Rhein-Main und Rhein-Neckar sind derartige Effekte festgestellt worden. Hier wurde im Zuge der Prüfung mittels Faktoren händisch eingegriffen, um die identifizierten Effekte zu dämpfen.

Hinsichtlich der Tages- und Wochenganglinie ist festzustellen, dass die Mittagsdelle im Modell zu stark ausgeprägt ist – die Dauerzählstellen zeigen hier einen ausgeglicheneren Verlauf. Die Morgen- und Nachmittagsspitzen sowie die Nächte hingegen werden zeitlich und im Hinblick auf die Nachfragemengen gut getroffen. Differenzen sind an den Wochenenden festzustellen, die Nachfragekurve am Samstag ist im Modell etwas breiter und flacher und weist eine weniger ausgeprägte Spitze in den Mittagsstunden auf.

Die Modellierung liefert ein prinzipielles Nachfragebild unter Berücksichtigung der bekannten und abbildbaren Zusammenhänge. Viele spezifische Einflüsse lassen sich (noch) nicht in dieser Modellwelt berücksichtigen. Im Vergleich zu einzelnen Messquerschnitten sind hierdurch Abweichungen unumgänglich, die auf eine Reihe von Effekten zurückzuführen sind. Folgende Einflüsse sind für einen großen Teil der festzustellenden Abweichungen verantwortlich:

- **Wettereinflüsse:** Im Rahmen der Berechnungen werden die Einflüsse von Wetter nicht berücksichtigt. Insbesondere der Freizeit- und

Ausflugsverkehr am Wochenende ist stark vom lokalen Wetter abhängig. Dies betrifft einerseits schlechtes Wetter (Regen, Glatteis, Bewölkung), aber andererseits auch besonders gutes (Ausflugs-) Wetter.

- **Verkehrsnachfrage der Nachbarländer:** Es werden ausschließlich Fahrten der innerdeutschen Wohnbevölkerung abgebildet. Insbesondere an grenznahen Messquerschnitten (z. B. in Bayern und Schleswig-Holstein) sind durch Verkehrsteilnehmer aus dem Ausland Abweichungen zwischen den Modellberechnungen und den Messwerten der Dauerzählstellen zu erwarten.
- **Netzauflösung:** Das verwendete Netzmodell ist im untergeordneten Netz (z. B. auch im Umfeld von BAB-Anschlussstellen) teilweise abstrahiert. Auch die Anbindung der Zellen (Kreise) mittels ein bis fünf Anbindungen führt lokal zu Abweichungen zwischen Modell und Realität. Das verwendete Netzmodell und die sehr umfangreichen Umllegungsarbeiten sind im Hinblick auf die Detaillierung der Ergebnisse dennoch bestens geeignet. Ein Netzmodell mit höherer Detaillierung hätte den Untersuchungsaufwand bei geringem Nutzen unangemessen erhöht.
- **Baustellen, Unfälle, Streckensperrungen, Messausfälle:** Durch Baustellen, Unfälle und Streckensperrungen, insbesondere auch im umliegenden Netz, sind temporäre Schwankungen der Verkehrsnachfrage an den Dauerzählstellen festzustellen, die bei der Umlegung nicht berücksichtigt werden können. Durch Messfehler und Messausfälle an den Dauerzählstellen werden die Verkehrsmengen zeitweise falsch oder nicht erfasst.
- **Großunternehmen und Großeinrichtungen:** Durch regionale Besonderheiten der Verkehrsnachfrage im Berufsverkehr (z. B. Großunternehmen mit besonderer Schichtarbeit im unmittelbaren Umfeld von Dauerzählstellen) sowie im Freizeitverkehr (Freizeitparks, Flughafen etc.) können sich lokale Abweichungen ergeben.
- **Lokale Ereignisse:** Einzelne Veranstaltungen (Bundesligaspiele, Messen, saisonale Feste, etc.) werden bei der Nachfragemodellierung nicht abgebildet.

Die Wirkungen dieser Einflüsse sind im Rahmen des hier vorliegenden bundesweiten Modellansatzes nicht abzufangen und bleiben als Unsicherheit bestehen. Die Aussagekraft der berechneten fahrtzweckspezifischen Aufkommensanteile ist dennoch gegeben.

Als Ergebnis der Berechnungen liegen für alle Messquerschnitte die Fahrtzweckanteile in den Klassen: Private Fahrten, Fahrten zum Arbeits-/ Ausbildungsplatz, geschäftliche Fahrten für 8.760 Stunden des Jahres vor.

In Bild 5-4 und Bild 5-5 ist als Beispiel der Verlauf der Fahrtzweckanteile in der Woche von Montag, den 15.01.2007, bis Sonntag, den 21.01.2007, für zwei Querschnitte auf der Autobahn A 3 dargestellt. Deutlich sichtbar ist der unterschiedliche Anteil der Fahrten zum Arbeitsplatz außerhalb (Bild 5-4) und innerhalb (Bild 5-5) von Ballungsräumen. Auch die besonderen Abläufe an den Wochenendtagen sind deutlich sichtbar.

In Bild 5-6 ist die Zusammensetzung der Fahrtzwecke für einen durchschnittlichen Dienstag dargestellt. An den Zählstellen A66/40LSW und A66/40LSO (A 66 bei Bad Orb, beide Fahrtrichtungen) liegt der Anteil des Fernverkehrs unter 10 %. Der Querschnitt ist somit stark vom Regionalverkehr dominiert. Der Anteil des Fernverkehrs an den Querschnitten A7/13FUN und A7/13FUS (A 7 bei Fulda, beide Fahrtrichtungen) liegt hingegen bei etwa 95 %. Der Regionalverkehr ist an diesen Querschnitten außerhalb eines Ballungsraums fast vernachlässigbar.

In Bild 5-7 ist die Verteilung des Fernverkehrs an den Messquerschnitten über eine Woche dargestellt. Durch die Sortierung nach dem Anteil des Wochenendverkehrs ist die Bedeutung der Querschnitte für den Urlaubs- und Reiseverkehr sichtbar. Während an den Querschnitten A66/40LSW und A66/40LSO (A 66 bei Bad Orb, beide Fahrtrichtungen) der Anteil des Wochenendverkehrs (Sa+So) etwa 35 % des Wochenverkehrs beträgt, ist an den Querschnitten 1922R1 und 1922R2 (A 23 zwischen Hamburg und Heide/ Nordsee) sowie MQ9051RiG und MQ9051RiM (A 95 nördlich von Garmisch-Partenkirchen) ein Anteil des Wochenendverkehrs von über 40 % festzustellen. Dieses Beispiel illustriert die Varianz der Fahrtzwecke und der Verkehrsnachfrage in Abhängigkeit von der Lage im Fernstraßennetz.

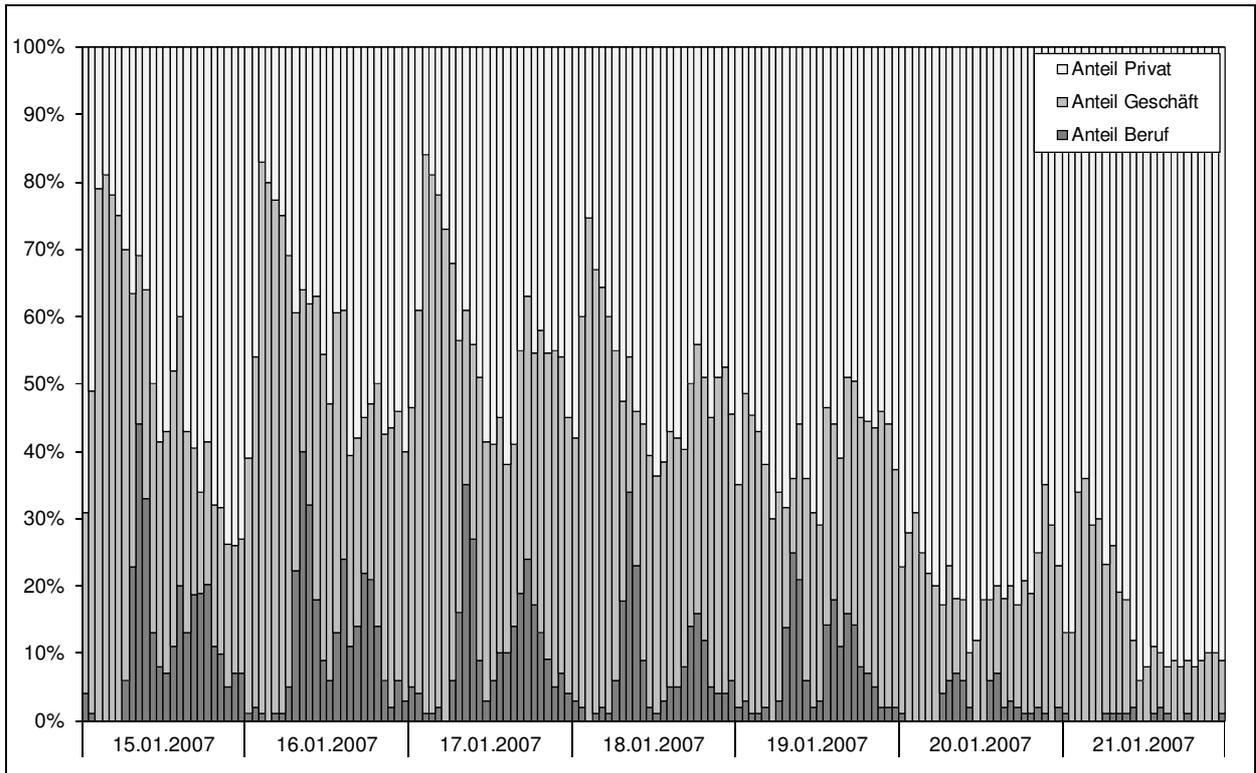


Bild 5-4: Normierte Fahrtzweckverteilung im Zeitraum 15.01. bis 21.01.2007 (Stundenwerte, Beispielquerschnitt: A3/11DN)

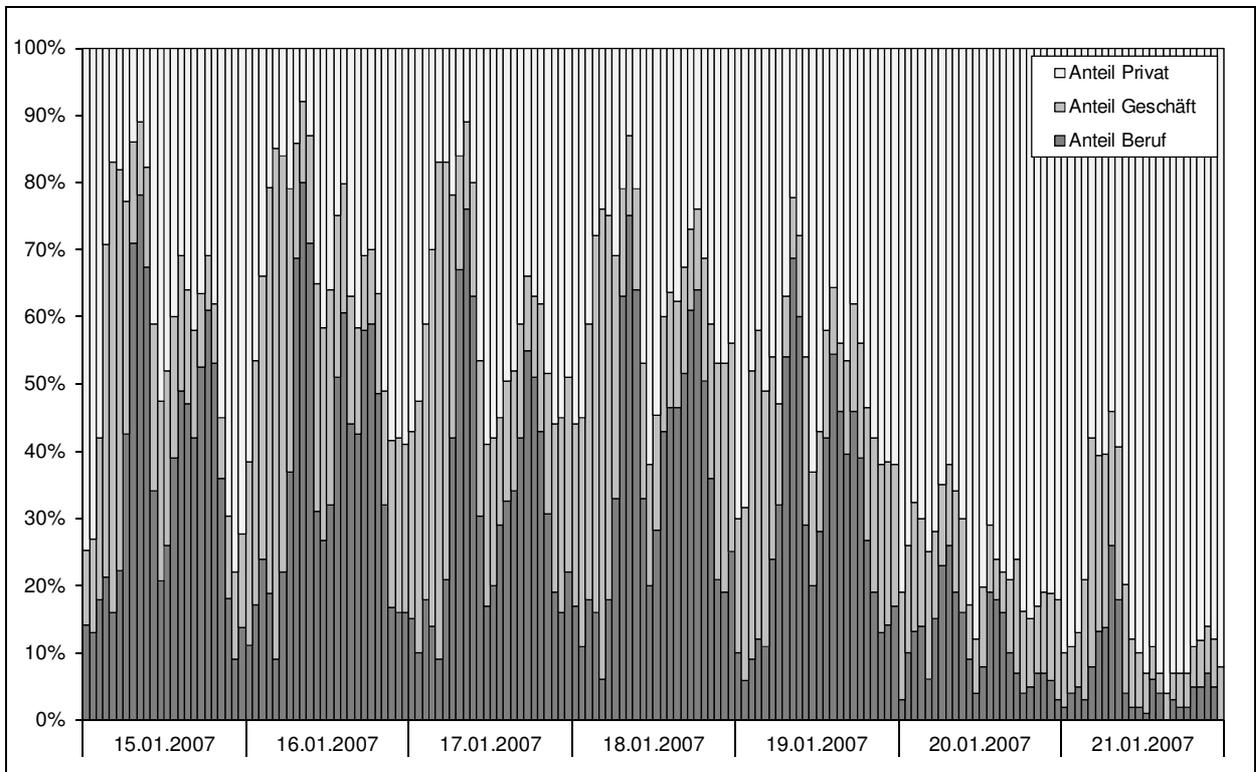


Bild 5-5: Normierte Fahrtzweckverteilung im Zeitraum 15.01. bis 21.01.2007 (Stundenwerte, Beispielquerschnitt: A3/51GS)

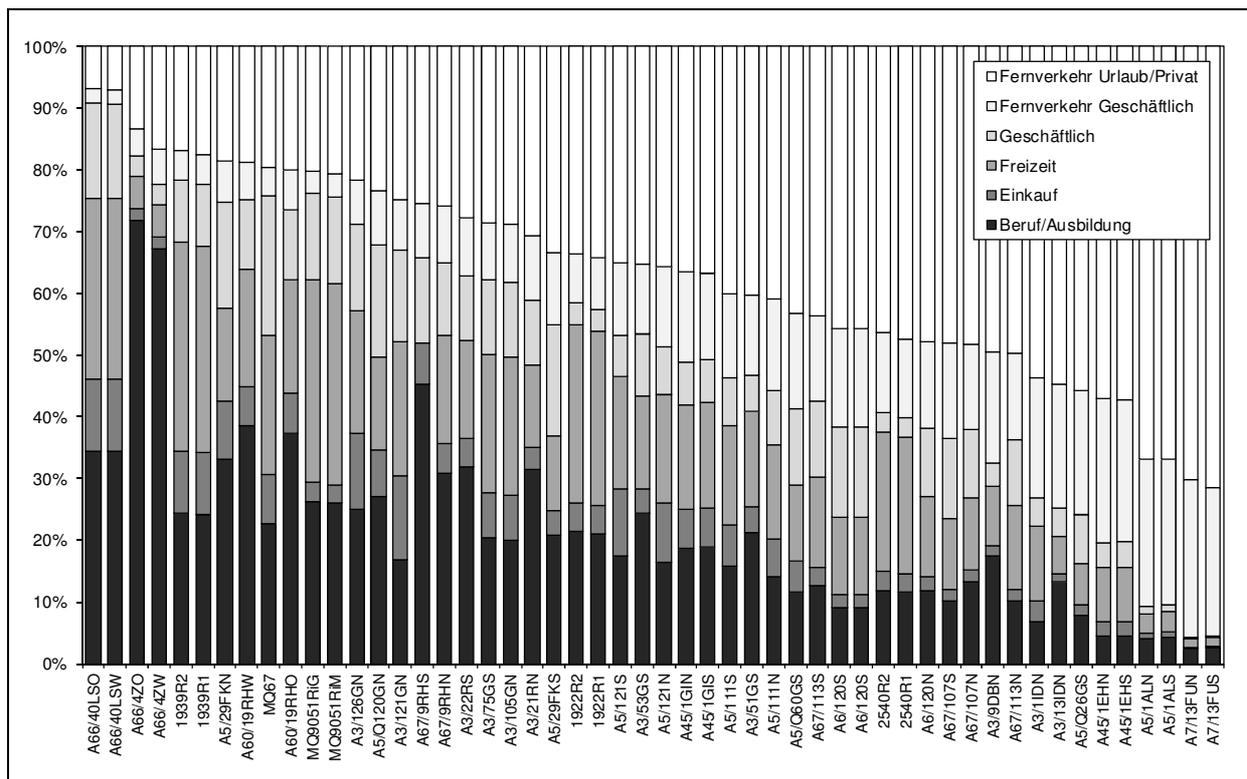


Bild 5-6: Fahrtweckzusammensetzung der Messquerschnitte nach Fahrtzwecken an einem durchschnittlichen Dienstag

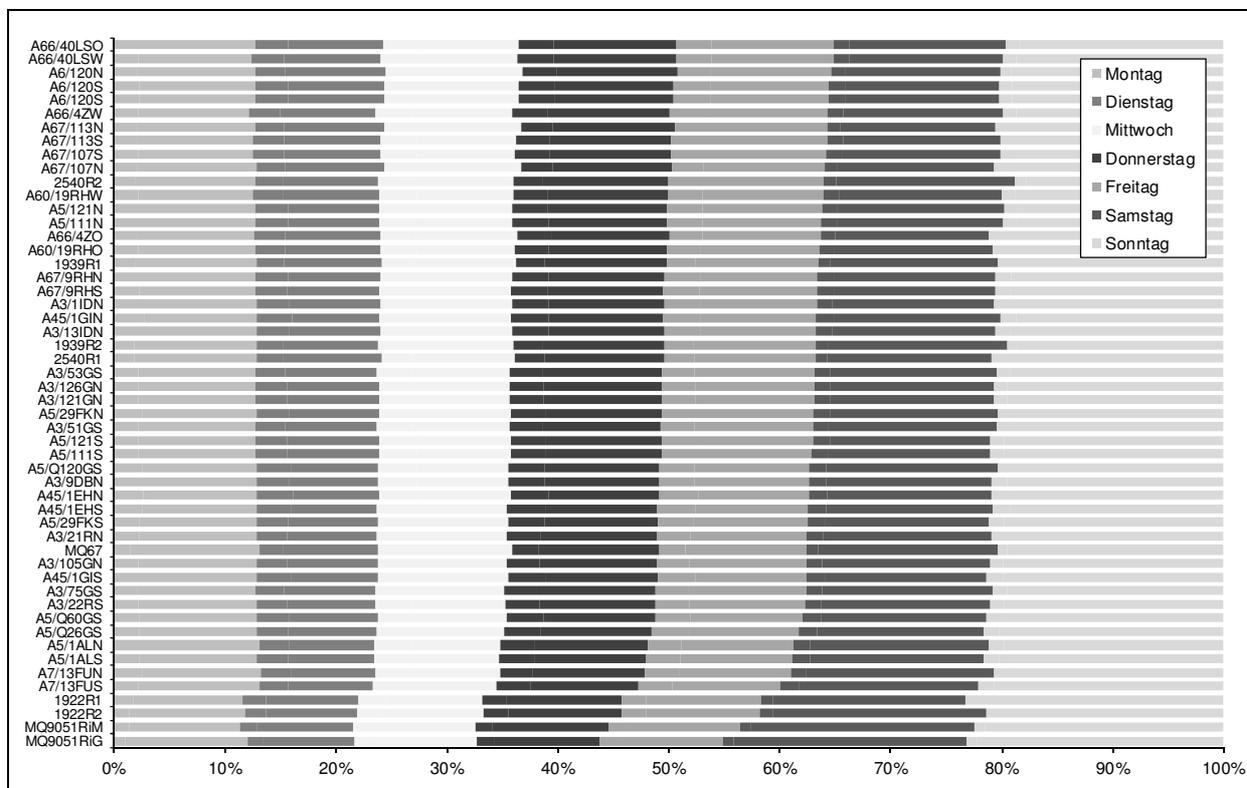


Bild 5-7: Anteil der Wochentage am Wochenverkehr

5.5 Variation der Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsnachfrage der betrachteten Messquerschnitte liegt auch in den ersten Stunden der Dauerlinie zum Teil deutlich unter der Kapazität. Da jedoch gerade dieser Bereich für die Untersuchung relevant ist, wurden zusätzliche Datensätze erzeugt. Dabei wurden für jeden Messquerschnitt gesondert Faktoren bestimmt, mit denen die Nachfragewerte erhöht oder (seltener) abgemindert wurden.

Die Methodik der Erhöhung ist in Bild 5-8 am Beispiel des Querschnitts MQ9051RiG (A 95 zwischen Anschlussstelle Murnau/Kochel und Eschenlohe) dargestellt. Bei dem Querschnitt liegt die in der Realität auftretende Verkehrsnachfrage von maximal 1.251 Kfz/h deutlich unter der Kapazität von 3.700 Kfz/h einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn mit der vorliegenden Strecken-

charakteristik. Da mit dieser Belastung in der Regel keine Überlastungssituationen auftreten, wurden die Werte erhöht, so dass die Verkehrsnachfrage in der n-ten Stunde der Kapazität des Streckentyps des HBS (FGSV, 2012) entspricht. Als n-te Stunde wird dabei die 30., 50. und 100. Stunde gewählt. Mit den ursprünglichen realen Verkehrsnachfragewerten stehen somit insgesamt vier Datensätze für die modellbasierten Analysen zur Verfügung. Die Datensätze werden folgendermaßen bezeichnet:

- „real“:
tatsächliche Werte
- N_{30} , N_{50} bzw. N_{100} :
Der Auslastungsgrad in der 30., 50. bzw. 100. Stunde der Dauerlinie ist gleich 1,0.

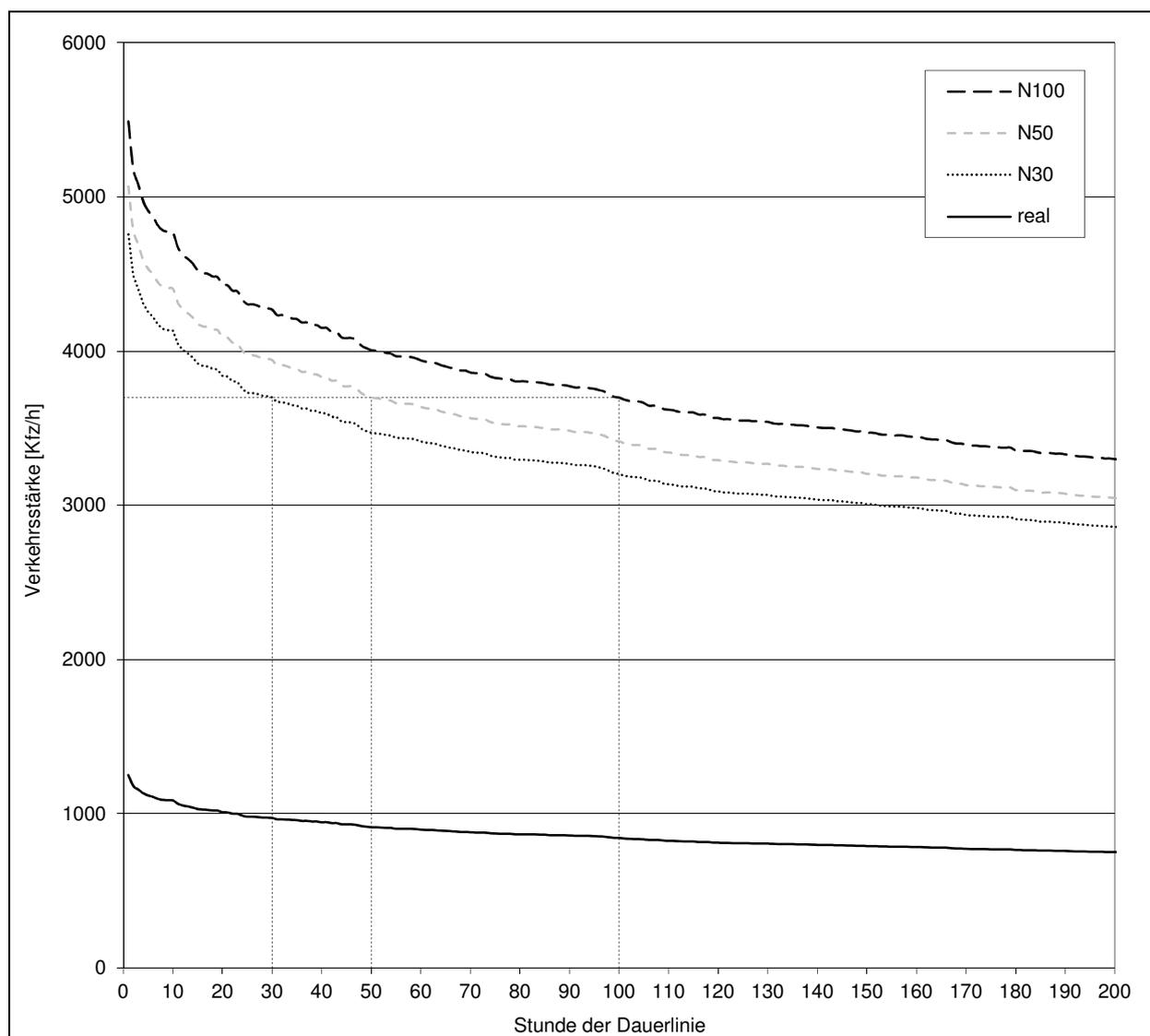


Bild 5-8: Erhöhung der Verkehrsnachfrage (Beispielquerschnitt: MQ9051RiG)

6 Methodik der Ganzjahresanalyse

6.1 Auswahl des Berechnungsmodells

Mit Hilfe von Modellrechnungen im Sinne einer Ganzjahresanalyse des Verkehrsablaufs wurden die überlastungsverursachenden Stunden im Laufe eines Jahres ermittelt und die verkehrlichen Auswirkungen der Überlastungen quantifiziert. Ziel war es, den empirischen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Spitzenstunden und dem Ausmaß der in diesen Stunden verursachten Überlastungen für repräsentative Streckentypen und Verkehrszusammensetzungen herzuleiten.

In einem ersten Schritt wurden geeignete Modellansätze für eine Beurteilung des Verkehrsablaufs über längere Zeiträume analysiert. Dafür wurden die folgenden Verfahren getestet und verglichen:

- (1) Gegenüberstellung von stochastischen Jahresganglinien der Verkehrsnachfrage und der Kapazität mit einem Warteschlangenmodell (BRILON und ZURLINDEN, 2003)
- (2) Makroskopische Simulation des Verkehrsablaufs mit einem Zellenmodell (BRILON et al., 2010)

Für die Anwendung des Verfahrens (1) wurde im Rahmen der Untersuchung von BRILON und ZURLINDEN (2003) das Programm KAPASIM entwickelt. Darin wird für die Ermittlung der Zeitverluste ein deterministisches Warteschlangenmodell verwendet. Die Autobahn wird dabei als eine Abfolge von Engpässen, die als Bedienungsschalter im Sinne der Warteschlangentheorie aufgefasst werden, modelliert. Daraus resultieren folgende Konsequenzen:

- Es werden nur staubedingte Zeitverluste nach einem Zusammenbruch des fließenden Verkehrs in die Berechnung einbezogen. Zeitverluste, die durch die Erhöhung der Fahrtzeit bei zunehmender Verkehrsstärke im fließenden Verkehr entstehen, bleiben unberücksichtigt.
- Die genaue Lage des jeweiligen Engpasses innerhalb der Strecke wird nicht präzisiert. Es wird stets die geringste Kapazität der Strecke als maßgebend angesehen.
- Die räumliche Staufortpflanzung entlang der Strecken und über die Knotenpunkte hinweg kann nur unter Inkaufnahme von Näherungsannahmen berechnet werden. Diese Betrachtung gestattet im Allgemeinen keine Ermittlung der Auswirkungen von Stauausbreitungen über

Autobahnkreuze und -dreiecke (mit starkem Verkehrsaustausch) hinweg.

Durch einen kombinierten Ansatz (GEISTEFELDT, 2005) kann das Verfahren (1) dahingehend erweitert werden, dass zusätzlich auch Zeitverluste im fließenden Verkehr berücksichtigt werden. Neben den überlastungsbedingten Zeitverlusten werden dabei die Fahrtzeiten im fließenden Verkehr durch ein Verkehrsflussmodell, dessen Parameter in Abhängigkeit von der (stochastisch variablen) Kapazität angepasst werden, berechnet.

Das Verfahren (2) wurde von BRILON et al. (2010) in einem Simulationsmodell umgesetzt, mit dem der Verkehrsablauf auf Autobahnen mit Hilfe eines Zellenmodells nachgebildet wird. Das Modellkonzept ist an das „Cell Transmission Model“ nach DAGANZO (1994) angelehnt. Im Gegensatz zum deterministischen Ansatz kann mit dem Zellenmodell auch die räumliche Ausbreitung von Überlastungen erfasst und in die Bewertung einbezogen werden.

Für eine differenzierte Analyse von überlastungsbedingten Zeitverlusten einerseits und Zeitverlusten im fließenden Verkehr andererseits ist das Verfahren (1) besser geeignet. Die Modellierung der über die betrachtete Strecke hinausgehenden Staufortpflanzung, die nur mit dem zellenbasierten Ansatz (2) durchgeführt werden kann, ist dagegen nicht Gegenstand der Untersuchung. Daher wurde für die Simulationen das Programm KAPASIM gemäß Verfahren (1) ausgewählt und angepasst. Die Anpassung betraf im Wesentlichen die Zuweisung der ermittelten Zeitverluste zu der Stunde, in der der Stau entstanden ist.

6.2 Beschreibung des Berechnungsmodells

6.2.1 Grundlagen des Modells

Das Programm KAPASIM ist ein makroskopisches Simulationsmodell zur Bewertung des Verkehrsablaufs auf Autobahnen nach dem Prinzip der Ganzjahresanalyse (BRILON und ZURLINDEN, 2003; BRILON et al., 2004). Es ermöglicht die Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs durch die Quantifizierung von Überlastungswirkungen. Die Software wurde in Weiterentwicklungen u. a. speziell auf das hessische Autobahnnetz zugeschnitten (BRILON et al., 2006). Die einzelnen Strecken wurden dabei mit ihren spezifischen Parametern im Modell repräsentiert.

Für beliebige, längere Zeiträume können mit dem Programm KAPASIM folgende, den Verkehrsab-

lauf beschreibende Bewertungskriterien geschätzt werden:

- Anzahl der Staus,
- Dauer der Staus,
- Anzahl oder Anteil der betroffenen Verkehrsteilnehmer (getrennt nach Pkw und Lkw),
- Summe der Zeitverluste durch Staus,
- volkswirtschaftliche Bewertung der Zeitverluste.

Dabei können als Einflussgrößen folgende Ursachen für temporäre Kapazitätsabminderungen berücksichtigt werden:

- Unfälle,
- Pannen,
- Straßenzustand (trocken/ nass),
- Arbeitsstellen.

Der Einfluss jeder dieser Ursachen auf die oben genannten Bewertungskriterien kann durch mit/ohne-Rechnungen ermittelt werden.

Mit dem bestehenden Instrument können u. a. die Wirkungen folgender Maßnahmen untersucht werden:

- Baustellenmanagement,
- Strategien zur Störungsbeseitigung,
- Investitionen in die Autobahn-Infrastruktur (Aus-/ Umbau),
- Steuerungsmaßnahmen/ verkehrsrechtliche Maßnahmen (z. B. Seitenstreifenfreigabe).

Darüber hinaus bieten die Ergebnisse der Simulation eine Basis, um die Auswirkungen verschiedener Bemessungsverkehrsstärken auf die Anzahl und das Ausmaß der jährlichen Überlastungen schätzen zu können.

6.2.2 Eingangsgrößen und Einstellungen

Die wesentlichen Eingangsdaten für die Simulation des Verkehrsablaufs mit dem Programm KAPASIM können in drei Gruppen gegliedert werden:

- Streckencharakteristik,
- Verkehrsnachfrage,
- globale Parameter.

Die wichtigsten Streckenparameter sind die Länge der Strecke, die Längsneigung und die Fahrstreifenanzahl. Darüber hinaus müssen weitere, die Kapazität der Strecke beeinflussende Eigenschaften erfasst werden. Dazu gehören:

- die Lage der Strecke im Netz (Ballungsraum/ Verbindungsstrecke),
- das Vorhandensein eines Seitenstreifens, sowie dessen eventuelle temporäre Freigabe,
- die Anordnung von Geschwindigkeitsbeschränkungen (statisch oder dynamisch durch eine Streckenbeeinflussungsanlage).

Im Programm KAPASIM sind verschiedene Methoden zur Modellierung von Jahressganglinien der Verkehrsnachfrage implementiert:

- Überlagerung des DTV mit Typpganglinien für das Jahr, die Woche und die Wochentage,
- Überlagerung von Tageswerten der Verkehrsstärke mit Tagestypganglinien,
- Einlesen einer stundengenauen Verkehrsnachfrageganglinie.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung werden die mit den Verfahren nach Kapitel 5 ermittelten Stundenwerte der Verkehrsnachfrage im Programm eingelesen.

Auf die mögliche Berücksichtigung der Auswirkungen von temporären Kapazitätsreduktionen wird im Rahmen der vorliegenden Untersuchung verzichtet. Das Programm ermöglicht zwar die Berücksichtigung der Auswirkungen von Unfällen, Pannen und wechselnden Witterungsbedingungen, allerdings sind diese Einflüsse üblicherweise nicht Gegenstand der verkehrstechnischen Bemessung von Straßenverkehrsanlagen.

Der sogenannte Capacity Drop, d. h. die Reduktion der Kapazität im gestauten Verkehr nach einem Zusammenbruch des Verkehrsflusses, wird durch einen pauschalen Abminderungsfaktor von 15 % berücksichtigt. Das Capacity-Drop-Phänomen wurde in verschiedenen Untersuchungen analysiert. Dabei wurden stark streuende und unregelmäßige Werte ermittelt. Der hier gewählte Wert wurde in früheren Anwendungen des Programms KAPASIM (BRILON et al., 2006) kalibriert und ergab eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit der Realität.

6.2.3 Berücksichtigung der stochastischen Eigenschaft der Kapazität

Die Kapazität von Strecken von Autobahnen kann als stochastische Größe aufgefasst werden. In Abhängigkeit von den Umfeldbedingungen, den Streckeneigenschaften und der Verkehrszusammensetzung variiert die Kapazität zum Teil beträchtlich.

Für deutsche Autobahnen wurden Kapazitätsverteilungen in verschiedenen Untersuchungen (BRILON und ZURLINDEN, 2003; REGLER, 2004; GEISTEFELDT, 2007; BRILON und GEISTEFELDT, 2010) ermittelt. Die Verteilungsfunktion der Kapazität kann durch eine Weibull-Verteilung repräsentiert werden:

$$F_{C_5}(q_5) = 1 - e^{-\left(\frac{q_5}{b}\right)^a} \quad \text{für } q_5 \geq 0 \quad (6-1)$$

mit

$F_{C_5}(q_5)$ = Wert der Verteilungsfunktion der Kapazität im 5-Minuten-Intervall [Kfz/h]

q_5 = Verkehrsstärke im 5-Minuten-Intervall [Kfz/h]

a = Formparameter [-]

b = Maßstabsparameter [Kfz/h]

Nach Ergebnissen empirischer Kapazitätsanalysen von BRILON et al. (2006) kann der Parameter a der Kapazitätsverteilung näherungsweise als konstant angesehen werden:

$$a = \begin{cases} 13 & \text{für Strecken ohne SBA} \\ 16 & \text{für Strecken mit SBA} \end{cases}$$

Der Wert des Parameters b kann mit einem Näherungsansatz aus den Kapazitätswerten des HBS abgeleitet werden:

$$b = C_{HBS} \cdot 1,275 \quad (6-2)$$

mit

b = Lageparameter der Verteilung [Kfz/h]

C_{HBS} = Kapazität nach HBS [Kfz/h]

Für die Modellierung der Kapazität in KAPASIM wird der Parameter b in Abhängigkeit von der Streckencharakteristik aus der mittleren Kapazität nach HBS ermittelt. Dafür werden aktuelle Kapazitätswerte des Entwurfs der fortgeschriebenen Fassung des HBS (FGSV, 2012) verwendet. Bei der Ermittlung der Kapazität für jede Stunde wird der jeweilige Schwerverkehrsanteil mit berücksichtigt, d. h. der Parameter b wird kontinuierlich angepasst.

Über diesen vereinfachten Ansatz ist es möglich, die Kapazität einer Verkehrsanlage im Rahmen der Ganzjahresanalyse zufällig zu variieren, auch wenn eine empirische Kapazitätsverteilung für den betreffenden Querschnitt nicht bekannt ist.

6.2.4 Ermittlung überlastungsbedingter Verlustzeiten

Durch KAPASIM kann die Verkehrsqualität unter Verwendung eines deterministischen Warteschlangenmodells eingeschätzt werden (vgl. BRILON et al., 2006). Dabei wird ein Engpass im Zuge einer Strecke als Bedienungsschalter im Sinne der Warteschlangentheorie definiert. Ist ein geometrischer Engpass nicht klar zu identifizieren, wird von einem fiktiven Engpass ausgegangen, der die geringste Kapazität der Strecke aufweist. Die Kapazität an einem Bedienungsschalter (Engpass) ist begrenzt, d. h. nur eine bestimmte Anzahl von Fahrzeugen kann diesen in einer bestimmten Zeit passieren. Bei einer Kapazitätsüberschreitung kommt es zu einer Warteschlange vor dem Schalter (Stau). Dieser Stau löst sich erst bei einer deutlich reduzierten Verkehrsnachfrage wieder auf. Die räumliche Ausbreitung des Staus wird in diesem vereinfachten Warteschlangenmodell nicht betrachtet. Es können Zeitverluste durch Kapazitätsüberschreitungen und dem daraus resultieren Stau bestimmt werden, jedoch keine Verlustzeiten aufgrund verringerter Geschwindigkeiten bei hohen Verkehrsstärken im fließenden Verkehr. Diese Möglichkeit besteht jedoch prinzipiell durch eine Erweiterung des Warteschlangenmodells (vgl. GEISTEFELDT, 2005).

Die Grundlage des makroskopischen Simulationsmodells ist eine Gegenüberstellung von Jahressganglinien der Verkehrsnachfrage (vgl. Kapitel 5) und der Kapazität. Die Parameter a und b der Kapazitätsverteilung werden durch kontinuierliche Anpassung an die jeweiligen Verkehrs-, Umfeld- und Steuerungsbedingungen variiert. Dies erfolgt per Zufallsgenerator, der die vorgegebene statistische Verteilung der Kapazitäten benutzt.

Das Programm bestimmt für jedes Zeitintervall i die Staulänge N_i am Ende des Intervalls i durch die Gegenüberstellung der Verkehrsnachfrage und der Kapazität im betrachteten Intervall:

$$N_i = \max \begin{cases} (q_{N,i} - C_i) \cdot t + N_{i-1} \\ 0 \end{cases} \quad (6-3)$$

mit

N_i = Staulänge am Ende des Intervalls i [Kfz]

$q_{N,i}$ = Verkehrsnachfrage im Intervall i [Kfz/h]

C_i = Kapazität im Intervall i [Kfz/h]

t = Intervalldauer [h]

N_{i-1} = Staulänge am Ende des Intervalls $i-1$ [Kfz]

i = Index für das untersuchte Intervall [-]

Aus der mittleren Staulänge während eines Intervalls kann die in diesem Zeitintervall durch die Überlastung entstandene Verlustzeit T_i wie folgt berechnet werden:

$$T_i = 0,5 \cdot (N_i + N_{i-1}) \cdot t \quad (6-4)$$

mit

T_i = Verlustzeit am Engpass im Intervall i [Kfz·h]

N_i = Staulänge am Ende des Intervalls i [Kfz]

N_{i-1} = Staulänge am Ende des Intervall $i-1$ [Kfz]

i = Index für das untersuchte Intervall [-]

Die so ermittelten Verlustzeiten werden stets der betrachteten Strecke zugeordnet, die die Überlastung verursacht hat. Für eine realistische Modellierung der Stauausbreitung ist der Ansatz nicht geeignet, da das zugrunde liegende Warteschlangenmodell den Stau nach dem Prinzip des „vertical queuing“ nachbildet. Bild 6-1 zeigt die Gegenüberstellung von Ganglinien der Verkehrsnachfrage und der Kapazität sowie der daraus resultierenden Staulänge im Falle einer Überlastung am Beispiel einer Woche. Auffallend sind dabei drei länger anhaltende Überlastungen am Mittwoch, Donnerstag und Freitag, hervorgerufen durch ein Überschreiten der Kapazität während der morgendlichen Spitzenstunde.

Für die vorliegende Untersuchung wurde das Programm KAPASIM so angepasst, dass als Ergebnis die überlastungsbedingten Verlustzeiten für jede Stunde des Jahres ausgegeben werden.

Dazu werden die Verlustzeiten in den 5-Minuten-Intervallen innerhalb der jeweiligen Stunde aggregiert. Darüber hinaus wurde ein Algorithmus implementiert, mit dem die staubedingten Verlustzeiten jeweils der Stunde, in der der Stau entstanden ist, zugeordnet werden. Durch eine Auswertung der Überlastungen in umgekehrt chronologischer Reihenfolge wird dabei berücksichtigt, dass sich innerhalb eines Stauereignisses mehrere Kapazitätsüberschreitungen überlagern können. Das Prinzip der Berechnung ist in Bild 6-2 am Beispiel eines einzelnen Stauereignisses veranschaulicht. In dem Beispiel überschreitet die Verkehrsnachfrage die Kapazität in drei Intervallen: um 15:05, 16:15 und 16:20 Uhr (markierte Punkte). Zunächst werden die Zeitverluste für die Überlastung berechnet, die um 16:20 Uhr eingetreten wäre, wenn der Verkehr nicht zuvor bereits zusammengebrochen wäre (durchgehend schraffierte Fläche). Im nächsten Schritt werden die Zeitverluste, die durch die Überlastung um 16:15 Uhr verursacht worden wären, ermittelt. Die Differenz dieser Zeitverluste und denen der um 16:20 Uhr eingetretenen Überlastung (gestrichelt schraffierte Fläche) werden dem um 16:15 Uhr beginnenden Intervall zugeordnet. Analog wird für den Stau infolge des ersten Verkehrszusammenbruchs um 15:05 Uhr die Summe der Zeitverluste abzüglich der Zeitverluste, die durch die Überlastungen um 16:15 und 16:20 Uhr entstanden wären, ermittelt (gepunktet schraffierte Fläche). Anschließend werden für jede Stunde die in den 5-Minuten-Intervallen innerhalb der Stunde verursachten Zeitverluste aggregiert.

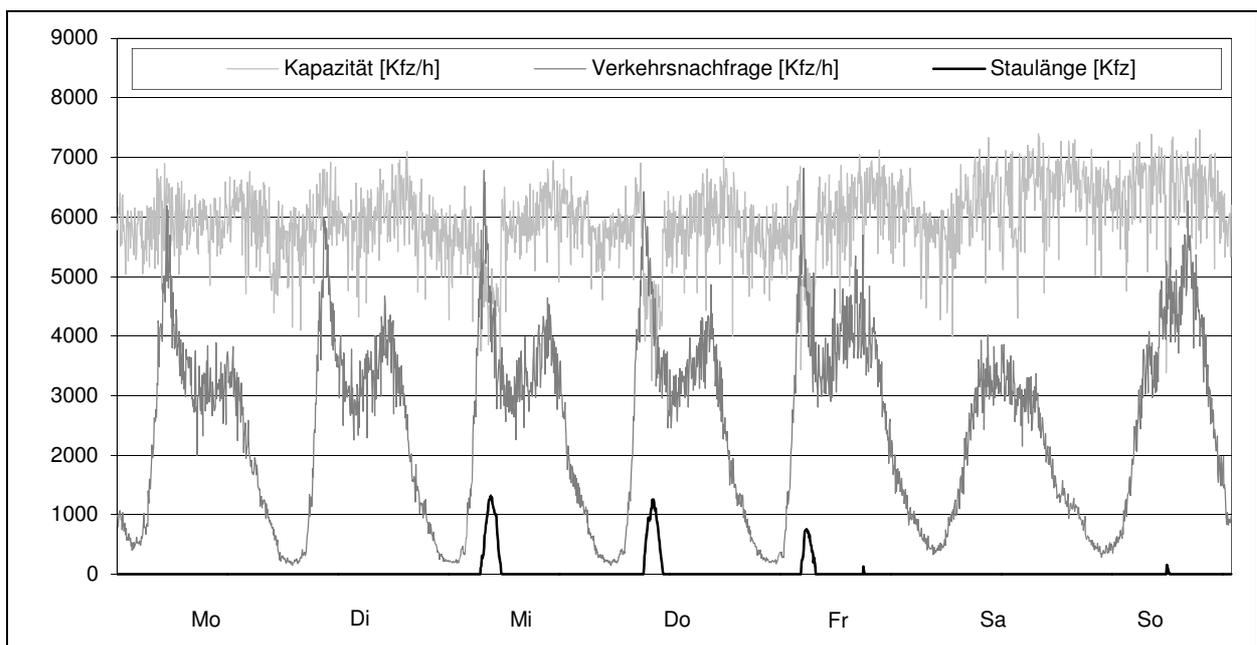


Bild 6-1: Gegenüberstellung von Ganglinien der Verkehrsnachfrage und der Kapazität (BRILON et al., 2004)

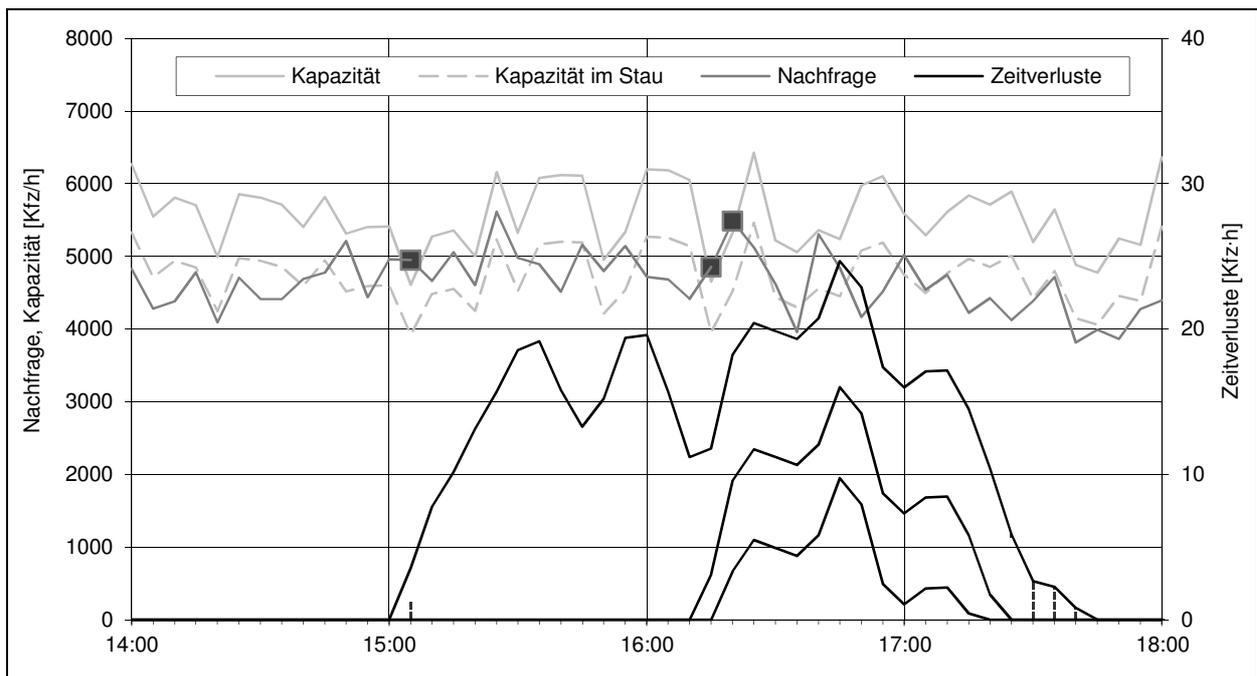


Bild 6-2: Ermittlung der in 5-Minuten-Intervallen verursachten Zeitverluste in KAPASIM

Die Berücksichtigung der Überlagerung von Überlastungen innerhalb eines Stauereignisses ist erforderlich, um zu vermeiden, dass z. B. bei Nachfragespitzen, in denen bereits bei noch ansteigender Verkehrsnachfrage ein lang andauernder Stau ausgelöst wird, sämtliche Zeitverluste der Stunde mit dem Verkehrszusammenbruch zugeordnet werden, während in der folgenden Spitzenstunde rechnerisch keine Zeitverluste verursacht werden. Dies würde den Zusammenhang zwischen der Verkehrsnachfrage und den verursachten Zeitverlusten erheblich verzerren.

Das Berechnungsmodell von KAPASIM quantifiziert die Auswirkungen durch Überlastungen auf einer Teilstrecke (einzelner Engpass). KAPASIM bewertet weitergehend auch den Verkehrsablauf auf längeren Strecken von Autobahnen, die in Teilstrecken aufgeteilt werden. Die Teilstrecken werden durch Querschnitte, an denen sich wesentliche Streckenparameter (z. B. Anzahl der Fahrstreifen, Längsneigung) oder die Höhe der Verkehrsnachfrage (an Anschlussstellen) ändern, begrenzt.

Bei dem verwendeten Warteschlangenmodell wird angenommen, dass die Verkehrszustände an aufeinander folgenden Engpässen unabhängig voneinander sind. Diese Annahme kann unter Voraussetzung einer Teilstreckenlänge von üblicherweise mehreren Kilometern als hinreichend genau angesehen werden. Für jede Teilstrecke werden dann wie oben beschrieben die Verkehrsnachfrage und die Kapazität gegenübergestellt. Die Verkehrs-

nachfrage $q_{i,j+1}^N$ im Intervall i am Beginn der folgenden Teilstrecke $j+1$ lässt sich gemäß Gleichung (6-5) berechnen. Hierbei werden der Abfluss der stromaufwärts gelegenen Teilstrecke, der durch die Kapazität dieser Teilstrecke begrenzt wird, und ggf. die ein- und ausfahrenden Verkehrsmengen berücksichtigt.

$$q_{N,i,j+1} = q_{i,j} - q_{a,i,j} + q_{e,i,j} \quad (6-5)$$

mit

$q_{N,i,j+1}$ = Verkehrsnachfrage im Intervall i am Beginn der folgenden Teilstrecke $j+1$ [Kfz/h]

$q_{i,j}$ = Abflussverkehrsstärke der Teilstrecke j im Intervall i [Kfz/h]

$q_{a,i,j}$ = am Ende der Teilstrecke j im Intervall i ausfahrender Verkehr [Kfz/h]

$q_{e,i,j}$ = am Ende der Teilstrecke j im Intervall i einfahrender Verkehr [Kfz/h]

Weil in der vorliegenden Untersuchung nicht nur der Mittelwert der Summe der Zeitverluste über das Jahr, sondern auch der Mittelwert der Zeitverluste in den einzelnen Stunden des Jahres betrachtet wird, ist eine sehr große Anzahl an Simulationswiederholungen erforderlich. Für jede Strecke und jedes Verkehrsnachfrageszenario gemäß Kapitel 5.5 wurden 1.000 Simulationsläufe durchgeführt. Die überlastungsbedingten Zeitverluste wurden jeweils als Mittelwert über alle 1.000 Wiederholungen ermittelt.

6.3 Ermittlung der Gesamtverlustzeit

Die Fahrtzeit über die betrachtete Strecke setzt sich zusammen aus der Fahrtzeit im fließenden Verkehr (oberer Ast des q-v-Diagramms) und einer möglichen überlastungsbedingten Verlustzeit. Die Fahrtzeit im fließenden Verkehr ist ein streckenbezogener Wert, während die Verlustzeit punktuell an einem Engpass verursacht wird. Zur Bestimmung der Fahrtzeit im fließenden Verkehr wird das Verkehrsflussmodell nach BRILON und PONZLET (1995) verwendet. Die Modellparameter der q-v-Beziehung werden dabei dem HBS (FGSV, 2012) entnommen.

$$v_F = \begin{cases} \frac{v_0}{1 + \frac{v_0}{L_0 \cdot (C_0 - q)}} & \text{für } q \leq C \\ v_{\text{krit}} & \text{für } q > C \end{cases} \quad (6-6)$$

mit

v_F = mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit [km/h]

v_0, L_0, C_0 = Modellparameter

q = Verkehrsstärke [Kfz/h]

C = Kapazität [Kfz/h]

$v_{\text{krit}} = v_F(q = C)$ [km/h]

Anhand der mittleren Fahrtgeschwindigkeit nach Gl. (6-6) und der Länge jeder Strecke kann die mittlere Fahrtzeit im fließenden Verkehr in jeder Stunde bestimmt werden. Die Summe der Fahrtzeit über die betrachtete Strecke wird anschließend nach Gl. (6-7) durch Addition mit einer möglichen überlastungsbedingten Verlustzeit ermittelt:

$$t_F(i) = \frac{L}{v_F(i)} \cdot q_N(i) \cdot t + t_{V,\text{Stau}}(i) \quad (6-7)$$

mit

$t_F(i)$ = Summe der Fahrtzeiten im Intervall i [Kfz·h]

L = Länge der Strecke [km]

$v_F(i)$ = mittlere Fahrtgeschwindigkeit im Intervall i [km/h]

$q_N(i)$ = Verkehrsnachfrage im Intervall i [Kfz/h]

t = Intervalldauer [h]

$t_{V,\text{Stau}}(i)$ = Summe der überlastungsbedingten Verlustzeiten im Intervall i [Kfz·h]

Die Gesamtverlustzeit ist die Differenz zwischen der Fahrtzeit und einer Referenzfahrtzeit. Um eine Referenzfahrtzeit nach Gleichung (6-8) ermitteln zu können, wird eine Referenzgeschwindigkeit

benötigt. Die Wahl dieser Referenzgeschwindigkeit wirkt sich zum Teil deutlich auf die Gesamtverlustzeit aus.

$$t_{F,\text{Ref}}(i) = \frac{L}{v_{\text{Ref}}(i)} \cdot q_N(i) \cdot t \quad (6-8)$$

mit

$t_{F,\text{Ref}}(i)$ = Summe der Referenz-Fahrtzeiten im Intervall i [Kfz·h]

L = Länge der Strecke [km]

$v_{\text{Ref}}(i)$ = Referenz-Fahrtgeschwindigkeit im Intervall i [km/h]

$q_N(i)$ = Verkehrsnachfrage im Intervall i [Kfz/h]

t = Intervalldauer [h]

Für die Wahl der Referenzgeschwindigkeit kommen mehrere Ansätze in Frage. Zum einen kann als Referenzgeschwindigkeit die mittlere Geschwindigkeit im freien Verkehr (bei $q \rightarrow 0$), die angestrebte Fahrtgeschwindigkeit nach den Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (FGSV, 2008) in Höhe von 100 bis 120 km/h für Fernautobahnen oder die Richtgeschwindigkeit von 130 km/h angesetzt werden. Durch den Ansatz einer hohen Referenzgeschwindigkeit können auch Geschwindigkeitsdifferenzen im fließenden Verkehr in der Bewertung berücksichtigt werden, da in nahezu jedem Intervall Zeitverluste auftreten. Eine so hohe Referenzgeschwindigkeit eignet sich jedoch nicht als Zielgröße einer wirtschaftlich effizienten Planung.

Zum anderen ist für die Wahl der Referenzgeschwindigkeit die kritische Geschwindigkeit v_{krit} oder die Geschwindigkeit bei 90 % Auslastung $v_{x=0,9}$ denkbar. Diese wird in jedem Stunden-Intervall neu berechnet. Da die Fahrtgeschwindigkeit bei 90 % Auslastung nur geringfügig über der kritischen Geschwindigkeit liegt, treten allerdings auch hier nur in sehr wenigen Intervallen Zeitverluste im fließenden Verkehr auf.

Als Alternative kann bei der Ermittlung der volkswirtschaftlichen Zeitkosten (Kapitel 8) auf die Miteinbeziehung einer Referenzgröße verzichtet werden. Dabei werden die Kosten nicht für die Verlustzeit, sondern für die gesamte Fahrtzeit ermittelt. Bei der Ermittlung der Fahrtzeit von Lkw wird dabei die maximal zu erreichende Fahrtgeschwindigkeit auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h beschränkt.

Die stündlichen Fahrt- bzw. Verlustzeiten werden als Eingangsgrößen für die Ermittlung der Zeitkosten verwendet. Als Varianten für die Kostenberechnung werden gewählt:

- Berechnung der Zeitkosten anhand der Verlustzeit im Stau $t_{v,Stau}$,
- Berechnung der Zeitkosten anhand der Differenz der Fahrtzeit zu einer Referenzfahrtzeit
 - mit Referenzgeschwindigkeit $v_{Ref} = v_{x=0,9}$,
 - mit Referenzgeschwindigkeit $v_{Ref} = v_0$,
- Berechnung der Zeitkosten anhand der Fahrtzeit t_F auf der betrachteten Strecke.

7 Bewertung der Bemessungsansätze aus planerischer Sicht

7.1 Bemessung nach unterschiedlichen n-ten Stunden

Bei der Wahl einer bestimmten n-ten Stunde der Dauerlinie der Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage für Autobahnen müssen verkehrliche und wirtschaftliche Aspekte gegeneinander abgewogen werden. Die Bemessung nach der höchsten auftretenden Verkehrsnachfrage ist volkswirtschaftlich nicht sinnvoll. Daher wird bei der Bemessung einer Verkehrsanlage eine bestimmte n-te Stunde gewählt, auf deren Grundlage möglichst viele Überlastungen vermieden werden können, ohne zu einer unwirtschaftlichen Auslegung der Anlage zu führen.

Die Bemessungsverkehrsstärke bestimmt die erforderliche Kapazität der Strecke. Die Kapazität ist

von mehreren Einflussfaktoren abhängig. Die größte Auswirkung auf die Kapazität hat die Anzahl der Fahrstreifen einer Strecke. Weitere Faktoren sind die Maßnahmen der Verkehrsregelung, die Längsneigung, der Schwerverkehrsanteil und die Zusammensetzung des Fahrerkollektivs, die durch die Lage der Strecke (innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen) repräsentiert wird. Da die Maßnahmen der Verkehrsregelung – soweit sie zum Zeitpunkt der Planung überhaupt absehbar sind – nur einen geringen Einfluss auf die Kapazität haben und die Längsneigung einer Strecke i. d. R. nicht veränderbar ist, wirkt sich die Wahl der maßgebenden Bemessungsverkehrsstärke hauptsächlich auf die erforderliche Anzahl der Fahrstreifen aus. Im Bild 7-1 wird am Beispiel des Messquerschnitts A45/1GIN deutlich, dass eine Bemessung nach der 30., 50. und 100. Stunde der Dauerlinie jeweils zu drei erforderlichen Fahrstreifen führt, wenn für die Bemessungsstunde eine Verkehrsstärke unterhalb der Kapazität gefordert wird. Das bedeutet, dass es für diesen Messquerschnitt irrelevant ist, ob eine Bemessung nach der 1. Stunde (d. h. der höchsten Verkehrsnachfrage des Jahres) oder der 100. Stunde der Dauerlinie vorgenommen wird. In diesem Beispiel wird erst bei der 154. Stunde der Dauerlinie die Kapazität von 3.600 Kfz/h einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn mit der vorliegenden Streckencharakteristik erreicht. Ein analoger Zusammenhang ergibt sich auch bei einer Bemessung nach Qualitätsstufe D anstelle der Kapazität (Qualitätsstufe E).

Inwieweit sich ein Wechsel der Bemessungsstunde auf die Fahrstreifenanzahl auswirkt, ist abhängig vom Niveau und von der Neigung der Dauerlinie im Bereich der höchst belasteten 200

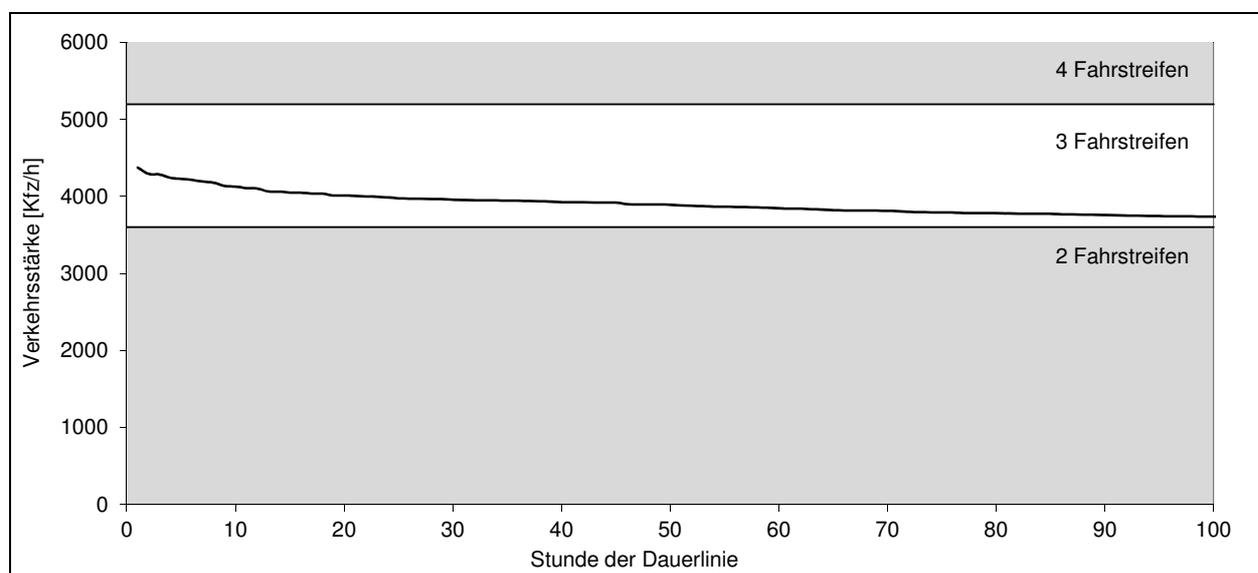


Bild 7-1: Wahl der Fahrstreifenanzahl in Abhängigkeit von verschiedenen n-ten Stunden (Beispielquerschnitt: A45/1GIN)

Stunden des Jahres sowie von den durch die Fahrstreifenanzahl bedingten Kapazitätsgrenzen.

In Bild 7-2 ist für alle 50 untersuchten Messquerschnitte, sortiert nach dem jeweiligen Dauerlinientyp, die erforderliche Fahrstreifenanzahl in Abhängigkeit von der maßgebenden Bemessungsstunde dargestellt. Der Farbverlauf und die Markierungen der 30., 50., 100. und 200. Stunde lassen erkennen, bei welchen Querschnitten zu welcher Bemessungsstunde Änderungen in der erforderlichen

Fahrstreifenanzahl eintreten. Zwischen der 30. und 50. Stunde tritt eine Änderung in lediglich zwei von 50 Fällen auf, zwischen der 50. und 100. Stunde lediglich in vier von 50 Fällen. Eine bestimmte n-te Stunde, an der diese Änderungen vermehrt auftreten, zeigt sich nicht. Ein Vergleich unterschiedlicher Ausbauzustände in Abhängigkeit von der gewählten Bemessungsstunde ist daher in den meisten Fällen nicht möglich. Durch Simulation der Szenarien kann somit nicht untersucht werden, ob

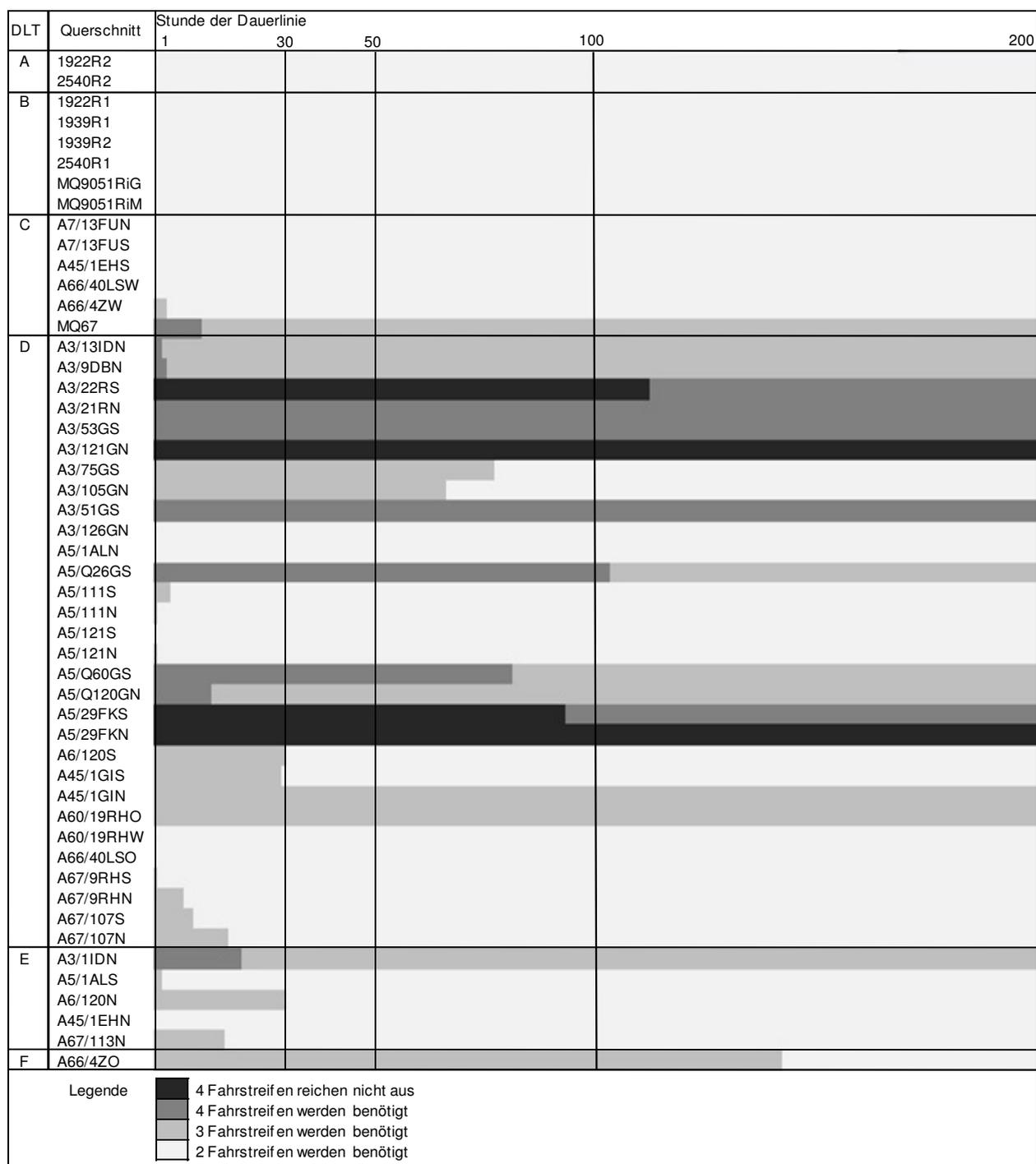


Bild 7-2: Änderung der erforderlichen Fahrstreifenanzahl in Abhängigkeit von verschiedenen n-ten Stunden

ein Wechsel der Bemessungsverkehrsstärke von der 30. zur 50. bzw. 100. Stunde für die 50 gewählten Messquerschnitte Auswirkungen auf die Anzahl und Schwere überlastungsbedingter Verlustzeiten hat, da der zugrunde liegende Ausbauzustand in den meisten Fällen unverändert bleibt. Die Höhe der Verlustzeiten in den ersten $n-1$ Stunden kann jedoch Aufschluss über das Ausmaß der Überlastungen in den Stunden mit einer Verkehrsnachfrage über der Bemessungsverkehrsstärke geben (vgl. Kapitel 8.4).

7.2 Bemessung nach unterschiedlichen Prozentwerten des DTV

Für den Fall, dass keine detaillierten Verkehrsdaten für eine Strecke vorliegen, wird in der Praxis häufig eine Bemessungsverkehrsstärke in Höhe von 10 % des durchschnittlichen täglichen Verkehrs (DTV) als Schätzwert angesetzt. Da es sich hierbei um eine grobe Überschlagsrechnung handelt, gibt das HBS (FGSV, 2001) Bandbreiten an, in denen die 30. Stunde als Bemessungsverkehrsstärke häufig liegt. Die Werte liegen dabei zwischen 9 und 12 % des DTV:

$$q_B = \begin{cases} 0,09 \text{ bis } 0,11 \cdot \text{DTV} & \text{für 6-streifige BAB} \\ 0,10 \text{ bis } 0,12 \cdot \text{DTV} & \text{für 4-streifige BAB} \end{cases} \quad (7-1)$$

mit

q_B = Bemessungsverkehrsstärke [Kfz/h]

DTV = durchschnittlich täglicher Verkehr [Kfz/d]

Allerdings wird darauf hingewiesen, dass gerade bei Strecken mit starkem Urlaubsverkehr eine Einzelprüfung unerlässlich ist, da hier weitaus höhere Prozentwerte auftreten können. Eine Umrechnung der Verkehrsstärke in der 30. Stunde in Prozentwerte des DTV für die hier betrachteten Messquerschnitte bestätigt, dass bei den Strecken des Dauerlinientyps A und B, der vorwiegend vom Urlaubsverkehr geprägt ist, die Prozentwerte zum Teil deutlich über denen der anderen Dauerlinientypen liegen. In Bild 7-3 ist erkennbar, dass die Prozentwerte der Dauerlinientypen mit vorwiegendem Werktagsverkehr oder Durchmischung der Fahrtzwecke zwischen 9 und 13 % liegen, die Werte der Typen A und B hingegen bis zu 19 % erreichen. Aufgrund der erheblichen Bandbreite der einzelnen Werte lässt sich jedoch kein belastbarer Zusammenhang zum Dauerlinientyp ableiten.

Die Auswirkungen einer Bemessung nach einem bestimmten Prozentwert des DTV sind in Bild 7-4 dargestellt. Analog zu Bild 7-2 ist die erforderliche Fahrstreifenanzahl für alle untersuchten Messquerschnitte in Abhängigkeit vom Prozentwert des DTV dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die Wechsel im Bereich von 10 und 11 % des DTV. An dieser Stelle ändert sich die Anzahl der erforderlichen Fahrstreifen bei elf von 50 Querschnitten. Anhand der Bandbreite der Prozentwerte, die im HBS (FGSV, 2001) für die Verkehrsstärke in der 30. Stunde angegeben werden, ist somit lediglich eine überschlägige Rechnung möglich. Zur weitergehenden Betrachtung ist die Durchführung einer Einzelfallprüfung erforderlich.

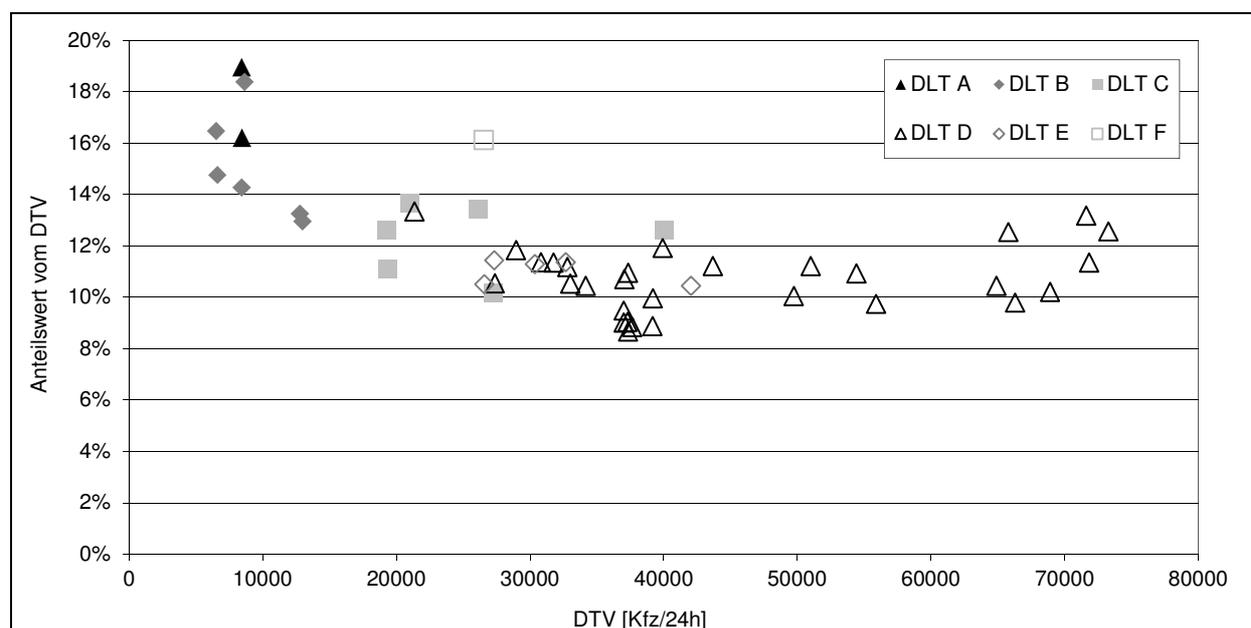


Bild 7-3: Umrechnung der Werte für die 30. Stunde in Prozentwerte des DTV in Abhängigkeit vom Dauerlinientyp

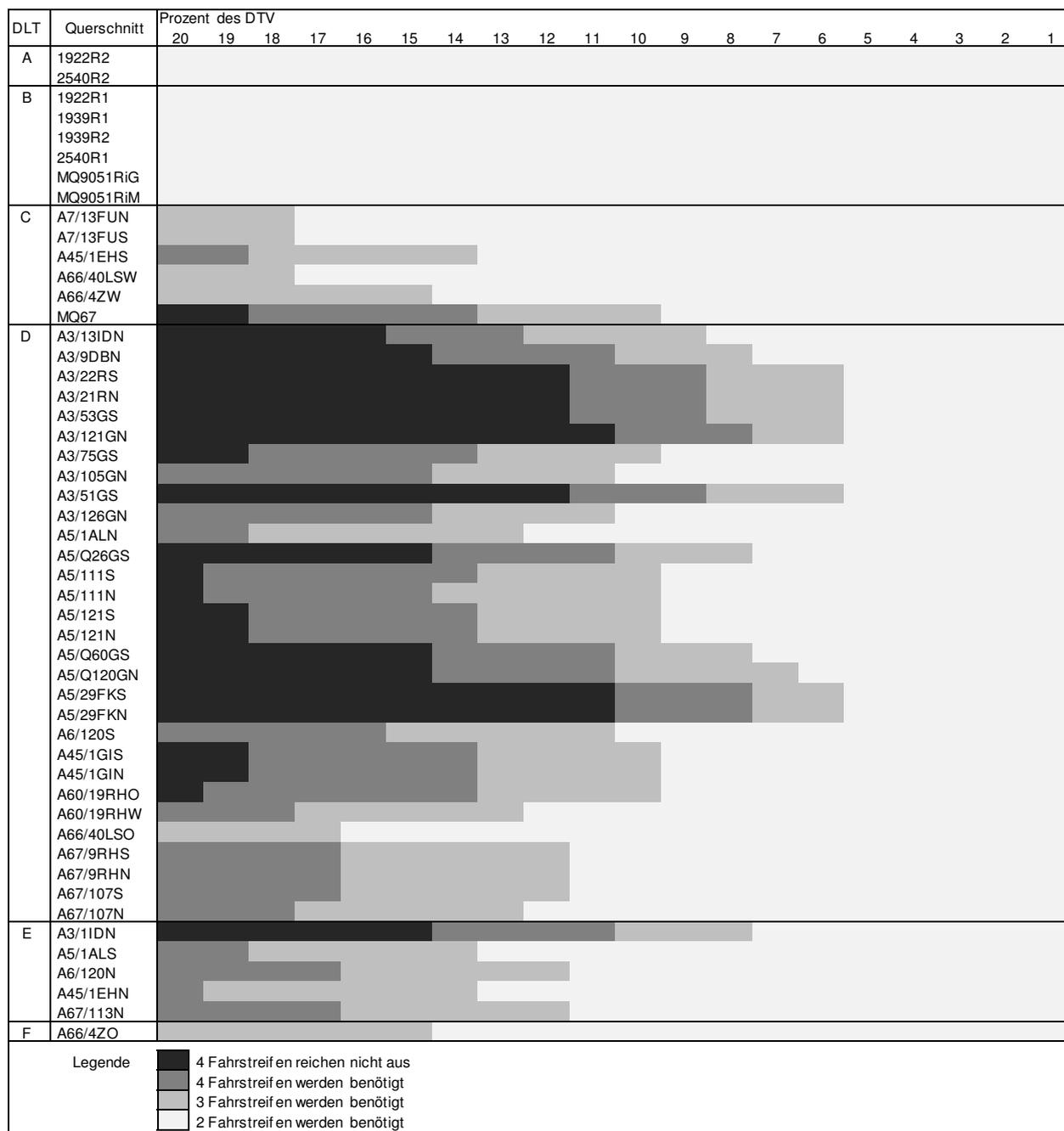


Bild 7-4: Änderung der erforderlichen Fahrstreifenanzahl in Abhängigkeit vom Prozentsatz des DTV

7.3 Differenzierte Bemessung nach Tagestypen

Im Fall einer Durchmischung von Fahrtzwecken in den ersten Stunden der Dauerlinie kommt eine nach Tagestypen differenzierte Bemessung für eine n-te Stunde des Zeitbereichs der Werktage und Urlaubswerktage sowie eine m-te Stunde des Zeitbereichs der Samstags-, Sonn- und Feiertage in Betracht. Die Darstellung der Tagestypen in den ersten Stunden der Dauerlinie für alle untersuchten Querschnitte in Bild 7-5 verdeutlicht die Dominanz bestimmter Fahrtzwecke bei unterschiedlichen

Dauerlinientypen. So liegen die meisten der höchstbelasteten Stunden bei den Dauerlinientypen A und B, die vorwiegend vom Urlaubsverkehr geprägt sind, an Samstagen, Sonn- und Feiertagen, wohingegen bei den Dauerlinientypen C bis F mit regelmäßigem Berufsverkehr die höchsten Belastungen in der Regel an Werktagen auftreten. Die prozentualen Anteile der Tagestypen in den ersten 100 Stunden der Dauerlinie sind in Tab. 7-1 aufgeführt. Bei der Betrachtung der Verteilung der Tagestypen auf die ersten Stunden der Dauerlinie wird deutlich, dass eine Bemessung nach der m-ten Stunde an Samstagen, Sonn- und

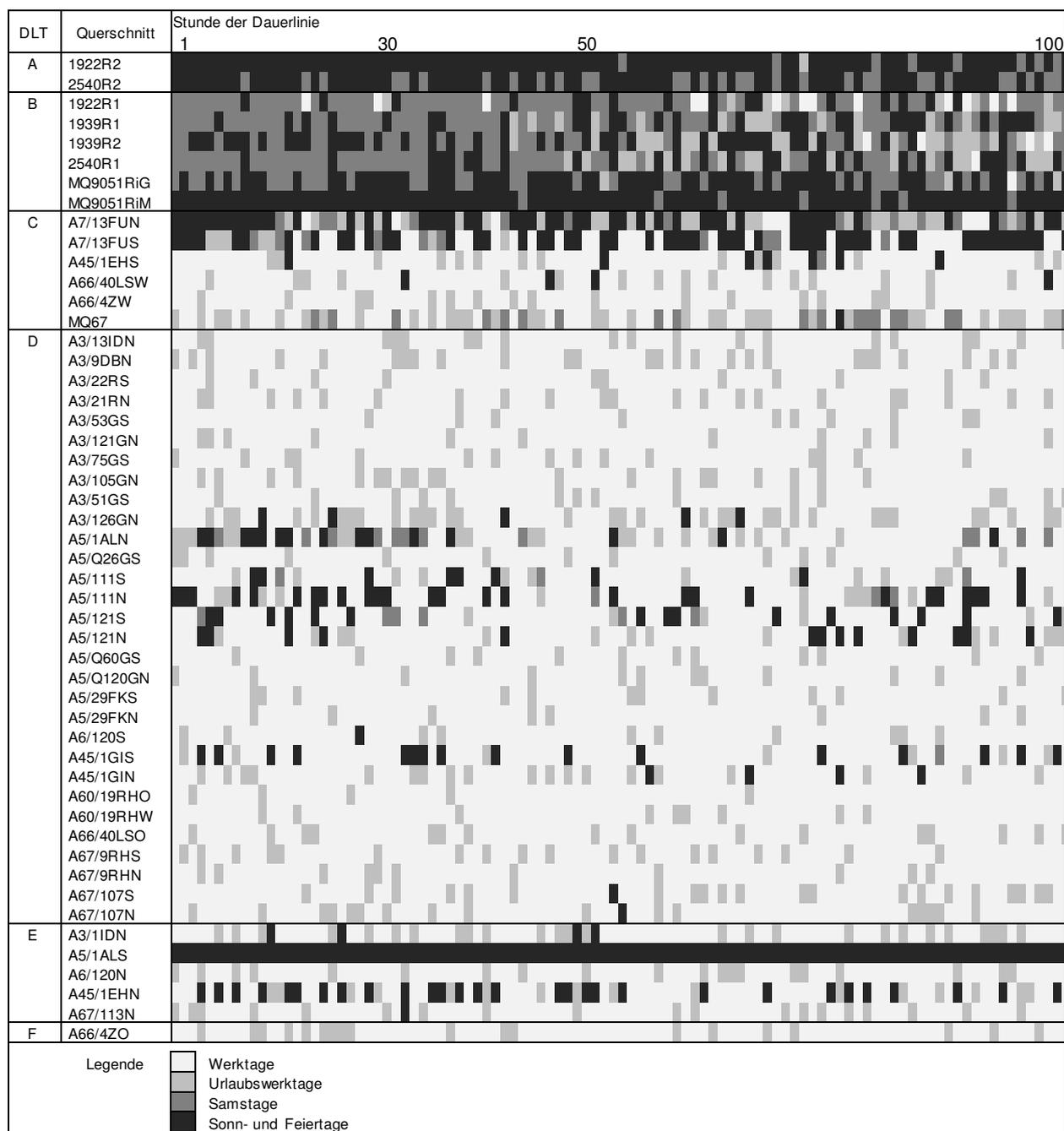


Bild 7-5: Verteilung der Zeitbereiche in den ersten 100 Stunden der Dauerlinie in Abhängigkeit vom Dauerlinientyp

Feiertagen für Querschnitte mit dem Dauerlinientyp A und B in aller Regel der Bemessung nach der n-ten Stunde sämtlicher Tage entspricht, sofern die gleiche Bemessungsstunde zugrunde gelegt wird (d. h. $m = n$). Analog gilt dies auch für den Großteil der Querschnitte mit starkem Werktagsverkehr (DLT C bis F). Eine differenzierte Bemessung für Werktage und Urlaubswerktage sowie Samstage, Sonn- und Feiertage ergibt somit für das betrachtete Untersuchungskollektiv keinen Unterschied im Vergleich zum Ansatz der n-ten Stunde der Dauerlinie sämtlicher Tage.

| DLT | W | U | Sa | S |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| A | 0,00 | 0,50 | 19,50 | 80,00 |
| B | 3,17 | 10,83 | 41,17 | 44,83 |
| C | 54,17 | 19,67 | 7,33 | 18,83 |
| D | 81,10 | 14,50 | 0,83 | 3,57 |
| E | 57,00 | 16,20 | 0,00 | 26,80 |
| F | 81,00 | 19,00 | 0,00 | 0,00 |

Tab. 7-1: Verteilung der Zeitbereiche in Abhängigkeit vom DLT in den ersten 100 Stunden der Dauerlinie [%]

7.4 Ermittlung des bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteils

Neben der Verkehrsstärke hat der angesetzte Schwerverkehrsanteil einen erheblichen Einfluss auf die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Da sich die Ganglinie des Schwerverkehrs stark von der Ganglinie der Gesamtverkehrsstärke unterscheidet, ist es notwendig, den jeweils zugehörigen Schwerverkehrsanteil in die Bestimmung der Kapazität einer Strecke mit einzubeziehen. Aufgrund der – im Vergleich zur Gesamtverkehrsnachfrage – geringeren Güte der Modellierung des Schwerverkehrs werden im Folgenden empirische Werte des Schwerverkehrsanteils analysiert.

Bild 7-6 zeigt am Beispiel des Querschnitts A45/1GIN den empirischen Zusammenhang des Schwerverkehrsanteils und der Stunde der Dauerlinie. Demnach liegt in den ersten Stunden der Dauerlinie ein relativ geringer Schwerverkehrsanteil vor, der erst im hinteren Teil der Dauerlinie (in den Nachtstunden bei geringer Gesamtverkehrsstärke) auf sehr hohe Werte ansteigt. Bei diesem Beispiel liegt der ungewichtete Mittelwert des Schwerverkehrsanteils in allen Stunden des Jahres bei 22 %, der nach der Verkehrsstärke gewichtete Mittelwert über das Jahr bei 14 % und der Mittelwert der ersten 30 Stunden der Dauerlinie bei 11 %.

Hinsichtlich der Verteilung des Schwerverkehrsanteils über die Stunden der Dauerlinie ergibt sich ein deutlicher Zusammenhang mit dem Dauerlinientyp. Bei den Dauerlinientypen A und B mit starkem Urlaubsverkehr ist der Schwerverkehrsanteil in den hochbelasteten Stunden in der Regel sehr gering im Vergleich zum Mittelwert über das gesamte Jahr, da die höchsten Gesamtverkehrsstärken überwiegend an Wochenenden auftreten. Bei den übrigen Dauerlinientypen mit vorwiegend dem Pendlerverkehr oder starker Durchmischung der Fahrtzwecke liegt der Schwerverkehrsanteil

der ersten 30 Stunden bei ungefähr einem Drittel des (ungewichteten) Mittelwertes aller Stunden des Jahres (vgl. Tab. 7-2).

Der Ansatz eines über das Jahr gemittelten Schwerverkehrsanteils bei der Ganzjahresanalyse führt somit zu einer deutlichen Unterschätzung der Kapazität. Daher wurde bei der Berechnung der Verlustzeiten die Kapazität in jedem Stundenintervall anhand des zugehörigen Schwerverkehrsanteils berechnet.

Bei der Festlegung des in der maßgebenden Bemessungsstunde anzusetzenden Schwerverkehrsanteils ist darauf zu achten, dass der Verkehrszustand der hochbelasteten Stunden nachgebildet wird. Einen einfachen Ansatz dafür stellt die Mittelwertbildung des Schwerverkehrsanteils in den ersten n Stunden der Dauerlinie dar. In bestimmten Fällen werden mit diesem Vorgehen jedoch unterschiedliche Belastungszustände gemittelt. Dies betrifft vor allem solche Querschnitte, an denen unter den hochbelasteten Stunden sowohl Werktagen als auch Sonn- und Feiertagen vorkommen. Um die Unterschiede in den Verläufen des Schwerverkehrsanteils im bemessungsrelevanten Bereich der Dauerlinie zu verdeutlichen, sind in Bild 7-7 verschiedene typische Zusammensetzungen dargestellt:

- überwiegend Sonn- und Feiertagsverkehr mit geringen Schwerverkehrsanteilen,
- überwiegend Werktagsverkehr mit hohen Schwerverkehrsanteilen,
- Schwerverkehrsanteile mit geringer Bandbreite,
- Schwerverkehrsanteile mit großer Bandbreite,
- klare Abgrenzung der Schwerverkehrsanteile von Werktagen und Sonn- und Feiertagen,
- Durchmischung der Schwerverkehrsanteile von Werktagen und Sonn- und Feiertagen,
- überwiegend geringe Schwerverkehrsanteile

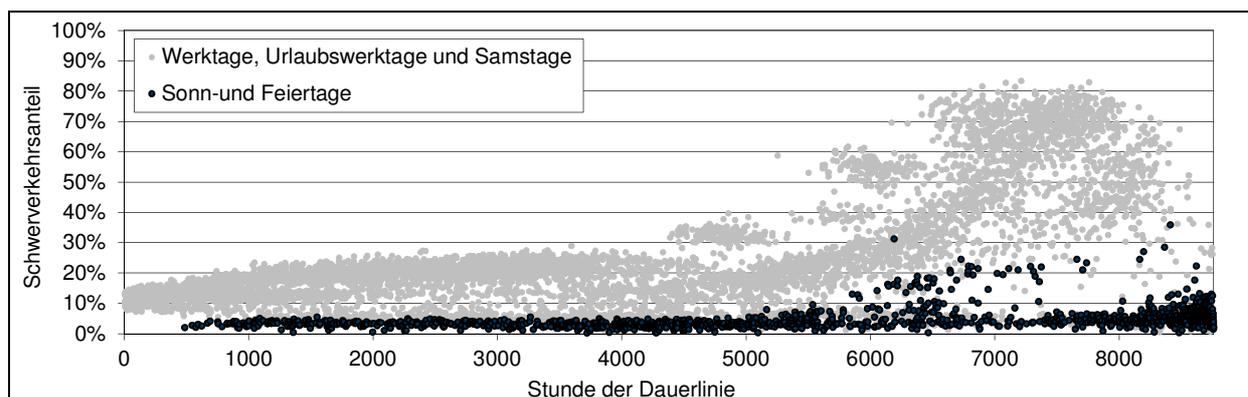


Bild 7-6: Schwerverkehrsanteil im Verlauf der Dauerlinie (Beispielquerschnitt: A45/1GIN)

| DLT | Ungewichteter Mittelwert der ersten n Stunden [%] | | | Ungewichteter Mittelwert aller Stunden des Jahres [%] | Gewichteter Mittelwert aller Stunden des Jahres [%] |
|-----|---|--------|---------|---|---|
| | n = 30 | n = 50 | n = 100 | | |
| A | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 19,9 | 17,3 |
| B | 2,0 | 2,1 | 2,5 | 18,3 | 13,2 |
| C | 9,0 | 9,5 | 9,3 | 22,2 | 14,6 |
| D | 9,8 | 9,9 | 9,9 | 18,3 | 11,6 |
| E | 9,9 | 9,8 | 10,0 | 22,5 | 14,7 |
| F | 5,6 | 5,6 | 6,1 | 16,2 | 5,0 |

Tab. 7-2: Schwerverkehrsanteil in Abhängigkeit vom Dauerlinientyp

und einzelne hohe Werte,

- h) überwiegend hohe Schwerverkehrsanteile und einzelne geringe Werte.

Für den Fall e) zeigt Bild 7-7 am Beispiel des Querschnitts A7/13FUS, dass der Mittelwert des Schwerverkehrsanteils der ersten 100 Stunden der Dauerlinie der Verkehrsnachfrage weder den Zustand an Werktagen, Urlaubswerktagen und Samstagen noch den Zustand an Sonn- und Feiertagen, an denen ein Fahrverbot für schwere Lkw besteht, abbildet. Auch in anderen Fällen ergibt sich teilweise eine erhebliche Bandbreite des Schwerverkehrsanteils in den ersten 100 Stunden der Dauerlinie. Um für alle dargestellten Fälle eine einheitliche Ermittlung des bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteils vorgeben zu können, wurden die folgenden Ansätze untersucht:

- Mittelwert der ersten n Stunden der Dauerlinie,
- Median der ersten n Stunden der Dauerlinie,
- Maximalwert der ersten n Stunden der Dauerlinie,
- Mittelwert des Bereichs der (n - x)-ten bis (n + x)-ten Stunde der Dauerlinie,
- Median des Bereichs der (n - x)-ten bis (n + x)-ten Stunde der Dauerlinie,
- Maximalwert des Bereichs der (n - x)-ten bis (n + x)-ten Stunde der Dauerlinie.

Für die Betrachtung des Bereichs der (n - x)-ten bis (n + x)-ten Stunde wurde in Anlehnung an die Empfehlungen zur Festlegung des bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteils für einbahnige Landstraßen nach ARNOLD und ZIEGLER (2011) der Wert x = 5 untersucht, d. h. es wurde jeweils der Schwerverkehrsanteil in einem Bereich von 11 Stunden um die maßgebende Bemessungsstunde einbezogen. Die unterschiedlichen Ansätze wurden für alle 50 Messquerschnitte und alle vier Verkehrsnachfrageszenarien getestet. Für jedes Ver-

kehrsnachfrageszenario wurden die o. g. Ansätze zur Ermittlung des bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteils für eine Bemessung nach der 30. und der 50. Stunde untersucht.

Die Variabilität des Schwerverkehrsanteils führt dazu, dass die Rangreihung der ersten Stunden in der Dauerlinie der Verkehrsnachfrage von der Rangreihung in der Dauerlinie des Auslastungsgrades abweichen kann. Dies bedeutet, dass jenseits der n-ten Stunde der Dauerlinie der Verkehrsnachfrage höhere und in den ersten n - 1 Stunden geringere Auslastungsgrade als in der maßgebenden Bemessungsstunde auftreten können. Für die Ermittlung des bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteils ist es daher sinnvoll, einen Ansatz zu wählen, für den der resultierende Auslastungsgrad in der Bemessungsstunde (n-te Stunde der Dauerlinie der Verkehrsnachfrage) möglichst genau dem n.-höchsten Auslastungsgrad (d. h. der n-ten Stunde der Dauerlinie des Auslastungsgrades) entspricht. Dies bedeutet:

$$\frac{q_{N,n}}{C(b_{SV})} = x_n \quad \text{oder}$$

$$B_x = \frac{q_{N,n}}{C(b_{SV})} = x_n \quad (7-2)$$

mit:

$q_{N,n}$ = Verkehrsnachfrage in der n-ten Stunde der Dauerlinie der Verkehrsnachfrage [Kfz/h]

$C(b_{SV})$ = Kapazität nach HBS in Abhängigkeit vom bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteil b_{SV} [Kfz/h]

x_n = Auslastungsgrad in der n-ten Stunde der Dauerlinie des Auslastungsgrads [-]

B_x = Beurteilungsgröße [-]

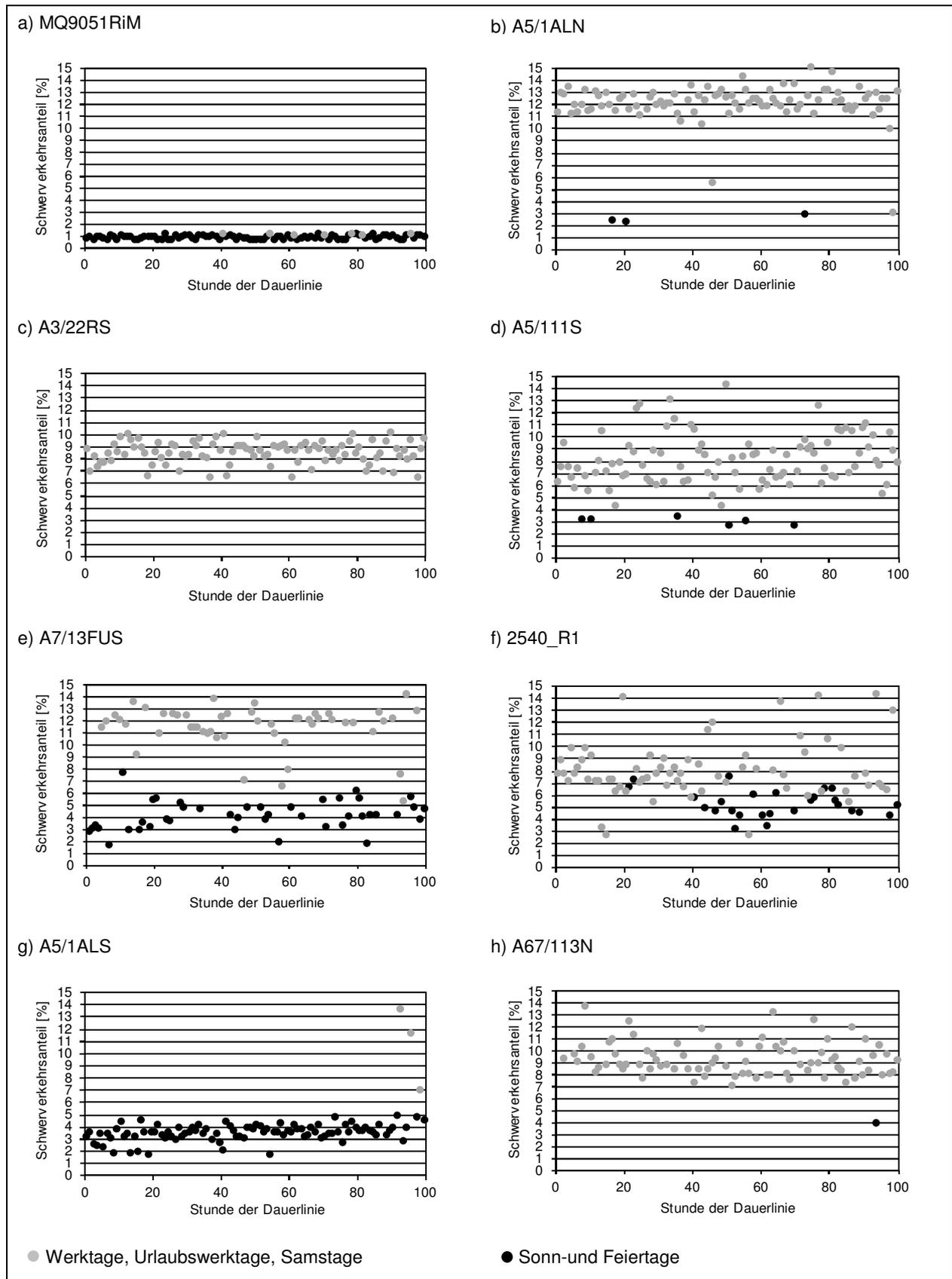


Bild 7-7: Schwerverkehrsanteil im Verlauf der ersten 100 Stunden der Dauerlinie

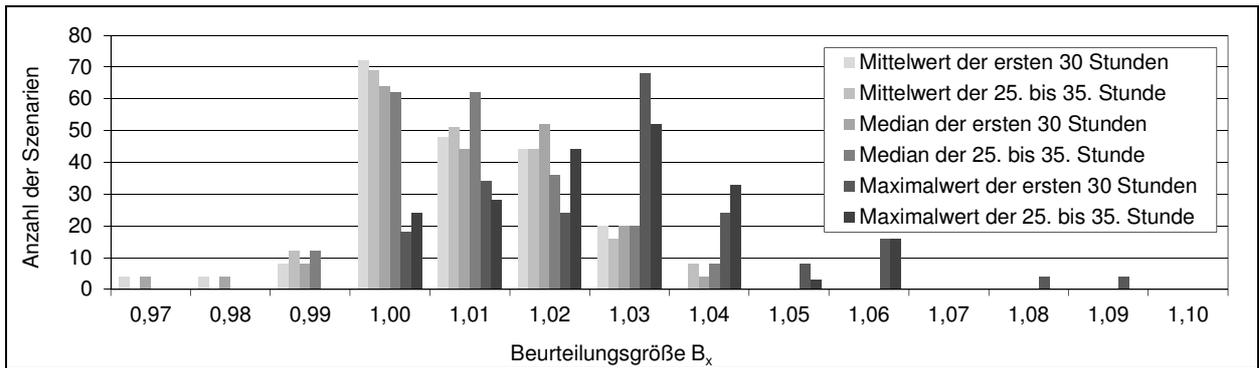


Bild 7-8: Häufigkeitsverteilung der Beurteilungsgröße B_x für verschiedene Ansätze zur Ermittlung des bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteils bei einer Bemessung nach der 30. Stunde

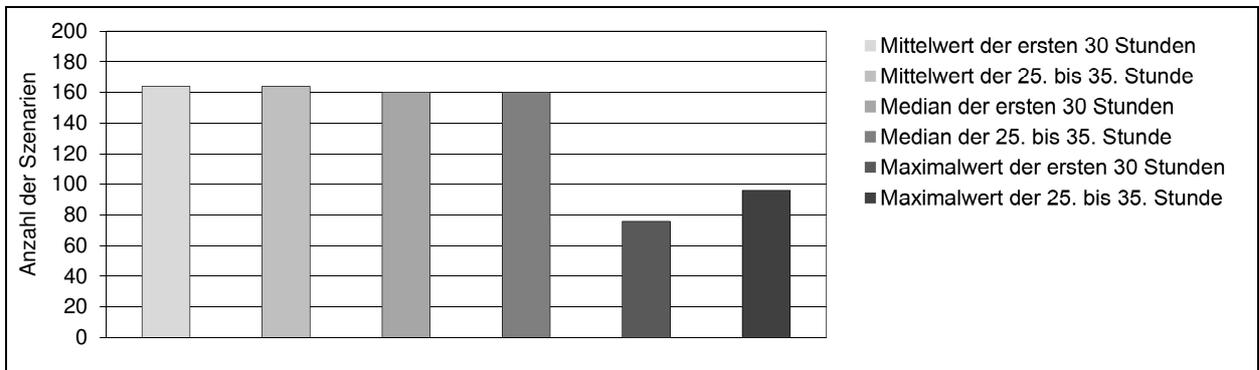


Bild 7-9: Häufigkeit der Beurteilungsgröße B_x im Bereich von 1,00 bis 1,03 für verschiedene Ansätze zur Ermittlung des bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteils bei einer Bemessung nach der 30. Stunde

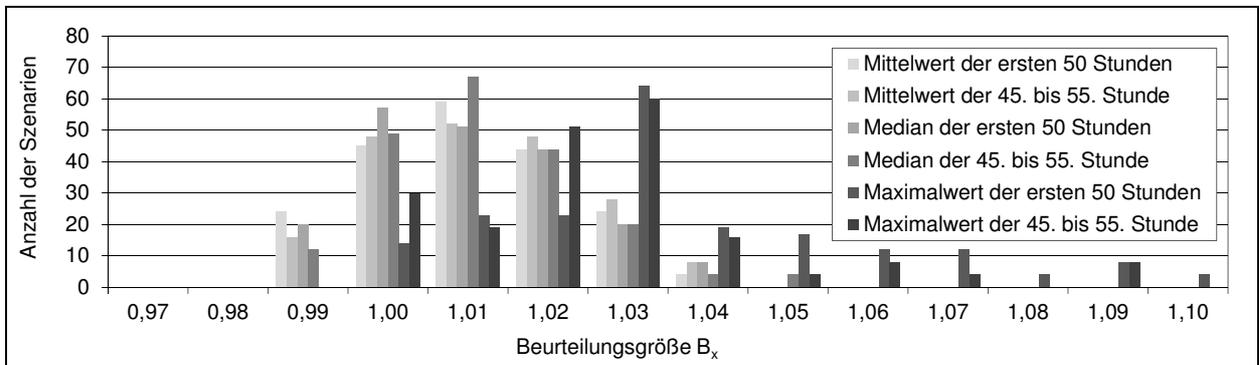


Bild 7-10: Häufigkeitsverteilung der Beurteilungsgröße B_x für verschiedene Ansätze zur Ermittlung des bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteils bei einer Bemessung nach der 50. Stunde

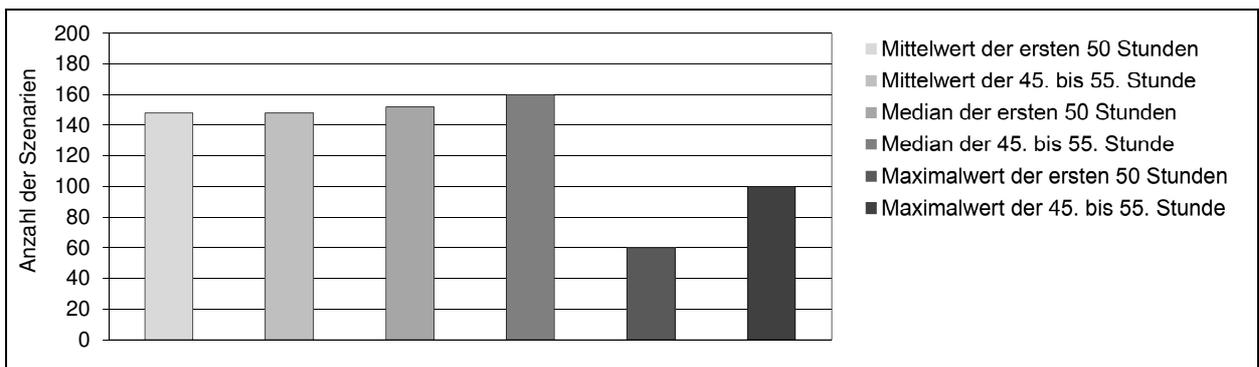


Bild 7-11: Häufigkeit der Beurteilungsgröße B_x im Bereich von 1,00 bis 1,03 für verschiedene Ansätze zur Ermittlung des bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteils bei einer Bemessung nach der 50. Stunde

Demnach kann der Wert B_x gemäß Gl. (7-2) als Beurteilungsgröße für den Vergleich der Ansätze zur Ermittlung des bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteils herangezogen werden. Für $B_x = 1$ stimmt der resultierende Auslastungsgrad in der Bemessungsstunde genau mit dem n.-höchsten Auslastungsgrad überein. Für $B_x > 1$ ist der Auslastungsgrad in der Bemessungsstunde größer als der n.-höchste Auslastungsgrad, d. h. das Bemessungsergebnis liegt auf der sicheren Seite.

In Bild 7-8 und Bild 7-10 ist die Häufigkeitsverteilung der Beurteilungsgröße B_x bei einer Bemessung nach der 30. bzw. 50. Stunde für die 200 untersuchten Szenarien in Abhängigkeit vom zugrunde liegenden Ansatz für die Ermittlung des bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteils b_{SV} dargestellt. Für die Ermittlung der Häufigkeitsverteilungen wurde B_x jeweils auf zwei Nachkommastellen gerundet. Die Auswertungen zeigen, dass die Beurteilungsgröße B_x bei allen Ansätzen für die Ermittlung des bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteils tendenziell über 1 liegt. Demnach führen alle Ansätze zu Bemessungsergebnissen, die eher auf der sicheren Seite liegen.

Bild 7-9 und Bild 7-11 zeigen die Häufigkeit der Beurteilungsgröße B_x im relevanten Bereich von 1,00 bis 1,03 bei einer Bemessung nach der 30. bzw. 50. Stunde. Dabei wird deutlich, dass die Ansätze für b_{SV} unter Verwendung von Mittelwerten und Medianen ähnliche gute Ergebnisse hervorrufen. Bei der Verwendung von Maximalwerten eines bestimmten Bereichs ist der bemessungsrelevante Schwerverkehrsanteil dagegen stark von einzelnen Ausreißern abhängig. Dies führt zu teilweise sehr hohen Abweichungen zwischen dem resultierenden Auslastungsgrad in der Bemessungsstunde und dem n.-höchsten Auslastungsgrad und damit zu einer stärkeren Streuung der Beurteilungsgröße B_x .

Der Vergleich der vier Ansätze unter Verwendung von Mittelwerten und Medianen zeigt bei einer Bemessung nach der 30. Stunde (Bild 7-9) kaum Unterschiede, bei einer Bemessung nach der 50. Stunde (Bild 7-11) ist hingegen unter Verwendung des Medians der 45. bis 55. Stunde der Dauerlinie die beste Übereinstimmung zu erkennen.

Wegen der geringen Abhängigkeit von Ausreißern und der guten Übereinstimmung des resultierenden Auslastungsgrads in der Bemessungsstunde mit dem n.-höchsten Auslastungsgrad ist die Verwendung eines Medianwertes am besten geeignet. Daher wird für die Ermittlung des bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteils der Median im Bereich der (n - 5)-ten bis (n + 5)-ten Stunde der Dauerlinie empfohlen.

8 Bewertung der Bemessungsansätze aus volkswirtschaftlicher Sicht

8.1 Ermittlung der volkswirtschaftlichen Kosten durch Zeitverluste

Zur monetären Bewertung der Zeitverluste werden diese in volkswirtschaftliche Kosten umgerechnet. Die Ermittlung der Verlustzeitkosten erfolgt für alle 50 Messquerschnitte und alle vier Verkehrsnachfrageszenarien. Dabei werden nach den Gleichungen (8-1) und (8-2) die Zeitkosten für den Leicht- bzw. den Schwerverkehr für jedes Stunden-Intervall durch Multiplikation der durch die Ganzjahresanalyse ermittelten Zeitverluste mit den Fahrtzweckanteilen der Stunde und den entsprechenden Zeitkostensätzen berechnet.

$$K_{LV}(i) = t_{LV}(i) \cdot \sum_j (A(i)_j \cdot K_j) \quad (8-1)$$

mit

$$K_{LV}(i) = \text{Zeitkosten des Leichtverkehrs im Intervall } i \quad [€]$$

$$A(i)_j = \text{Anteil des Fahrtzwecks } j \text{ im Intervall } i \quad [-]$$

$$K_j = \text{Kostensatz des Fahrtzwecks } j \quad [€/(\text{Kfz} \cdot \text{h})]$$

$$t_{LV}(i) = \text{Zeitverlust bzw. Fahrtzeit des Leichtverkehrs im Intervall } i \quad [\text{Kfz} \cdot \text{h}]$$

$$K_{SV}(i) = t_{SV}(i) \cdot K_{SV} \quad (8-2)$$

mit

$$K_{SV}(i) = \text{Zeitkosten des Schwerverkehrs im Intervall } i \quad [€]$$

$$K_{SV} = \text{Kostensatz des Schwerverkehrs } [€/(\text{Kfz} \cdot \text{h})]$$

$$t_{SV}(i) = \text{Zeitverlust bzw. Fahrtzeit des Schwerverkehrs im Intervall } i \quad [\text{Kfz} \cdot \text{h}]$$

Zeitbewertung

Zur Berechnung der volkswirtschaftlichen Kosten aus überlastungsbedingten Verlustzeiten werden die Ergebnisse der Ganzjahresanalyse als Eingangswerte für Gleichung (8-1) und (8-2) verwendet. Somit werden lediglich die Kosten der durch den Engpass verursachten Verlustzeiten bestimmt. Um neben den überlastungsbedingten Zeitverlusten die Zeitverluste im fließenden Verkehr mit zu berücksichtigen, wurden im Zuge der Ganzjahresanalyse Fahrtzeiten bestimmt und die Differenz zu einer Referenzfahrtzeit als Eingangswert für die Kostenberechnung ermittelt. Der Be-

stimmung dieser Referenzfahrtzeit wurden dabei zwei unterschiedliche Referenzgeschwindigkeiten zugrunde gelegt (vgl. Kapitel 6.3). Die so bestimmten Zeitkosten sind somit abhängig von der Länge der betrachteten Strecke. Als weitere Variante werden die volkswirtschaftlichen Kosten der gesamten Fahrtzeiten auf der betrachteten Strecke bestimmt.

Fahrtzweckanteile

Für alle 50 betrachteten Messquerschnitte wurde die Zusammensetzung der Fahrtzwecke für den Leichtverkehr für die 8.760 Stunden des untersuchten Jahres 2007 ermittelt (vgl. Kapitel 5.4). In jedem Stunden-Intervall kann somit jeder Fahrtzweck (Pendler, sonstige nicht-gewerbliche Fahrten, gewerblicher Leichtverkehr) mit dem entsprechenden Kostensatz multipliziert werden.

Verwendete Kostensätze

Von BAUM und KRANZ (2012) wurden disaggregierte Zeitkostensätze ermittelt. Mit dem jeweiligen Fahrtzweck und Zeitverlust multipliziert können so für jede Stunde des Jahres Kosten der überlastungsbedingten Zeitverluste berechnet werden. Die ermittelten Kostensätze für den Schwerverkehr und den gewerblichen Leichtverkehr basieren auf einer Bewertung der entgangenen Wertschöpfung

bzw. dem eintretenden Ressourcenverbrauch. Dagegen basieren die Kostensätze für den nicht-gewerblichen Personenverkehr auf zwei unterschiedlichen Ansätzen:

- Ansatz der außermarktlichen Wertschöpfung,
- Zahlungsbereitschaftsansatz.

Den verschiedenen Wertansätzen der Fahrtzweckgruppen entsprechend wird bei beiden Kostensätzen nach Güterverkehr, gewerblichem Verkehr und nicht-gewerblichem Verkehr (Pendler und sonstiger nicht-gewerblicher Verkehr) differenziert. Darüber hinaus wird beim Personenverkehr nach Tagestypen unterschieden (vgl. Tab. 8-1 und Tab. 8-2).

Bei dem Ansatz der außermarktlichen Wertschöpfung wird davon ausgegangen, dass sich die nicht-gewerblich genutzte Zeit aus produktiv genutzter Zeit und unproduktiv genutzter Zeit zusammensetzt. Die produktiv genutzte Zeit (z. B. hauswirtschaftliche Wertschöpfung und ehrenamtliche Tätigkeiten) stellt dabei eine außermarktliche Wertschöpfung dar, in der unproduktiv genutzten Zeit (z. B. Fernsehen, Schlafen) erfolgt keine Wertschöpfung. Der Ansatz der Zahlungsbereitschaft umfasst sowohl die produktiv als auch die unproduktiv genutzte Zeit. Der Kostensatz stellt dabei den Wert dar, den ein Fahrzeuginsasse

| | | Normalwerktage | | Urlaubswerktage | Sonn- und Feiertage |
|-----------------|------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|
| | | Wochenwerktage (Mo bis Fr) | Wochenendwerktage (Samstag) | | |
| Güterverkehr | | 35,99 | | | |
| Personenverkehr | Gewerblich | 28,99 | 30,54 | 28,53 | 31,31 |
| | Nicht gewerblich | Pendlerverkehr | 3,34 | 3,52 | 3,40 |
| | | Sonstiger Verkehr | 3,26 | 3,84 | 3,38 |

Tab. 8-1: Disaggregierte Zeitkostensätze [€/Kfz·h] nach dem Wertschöpfungsansatz (BAUM und KRANZ, 2012)

| | | Normalwerktage | | Urlaubswerktage | Sonn- und Feiertage |
|-----------------|------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|
| | | Wochenwerktage (Mo bis Fr) | Wochenendwerktage (Samstag) | | |
| Güterverkehr | | 35,99 | | | |
| Personenverkehr | Gewerblich | 28,99 | 30,54 | 28,53 | 31,31 |
| | Nicht gewerblich | Pendlerverkehr | 7,89 | 8,32 | 8,04 |
| | | Sonstiger Verkehr | 7,70 | 9,08 | 8,00 |

Tab. 8-2: Disaggregierte Zeitkostensätze [€/Kfz·h] nach dem Wertschöpfungsansatz für den gewerblichen Verkehr und dem Zahlungsbereitschaftsansatz für den nicht-gewerblichen Personenverkehr (BAUM und KRANZ, 2012)

einer Änderung der Fahrtzeit, d. h. der zusätzlichen oder der eingesparten Fahrtzeit, beimit. Die Bewertung mit Zahlungsbereitschaften nimmt keine Unterscheidung hinsichtlich produktiver und unproduktiver Zeit vor. Vielmehr drückt sie eine subjektive Wertung der Straßennutzer aus und weist daher auch Zeiten ohne Wertschöpfung einen positiven Wert zu. Dadurch liegt der Wert bei dem Ansatz der Zahlungsbereitschaft deutlich über dem des Wertschöpfungsansatzes. Im Bereich der nicht-gewerblichen Fahrtzeitbewertung werden in der Praxis häufig Zahlungsbereitschaften verwendet, da sie eine umfassendere Bewertung ermöglichen (BMVBS, 2005; ARNOLD, 2001). Gleichzeitig werden jedoch Fahrtzeiten im Bereich der gewerblichen Fahrten rein anhand des Wertschöpfungsmaßstabs bewertet. Dieser Unterschied im Bewertungsmaßstab kann zu einer relativen Überbewertung der Zeitverluste im nicht-gewerblichen Bereich im Verhältnis zu den gewerblichen Fahrten führen, da hier die unproduktiven Zeiten durch den subjektiven Wertmaßstab positiv gewertet werden. Um sowohl die Bewertung anhand eines einheitlichen Wertmaßstabs vorzunehmen als auch das in der Praxis verbreitetere Verfahren in die Beurteilung einzuschließen, werden die Berechnungen der Verlustzeitkosten für beide Ansätze durchgeführt. Die folgenden Kapitel zeigen die Ergebnisse mit Verwendung des Wertschöpfungsansatzes. Eine Gegenüberstellung beider Kostensätze findet sich in Kapitel 8.7. Die Ergebnisse sind im Anhang tabellarisch dargestellt.

Variation der Verkehrsstärken

Da einige der untersuchten Messquerschnitte in der Realität selten Belastungen im Bereich der Kapazitätsgrenze aufweisen, wurde die Verkehrsnachfrage so weit erhöht, dass Überlastungssituationen auftreten (vgl. Kapitel 5.5). Mit den ursprünglichen Nachfragewerten standen somit für jeden Querschnitt insgesamt vier Datensätze als Eingangswerte für die Ganzjahresanalyse und somit auch für die Kostenermittlung zur Verfügung. Diese wurden für die Ergebnisdarstellung vollständig verwendet.

8.2 Ergebnisse der Ganzjahresanalyse

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der makroskopischen Simulation mit KAPASIM nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet. Neben der Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Dauerlinientypen und

verschiedenen, die Überlastungswirkungen beschreibenden Kriterien (Zeitverluste, Verlustzeitkosten etc.) erfolgen einige Auswertungen aus Gründen der Übersichtlichkeit anhand von drei Beispielquerschnitten, welche nachfolgend kurz vorgestellt werden. Die Querschnitte repräsentieren unterschiedliche Dauerlinientypen.

Um aussagekräftige Auswertungen bezüglich der Überlastungswirkungen auch für die in der Realität eher schwach belasteten Messquerschnitte der Dauerlinientypen A und B zu erhalten, werden die Beispiele auf Basis der variierten Verkehrsnachfragewerte (N_{30} , siehe Kapitel 5.5) dargestellt. Im Anhang sind die Ergebnisse aller 50 untersuchten Messquerschnitte für die variierten Nachfragewerte (N_{30}) tabellarisch aufgeführt. Für die weiteren variierten Datensätze (N_{50} und N_{100}) ändern sich lediglich die absoluten überlastungsbedingten Verlustzeiten und damit die Zeitkosten, jedoch nicht die generellen Zusammenhänge zwischen den Verlustzeiten und dem Verlauf der Dauerlinien. Daher wird auf eine Darstellung dieser Ergebnisse verzichtet.

Beispiel 1:

Der Messquerschnitt A5/121N liegt an der Autobahn A 5 zwischen dem Weinheimer Kreuz und der Anschlussstelle Hemsbach. Die zweistreifige Richtungsfahrbahn weist eine ebene Gradiente auf. Die Lage außerhalb von Ballungsräumen deutet auf ein gemischtes Fahrerkollektiv hin. Der Verlauf der Dauerlinie der Verkehrsstärken eines Jahres entspricht dem Dauerlinientyp D (regelmäßige Werktagsverkehre ohne ausgeprägte Überlastungsspitzen).

Beispiel 2:

Der an der Autobahn A 8 liegende Messquerschnitt MQ 67 zeichnet sich durch eine starke Längsneigung von 7 % im Bereich des Irschenbergs aus. Der dreistreifige Querschnitt liegt im Bereich einer Streckenbeeinflussungsanlage. Der dem Verlauf der Dauerlinie entsprechende Typ C weist auf Verkehre mit starker Mischung der Fahrtzwecke hin. Auf der Strecke überlagern sich Pendler- und – zu bestimmten Zeiten – besonders starke Urlaubs- und Freizeitverkehre.

Beispiel 3:

Der Messquerschnitt 9051RiG liegt an der Autobahn A 95 zwischen den Anschlussstellen Murnau/Kochel und Eschenlohe. Der ebenfalls außerhalb von Ballungsräumen liegende Messquerschnitt liegt im Zuge einer ebenen Strecke. Der zugeordnete Dauerlinientyp B lässt überdurchschnittlich hohe Anteile von Urlaubs-, Ausflugs- oder

Wochenpendlerverkehren vermuten. Weitere Streckencharakteristika für die drei hier aufgeführten Beispiele und für alle anderen untersuchten Messquerschnitte können dem Anhang entnommen werden.

8.3 Zusammenhang zwischen Verkehrsnachfrage und Zeitverlusten

Erwartungsgemäß werden in den ersten Stunden der Dauerlinie die höchsten überlastungsbedingten Verlustzeiten verursacht. Die Verteilung auf die ersten Stunden der Dauerlinie zeigt jedoch, dass nicht zwangsläufig die höchste Verkehrsnachfrage (1. Stunde) die höchsten Verlustzeiten zur Folge hat. Auch in Stunden mit geringerer Verkehrsnachfrage führen Stauereignisse zu zum Teil deutlichen Verlustzeiten. Dieser Sachverhalt ist in Bild 8-1 erkennbar. Eine Ursache dafür ist im stochastischen Charakter der Kapazität und der Verkehrsnachfrage (innerhalb des Stunden-Intervalls) zu sehen, der auch in den durchgeführten Simulationen (mit jeweils 1.000 Wiederholungen) bei der Ermittlung der Verlustzeiten berücksichtigt wurde. Dies kann dazu führen, dass in Stunden mit geringerer Verkehrsnachfrage durch eine zufällig verringerte Streckenkapazität in einzelnen 5-Minuten-Intervallen ein Zusammenbruch des Verkehrsflusses eintritt, der hohe Verlustzeiten nach sich zieht. Für alle Messquerschnitte kann der Zusammenhang zwischen der Stunde der Dauerlinie und der überlastungsbedingten Verlustzeit mit einer Potenzfunktion mit negativem Exponenten beschrieben werden.

Maßgebend für die Höhe der gesamten überlastungsbedingten Verlustzeiten ist weniger die Verkehrsbelastung in der n-ten Stunde, sondern vielmehr der Verlauf der Dauerlinie in den ersten Stunden, der durch den Dauerlinientyp beschrieben wird. Dies wird am Beispiel der drei oben vorgestellten Messquerschnitte deutlich. So haben beispielsweise die Messquerschnitte A5/121N und 9051RiG aufgrund ihrer vergleichbaren Streckencharakteristik im Szenario mit erhöhten Verkehrsnachfragewerten (N_{30}) in der 30. Stunde der Dauerlinie eine identische Verkehrsnachfrage von $q = 3.700$ Kfz/h. Im Vergleich der überlastungsbedingten Verlustzeiten ergeben sich jedoch für den Messquerschnitt 9051RiG um ein Vielfaches höhere Verlustzeiten. Diese werden durch die im Vergleich zur 30. Stunde deutlich höheren Verkehrsnachfragewerte in den ersten 29 Stunden verursacht, während am Messquerschnitt A5/121N durch den flacheren Verlauf der Dauerlinie nur

geringfügig höhere Verkehrsnachfragewerte und damit entsprechend geringere Überlastungswirkungen auftreten. Der Auslastungsgrad ist ein sehr guter Indikator für die zu erwartenden Überlastungswirkungen (vgl. Bild 8-2). Aufgrund des funktionalen Zusammenhangs zwischen dem Auslastungsgrad und der überlastungsbedingten Verlustzeit entsprechend einer Potenzfunktion führen geringe Erhöhungen in der Auslastung zu deutlich höheren überlastungsbedingten Verlustzeiten, wie aus dem Vergleich der drei Beispielquerschnitte hervorgeht (siehe Bild 8-3).

8.4 Zusammenhang zwischen Verkehrsnachfrage und Verlustzeitkosten

Erwartungsgemäß bedingen hohe Verlustzeiten hohe volkswirtschaftliche Kosten, allerdings wirkt sich neben der Fahrtzweckzusammensetzung sowie der Verteilung der Tagestypen in der Dauerlinie besonders der Verlauf der Dauerlinie auf die Höhe der Verlustzeitkosten aus.

Beispiel 1:

Aufgrund des flachen Verlaufs der Dauerlinie des Typs D können für den Messquerschnitt A5/121N über einen großen Bereich der Dauerlinie anfallende Verlustzeitkosten beobachtet werden (siehe Bild 8-4). Auch in Stunden $n > 30$ sinkt der Auslastungsgrad nur langsam ab, so dass weiterhin Überlastungen und damit Verlustzeitkosten auftreten. So fallen bei diesem Beispiel 16 % der Gesamtverlustzeitkosten in den Stunden $n > 300$ an, lediglich 43 % der Verlustzeitkosten werden in den ersten 30 Stunden verursacht.

Beispiel 2:

Am Messquerschnitt MQ67, dem der Dauerlinientyp C zugeordnet wurde, fallen 91 % der Verlustzeitkosten in den ersten 30 Stunden der Dauerlinie an (siehe Bild 8-5). Aufgrund des Auslastungsgrads von z. T. deutlich über 1 treten in diesen Stunden sehr hohe Zeitverluste auf.

Beispiel 3:

Der konvexe Verlauf des Dauerlinientyps B, wie ihn der Messquerschnitt 9051RiG aufweist, führt insgesamt zu noch höheren Verlustzeitkosten, die sich noch stärker auf die ersten Stunden der Dauerlinie konzentrieren (siehe Bild 8-6). 93 % der Verlustzeitkosten werden in den ersten 30 Stunden verursacht, allerdings fallen bereits 26 % in der ersten Stunde und 80 % in den ersten zehn Stunden an.

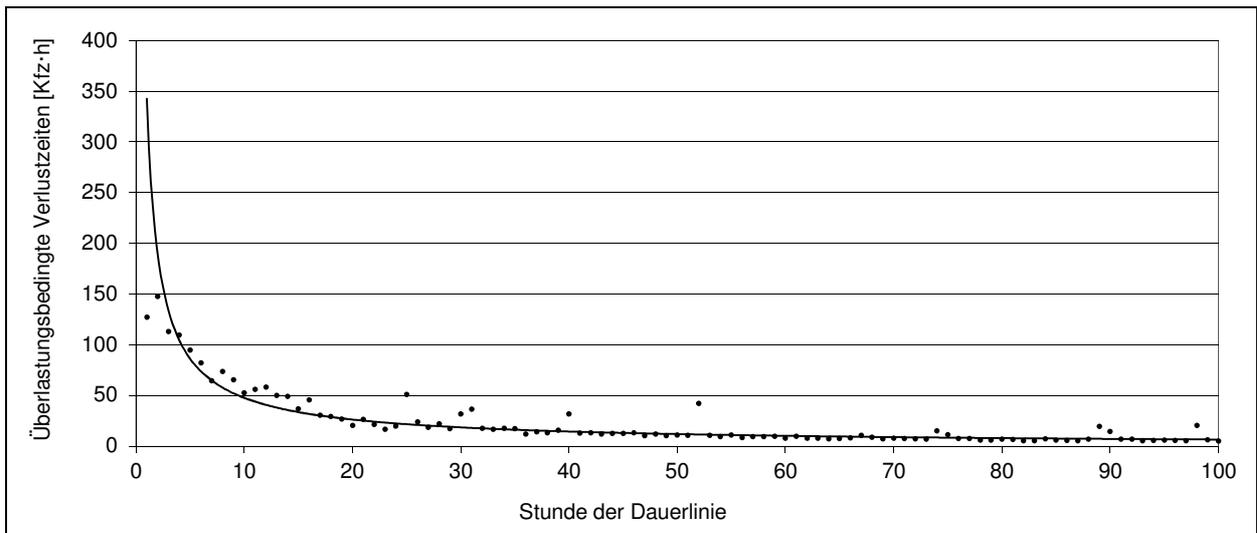


Bild 8-1: Überlastungsbedingte Zeitverluste in den ersten 100 Stunden der Dauerlinie (Beispielquerschnitt: A5/121N, DLT D)

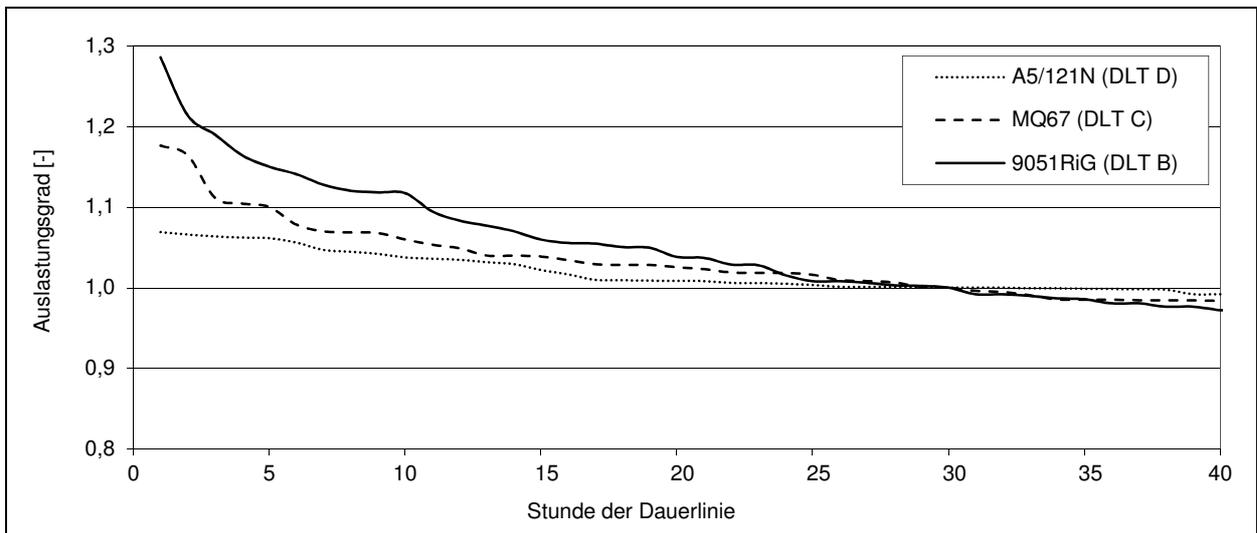


Bild 8-2: Auslastungsgrad in den ersten 40 Stunden der Dauerlinie für die drei Beispielquerschnitte

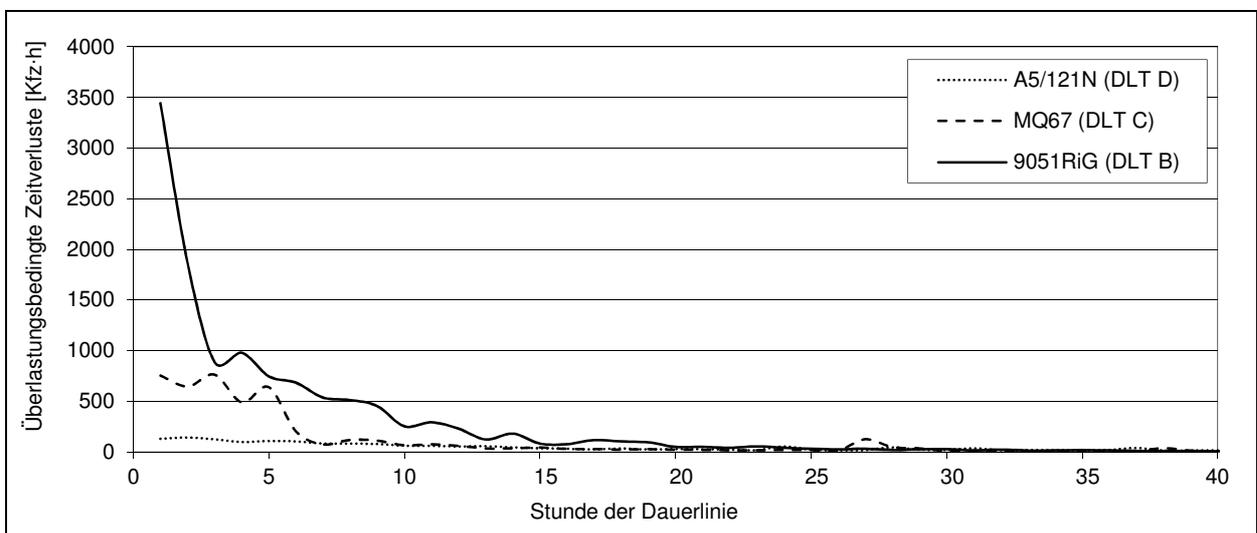


Bild 8-3: Überlastungsbedingte Zeitverluste in den ersten 40 Stunden der Dauerlinie für die drei Beispielquerschnitte

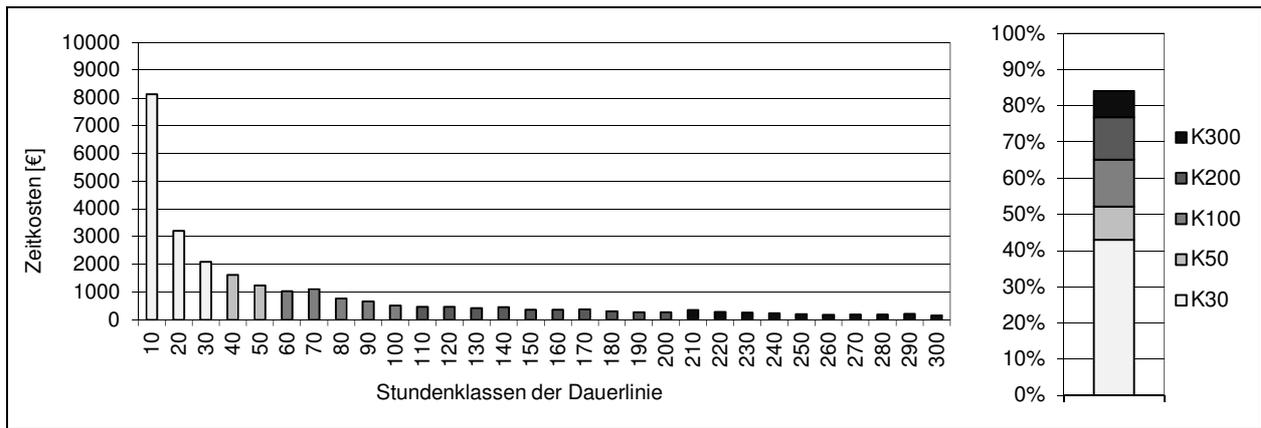


Bild 8-4: Verteilung der Zeitkosten in den ersten Stunden der Dauerlinie (Beispielquerschnitt: A5/121N, DLT D)

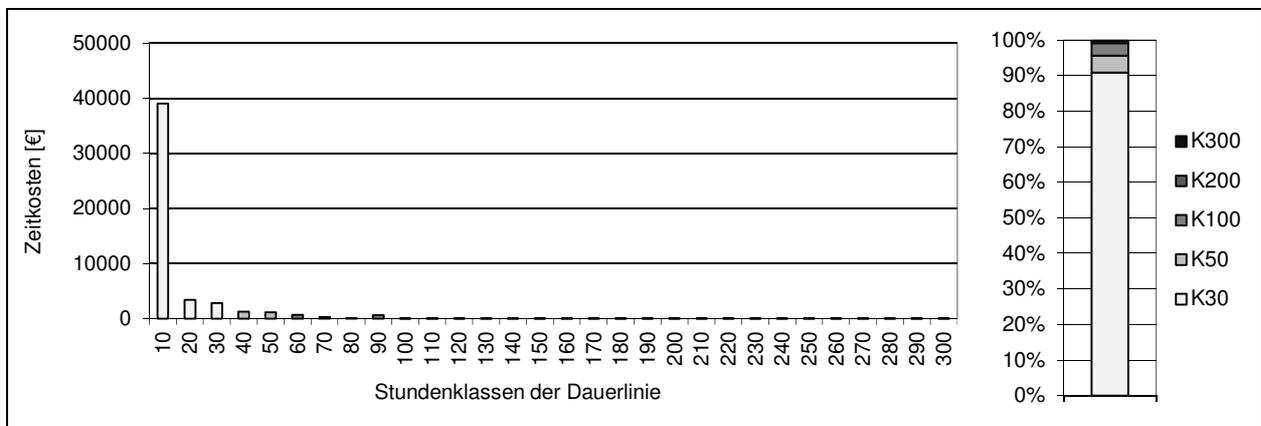


Bild 8-5: Verteilung der Zeitkosten in den ersten Stunden der Dauerlinie (Beispielquerschnitt: MQ67, DLT C)

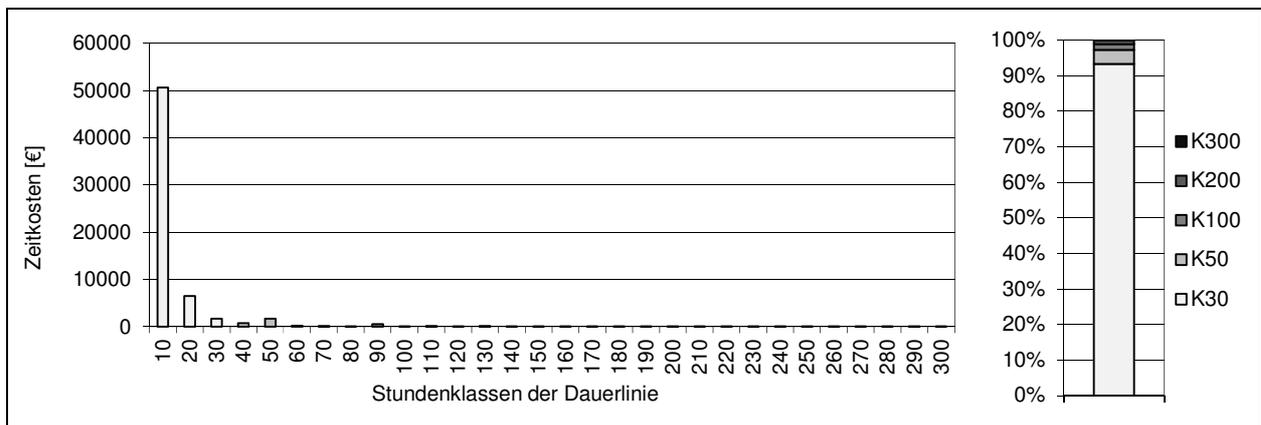


Bild 8-6: Verteilung der Zeitkosten in den ersten Stunden der Dauerlinie (Beispielquerschnitt: 9051RiG, DLT B)

Bild 8-7 und Bild 8-8 zeigen den Anteil der überlastungsbedingten Zeitkosten des Schwerverkehrs an den Gesamtverlustzeitkosten für die unterschiedlichen Dauerlinientypen. Die Gesamtverlustzeitkosten wurden dabei nach beiden in Kapitel 8.1 beschriebenen Kostensätzen ermittelt. Obwohl die Zeitkostensätze des gewerblichen Schwerverkehrs um ein Vielfaches über den Kostensätzen des nicht-gewerblichen Verkehrs liegen, beträgt der Anteil des Schwerverkehrs an den Gesamtverlust-

zeitkosten maximal 24 %. Dies ist auf die relativ geringen Schwerverkehrsanteile während der überlastungsrelevanten Stunden zurückzuführen.

Bei der Aufschlüsselung dieser Anteile des Schwerverkehrs an den Verlustzeitkosten entsprechend den Dauerlinientypen schlägt sich die gemischtere Verkehrszusammensetzung der Dauerlinientypen C bis E negativ auf die Kostenanteile des Schwerverkehrs nieder. Beim Vergleich

| DLT | 0 % | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | SV | LV |
|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|------|------|
| A | | | | | | | | | | | | 7,9 | 92,1 |
| B | | | | | | | | | | | | 10,3 | 89,7 |
| C | | | | | | | | | | | | 19,2 | 80,8 |
| D | | | | | | | | | | | | 24,2 | 75,8 |
| E | | | | | | | | | | | | 21,4 | 78,6 |
| F | | | | | | | | | | | | 14,9 | 85,1 |

Bild 8-7: Anteile der Verlustzeitkosten des Schwerverkehrs an den Gesamtkosten nach dem Ansatz der außermärklichen Wertschöpfung [%]

| DLT | 0 % | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | SV | LV |
|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|------|------|
| A | | | | | | | | | | | | 3,9 | 96,1 |
| B | | | | | | | | | | | | 5,2 | 94,8 |
| C | | | | | | | | | | | | 13,7 | 86,3 |
| D | | | | | | | | | | | | 17,6 | 82,4 |
| E | | | | | | | | | | | | 16,0 | 84,0 |
| F | | | | | | | | | | | | 7,3 | 92,7 |

Bild 8-8: Anteile der Verlustzeitkosten des Schwerverkehrs an den Gesamtkosten nach dem Wertschöpfungsansatz für den gewerblichen Verkehr und dem Zahlungsbereitschaftsansatz für den nicht-gewerblichen Personenverkehr [%]

der Ergebnisse der beiden Kostensätze liegen die Anteile des Schwerverkehrs an den Gesamtkosten beim Wertschöpfungsansatz erwartungsgemäß höher, da dabei die Kostensätze des nicht-gewerblichen Personenverkehrs geringer sind und diese Fahrten somit weniger Einfluss auf die Gesamtsumme haben.

In Bild 8-9 ist die prozentuale Aufteilung der Verlustzeitkosten auf die ersten n Stunden der Dauerlinie für alle Messquerschnitte, sortiert nach Dauerlinientyp, dargestellt. In Farbabstufungen ist dabei gekennzeichnet, wie viel Prozent der Gesamtkosten aus Zeitverlusten bei dem Verkehrsnachfrageszenario N_{30} in den ersten 30, 50, 100, 200 und 300 Stunden anfallen. Der Wert K_{30} steht dabei für den Anteil, der innerhalb der ersten 30 Stunden hervorgerufen wird, K_{50} beschreibt den Anteil der folgenden 20 Stunden (d. h. bis zur 50. Stunde der Dauerlinie). K_{8760} steht für den Anteil, der jenseits der 300. Stunde der Dauerlinie anfällt.

Aus der Darstellung geht hervor, dass für Messquerschnitte mit Urlaubsverkehr als vorherrschenden Fahrtzweck (Dauerlinientypen A und B) fast alle überlastungsbedingten Zeitkosten in den 30 höchstbelasteten Stunden des Jahres anfallen. Da ein Großteil davon jedoch schon in den ersten 10 Stunden verursacht wird, kann eine deutliche Reduktion der überlastungsbedingten Zeitkosten, abgesehen von dem Problem der durch die Fahrstreifenanzahl vorgegebenen Kapazitätssprünge,

nur durch eine Bemessung anhand der höchsten stündlichen Verkehrsnachfrage erreicht werden. Dies widerspricht jedoch dem Anspruch an eine wirtschaftliche Bemessung. Daher ist es nicht sinnvoll, für Strecken mit Dauerlinientyp A und B eine andere maßgebende Bemessungsstunde zu definieren als für Strecken mit Dauerlinientyp C bis F.

Bei starker Durchmischung der Fahrtzwecke verteilen sich die auf Überlastungen zurückzuführenden Verlustzeitkosten bis über die 300. Stunde der Dauerlinie hinaus. So werden beispielsweise beim Dauerlinientyp D im Mittel nur ca. 57 % der Verlustzeitkosten in den ersten 30 Stunden verursacht. Der Anteil der Verlustzeitkosten in der 31. bis 50. Stunde (K_{50}) fällt bei den meisten Querschnitten eher gering aus (ca. 10 %), d. h. die Verlustzeitkosten fallen – je nach Dauerlinienverlauf – entweder überwiegend in den ersten 30 Stunden oder auch in den nachfolgenden Stunden der Dauerlinie ($n > 50$) an. Bei den von deutlichen Pendlerverkehren geprägten Strecken (Dauerlinientypen D und E) tragen die werktäglich wiederkehrenden Belastungssituationen deutlich zu den Gesamtverlustzeiten und damit zu den Gesamtverlustzeitkosten bei.

Aus dieser Darstellung wird ersichtlich, dass insbesondere ein Wechsel von der 30. Stunde der Dauerlinie zur 50. Stunde als Bemessungsgrundlage bezüglich der Verlustzeitkosten nur relativ geringe Änderungen ergibt.

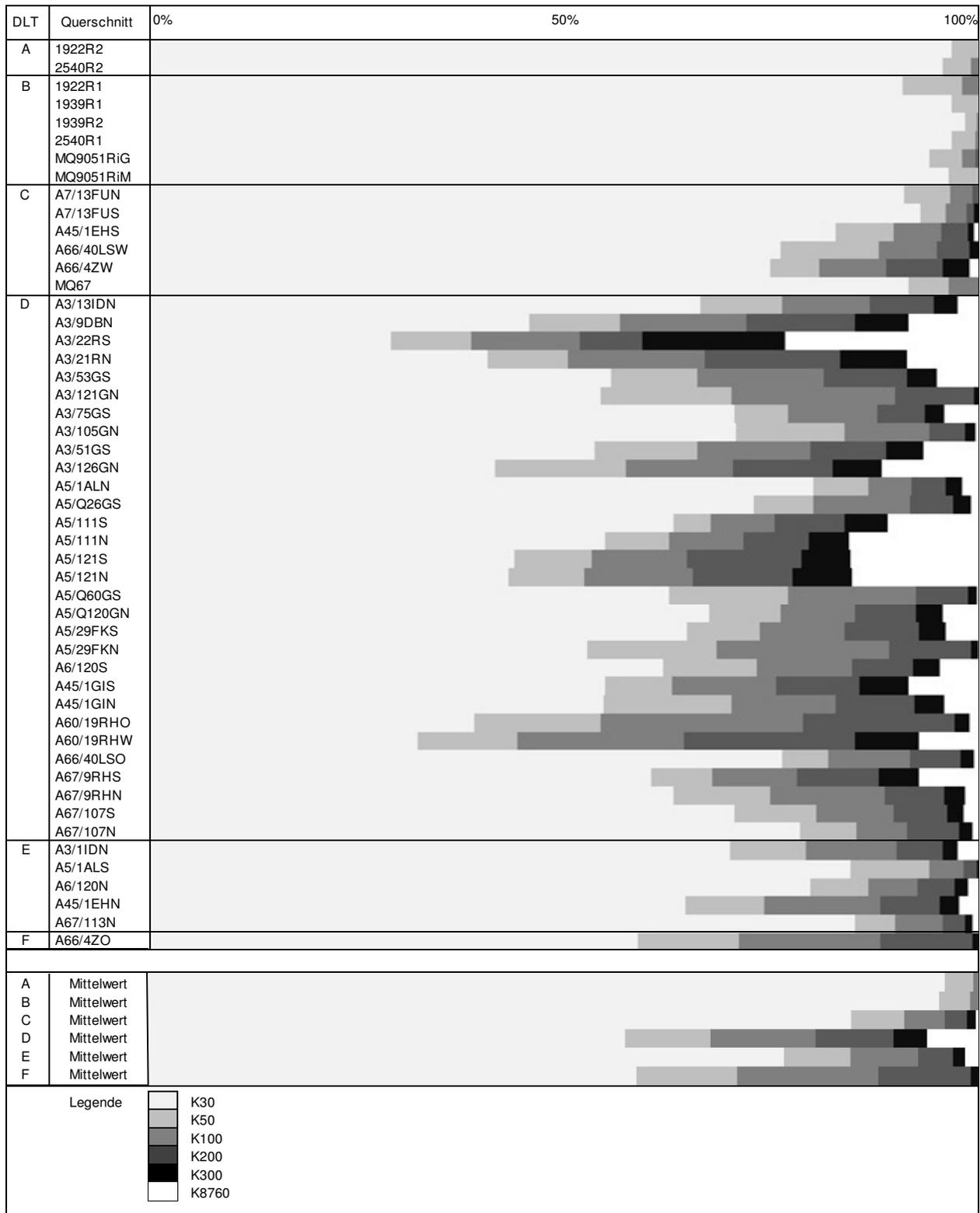


Bild 8-9: Prozentualer Anteil der Zeitkosten in den ersten n Stunden der Dauerlinie mit variiert Verkehrsachfrage (Szenario N₃₀) an den Gesamtzeitkosten

8.5 Zusammenhang zwischen Auslastungsgrad und Verlustzeitkosten

Da in den betrachteten Stunden-Intervallen aufgrund wechselnder Schwerverkehrsanteile unterschiedliche Kapazitätswerte anzusetzen sind, entspricht die Stunde mit der höchsten Verkehrsnachfrage nicht zwangsläufig der Stunde mit dem höchsten Auslastungsgrad (vgl. Kapitel 7.4). Alternativ zur Dauerlinie der Verkehrsnachfrage wurde eine Auswertung anhand der Dauerlinie des Auslastungsgrades vorgenommen. Eine Gegenüberstellung der Ränge der Dauerlinien nach der Verkehrsnachfrage und dem Auslastungsgrad zeigt am Beispiel des Querschnitts MQ67 die zum Teil deutlichen Abweichungen (Bild 8-10).

Werden nur die ersten 300 Stunden der Dauerlinie betrachtet, wird jedoch eine relativ gute Übereinstimmung der Dauerlinienränge in den ersten 30 Stunden deutlich (Bild 8-11). Erst im weiteren Verlauf treten größere Abweichungen auf. Für die Auswertung der belastungsintensiven Stunden ergeben sich somit keine gravierenden Unterschiede zwischen der Betrachtung der Dauerlinie der Verkehrsnachfrage und der Dauerlinie des Auslastungsgrades.

Werden die Verlustzeitkosten über der Dauerlinie des Auslastungsgrades aufgetragen, ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der Dauerlinie der Verkehrsnachfrage (Bild 8-12). Auch hier gibt es keinen streng monoton fallenden Verlauf der Verlustzeitkosten. Ähnlich wie bei der Dauerlinie der Verkehrsstärke wird dies durch die zufälligen

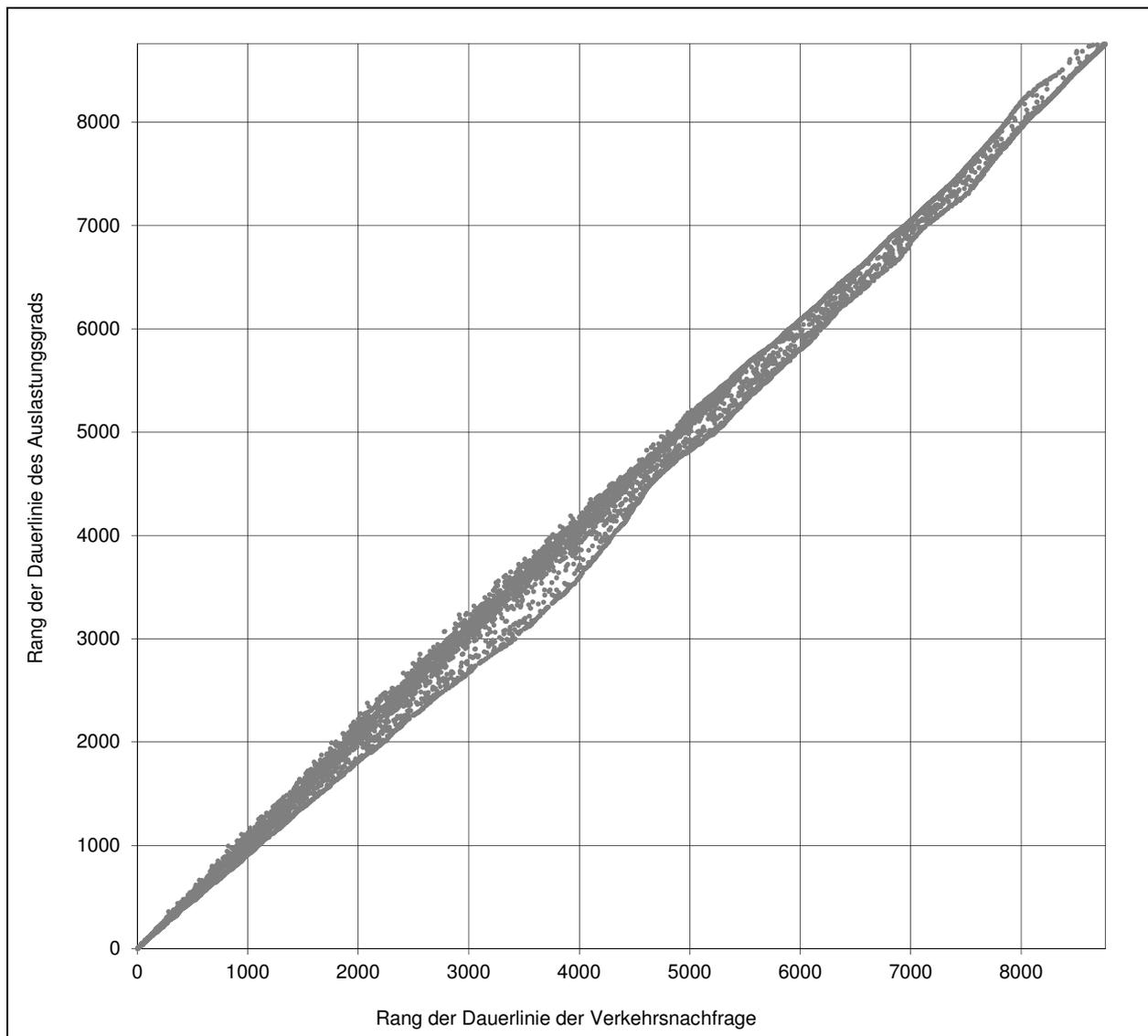


Bild 8-10: Gegenüberstellung der Ränge der Dauerlinie der Verkehrsnachfrage und des Auslastungsgrades (Beispielquerschnitt: MQ67, DLT C)

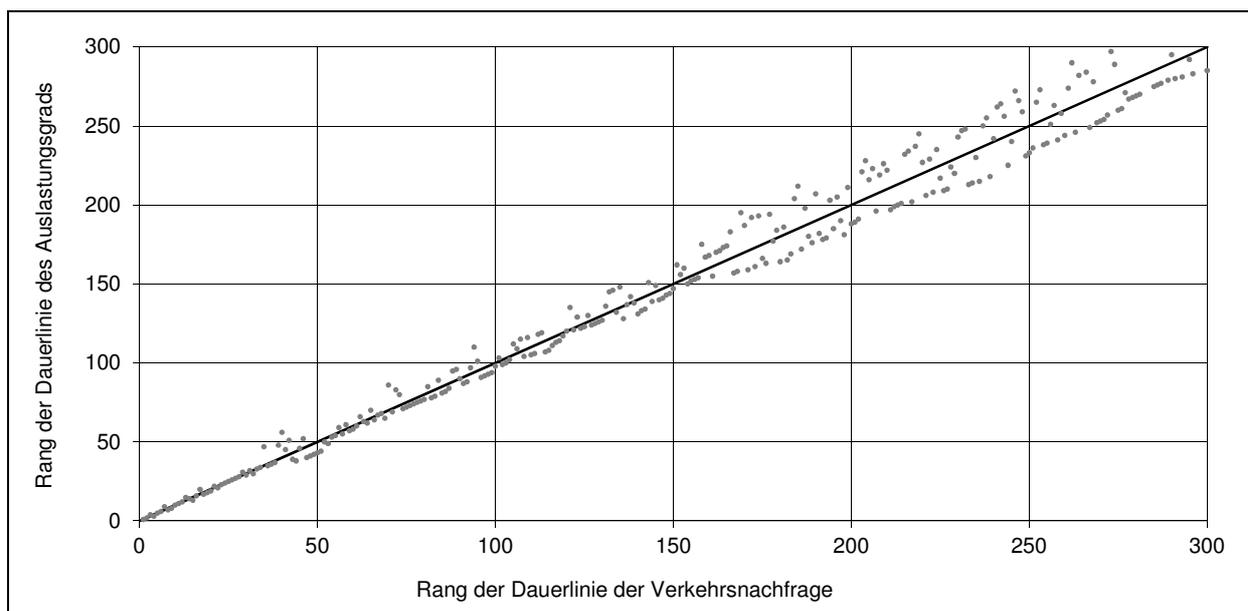


Bild 8-11: Gegenüberstellung der Ränge der Dauerlinie der Verkehrsnachfrage und des Auslastungsgrades für die ersten 300 Stunden (Beispielquerschnitt: MQ67, DLT C)

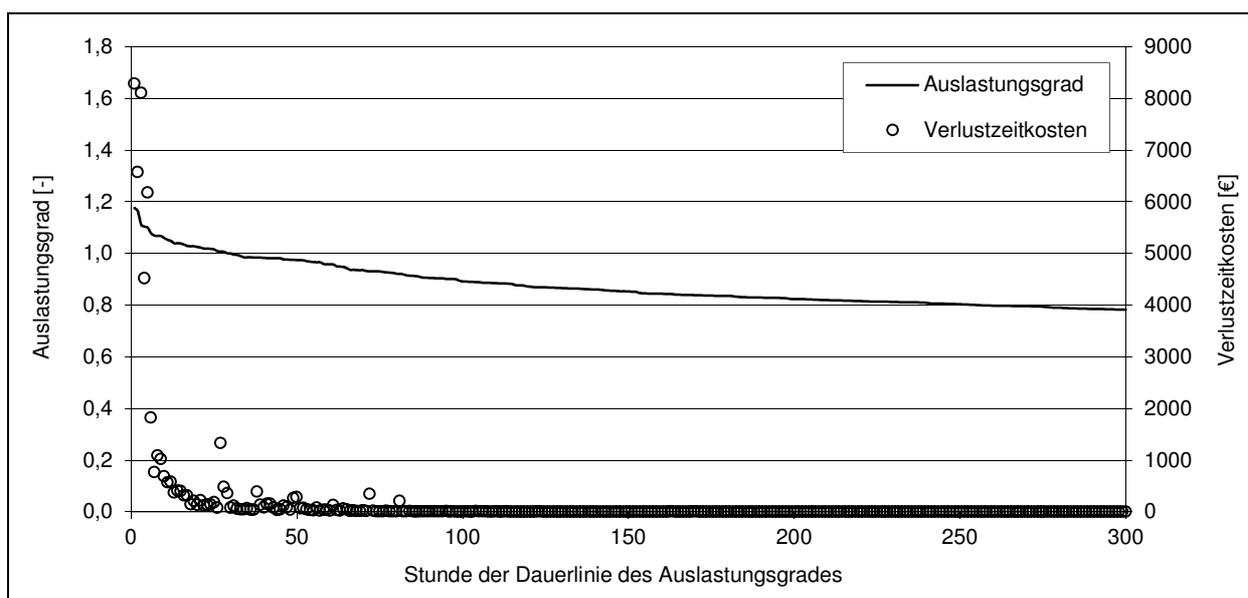


Bild 8-12: Zeitkosten in den ersten 300 Stunden der Dauerlinie des Auslastungsgrades (Beispielquerschnitt: MQ67, DLT C)

Schwankungen der Verkehrsnachfrage und der Kapazität (und damit auch des Auslastungsgrades) innerhalb der betrachteten Stunden-Intervalle hervorgerufen. Über alle Messquerschnitte betrachtet ergibt die Gegenüberstellung der Verlustzeiten bzw. der Verlustzeitkosten mit der Dauerlinie des Auslastungsgrades keinen eindeutigeren Zusammenhang im Vergleich zur Gegenüberstellung mit der Dauerlinie der Verkehrsnachfrage. Die Betrachtung der Dauerlinie des Auslastungsgrades anstelle der Verkehrsnachfrage bringt damit keinen Vorteil.

8.6 Zusammenhang zwischen Tagestyp und Verlustzeitkosten

Da an unterschiedlichen Tagen verschiedene Zeitkostensätze anzusetzen sind, wird im Folgenden der Zusammenhang zwischen dem Tagestyp und den resultierenden Verlustzeitkosten untersucht. Für die drei Beispielquerschnitte wird dazu jeweils die Aufteilung der Verlustzeitkosten über die Tagestypen basierend auf den überlastungsbedingten Verlustzeiten sowie den Fahrtzeiten verglichen.

Beispiel 1:

Am Messquerschnitt A5/121N fallen 74 % der überlastungsbedingten Zeitkosten im werktäglichen Verkehr an (Bild 8-13). Daneben treten einige überlastungsrelevante Verkehrsstärken an Urlaubswerktagen und an Sonntagen auf. Dies ist in 33 der ersten 100 Stunden der Dauerlinie der Fall. Damit repräsentiert die Kostenverteilung in diesem Beispiel gut die Verteilung der Tagestypen innerhalb der Dauerlinie.

Kostenverteilung die Tagestypverteilung innerhalb der Dauerlinie wider.

In Bild 8-16 sind die überlastungsbedingten Zeitkosten am Messquerschnitt MQ67 über einen mehrwöchigen Zeitraum, der sowohl die Oster- als auch die Sommerferien umfasst, aufgetragen. Dabei wurden die Tagestypen für Bayern und die benachbarten Bundesländer Hessen und Baden-Württemberg, die sich in der Lage der Ferienzeiträume unterscheiden, in der Abbildung kenntlich gemacht. Dabei wird deutlich, dass die entstehenden Zeitverluste und die resultierenden Verlustzeitkosten nicht nur im lokalen Zusammenhang gesehen werden dürfen. Gerade der Freistaat Bayern als Ziel- und Transitland für Urlauber zieht

Beispiel 2:

In Bild 8-14 sind die Aufteilungen der Kosten der überlastungsbedingten Verlustzeiten und der Fahrtzeiten für den Messquerschnitt MQ67 über die Tagestypen dargestellt. Auch hier spiegelt die

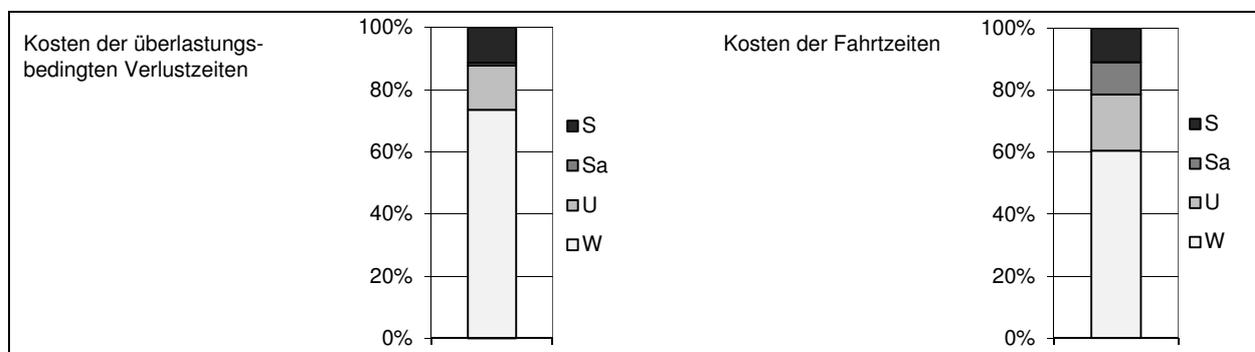


Bild 8-13: Aufteilung der Kosten nach Tagestyp (Beispielquerschnitt: A5/121N, DLT D)

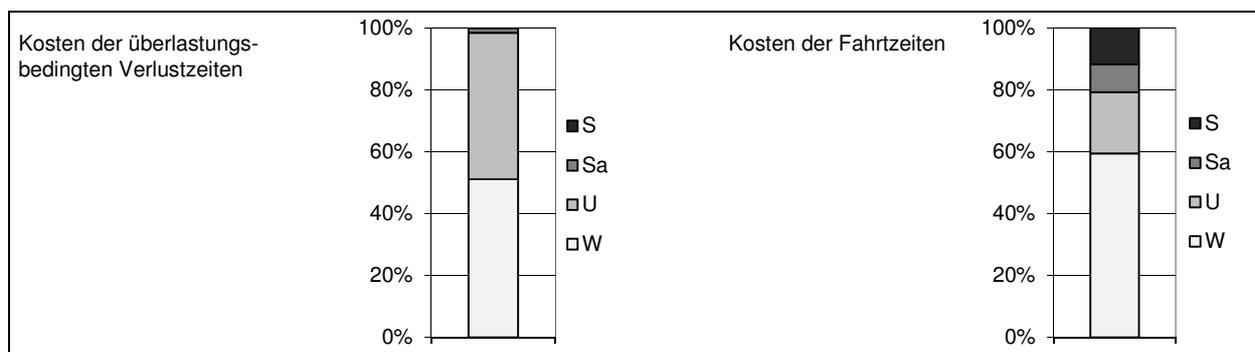


Bild 8-14: Aufteilung der Kosten nach Tagestyp (Beispielquerschnitt: MQ67, DLT C)

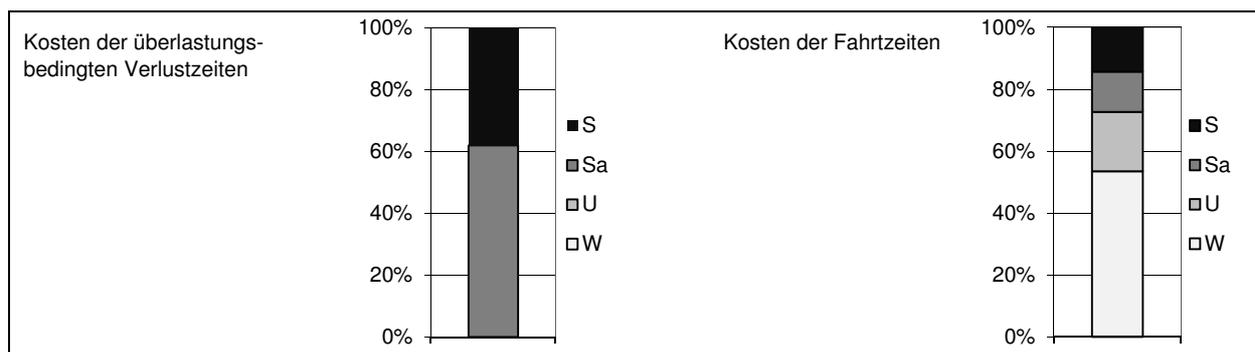


Bild 8-15: Aufteilung der Kosten nach Tagestyp (Beispielquerschnitt: 9051RiG, DLT B)

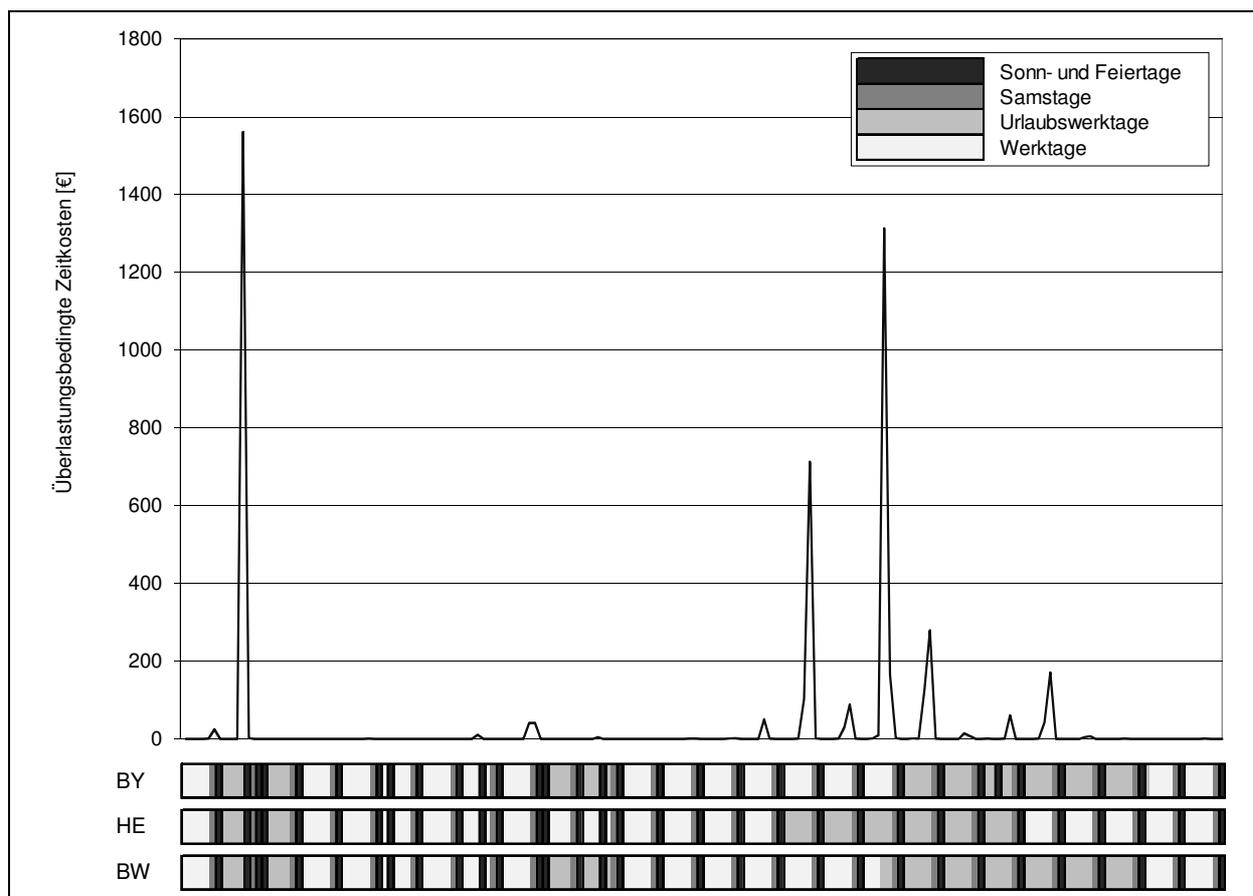


Bild 8-16: Überlastungsbedingte Zeitkosten am Messquerschnitt MQ67 im Zeitraum vom 26.03. bis 23.09.2007 aufgetragen über die Tagestypen der Bundesländer Bayern, Hessen und Baden-Württemberg

auch außerhalb der eigenen Ferienzeiten Urlaubsverkehr an, der teilweise deutliche Überlastungen hervorruft. So sind die in Bild 8-14 dargestellten Anteile der Verlustzeitkosten auf die Tagestypen des Freistaates Bayern bezogen, obwohl die Kosten vorwiegend an den Urlaubswerktagen anderer Bundesländer anfallen (siehe Bild 8-16). Dieser Sachverhalt wird durch die der Kostenermittlung zugrunde liegenden differenzierten Fahrtzweckzusammensetzungen berücksichtigt.

Beispiel 3:

Am Messquerschnitt 9051RiG fallen 93 % der Verlustzeitkosten in den ersten 30 Stunden der Dauerlinie der Verkehrsnachfrage an (Bild 8-15). 14 dieser Stunden fallen auf Samstage, die restlichen 16 Stunden auf Sonntage. Aufgrund des besonders steilen Verlaufs der Dauerlinie fallen bereits in der höchst belasteten Stunde wesentliche Zeitverluste und damit Zeitkosten an. Da diese Stunde an einem Samstag liegt, beeinflusst sie deutlich die Kostenanteile. Wie bei den vorangegangenen Beispielen zeigen die Kostenanteile basierend auf der Fahrtzeit wieder die aus-

gegliche Aufteilung entsprechend der Anteile der Tagestypen im Jahresverlauf.

In Bild 8-17 ist für das Verkehrsnachfrageszenario N_{30} die Aufteilung der überlastungsbedingten Gesamtzeitkosten auf die vier Tagestypen für alle untersuchten Messquerschnitte, sortiert nach Dauerlinientyp, dargestellt. Erwartungsgemäß dominieren bei den Strecken des Dauerlinientyps A die Zeitkosten an Sonn- und Feiertagen. Bei den Strecken des durch überdurchschnittlich hohe Anteile von Urlaubs-, Ausflugs- oder Wochenpendlerverkehren geprägten Dauerlinientyps B werden die Verlustzeitkosten ebenfalls fast ausschließlich an Samstagen und Sonntagen verursacht. Bei den Strecken mit hoher Fahrtzweckdurchmischung (Dauerlinientyp C und D) fallen die Verlustzeitkosten vorwiegend an Werk- bzw. Urlaubswerktagen an. Dies gilt ebenso für die Strecken mit deutlich ausgeprägten Pendler- spitzen, die je nach Lage zum übergeordneten Ballungsraum auch an Sonntagen liegen können (Wochenendpendler).

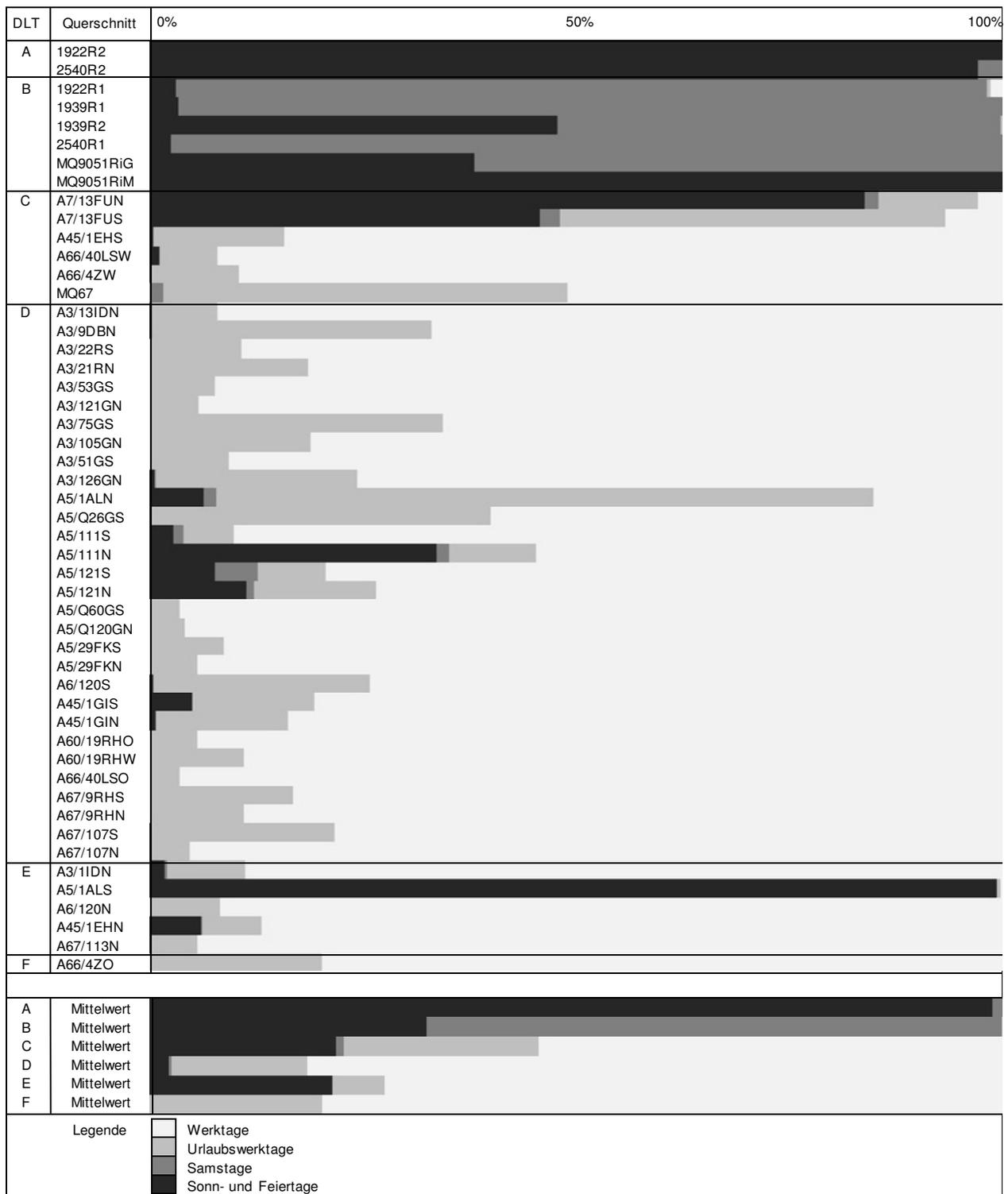


Bild 8-17: Prozentualer Anteil der Zeitkosten der einzelnen Tagestypen an den Gesamtzeitkosten für das Verkehrsnachfrage-Szenario N₃₀

Für alle vier Ansätze der Kostenberechnung bezüglich der zugrundeliegenden Fahrt- bzw. Verlustzeiten (vgl. Kapitel 8.1) ist die Verteilung der Verlustzeitkosten nach Tagestyp in Abhängigkeit vom Dauerlinientyp in Bild 8-18 bis Bild 8-21 dargestellt.

Generell gilt, dass die Anteile der Tagestypen, die für einen Dauerlinientyp typisch sind (z. B. Sonntage für Typ A und B), umso mehr abnehmen, je mehr Zeiten in die Kostenbewertung einfließen.

| DLT | 0 % | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | S | Sa | U | W |
|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|------|------|------|------|
| A | | | | | | | | | | | | 95,6 | 4,4 | 0,0 | 0,0 |
| B | | | | | | | | | | | | 32,2 | 66,1 | 1,0 | 0,6 |
| C | | | | | | | | | | | | 19,3 | 2,1 | 22,9 | 55,7 |
| D | | | | | | | | | | | | 2,4 | 0,4 | 15,2 | 82,0 |
| E | | | | | | | | | | | | 21,6 | 0,0 | 7,2 | 71,2 |
| F | | | | | | | | | | | | 0,0 | 0,0 | 19,9 | 80,1 |

Bild 8-18: Verteilung der Kosten nach Tagestyp (überlastungsbedingte Verlustzeiten) [%]

| DLT | 0 % | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | S | Sa | U | W |
|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|------|------|------|------|
| A | | | | | | | | | | | | 88,9 | 4,5 | 0,0 | 6,6 |
| B | | | | | | | | | | | | 31,6 | 55,5 | 1,7 | 11,1 |
| C | | | | | | | | | | | | 16,3 | 2,4 | 23,8 | 57,4 |
| D | | | | | | | | | | | | 2,5 | 0,4 | 14,7 | 82,4 |
| E | | | | | | | | | | | | 25,8 | 0,0 | 8,2 | 66,0 |
| F | | | | | | | | | | | | 0,0 | 0,0 | 18,9 | 81,1 |

Bild 8-19: Verteilung der Kosten nach Tagestyp (Verlustzeitberechnung mit $v_{x=90\%}$ als v_{Ref}) [%]

| DLT | 0 % | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | S | Sa | U | W |
|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|------|------|------|------|
| A | | | | | | | | | | | | 87,1 | 5,0 | 0,8 | 7,1 |
| B | | | | | | | | | | | | 29,5 | 50,6 | 3,1 | 16,7 |
| C | | | | | | | | | | | | 9,9 | 2,4 | 27,6 | 60,0 |
| D | | | | | | | | | | | | 2,6 | 0,3 | 13,6 | 83,5 |
| E | | | | | | | | | | | | 21,2 | 0,0 | 13,3 | 65,5 |
| F | | | | | | | | | | | | 0,0 | 0,0 | 18,6 | 81,4 |

Bild 8-20: Verteilung der Kosten nach Tagestyp (Verlustzeitberechnung mit v_0 als v_{Ref}) [%]

| DLT | 0 % | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | S | Sa | U | W |
|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|------|------|------|------|
| A | | | | | | | | | | | | 20,9 | 9,9 | 16,4 | 52,8 |
| B | | | | | | | | | | | | 12,0 | 14,0 | 18,4 | 55,6 |
| C | | | | | | | | | | | | 9,6 | 8,9 | 19,0 | 62,5 |
| D | | | | | | | | | | | | 7,5 | 8,4 | 18,9 | 65,2 |
| E | | | | | | | | | | | | 8,2 | 8,1 | 18,9 | 64,7 |
| F | | | | | | | | | | | | 10,8 | 10,4 | 17,6 | 61,2 |

Bild 8-21: Verteilung der Kosten nach Tagestyp (Fahrzeit) [%]

8.7 Vergleich der Kostensätze

Von BAUM und KRANZ (2012) wurden disaggregierte Zeitkostensätze ermittelt, die auf zwei unterschiedlichen Ansätzen beruhen (vgl. Kapitel 8.1). Die volkswirtschaftlichen Kosten der überlastungsbedingten Zeitverluste wurden für alle 200 betrachteten Verkehrsnachfrageszenarien sowohl mit dem Ansatz der außermärklichen Wertschöpfung als auch mit dem Wertschöpfungsansatz für den gewerblichen Verkehr und dem Zahlungs-

bereitschaftsansatz für den nicht-gewerblichen Personenverkehr berechnet. Ein Vergleich der Ergebnisse der Zeitkosten zeigt erwartungsgemäß große Unterschiede in der Höhe der resultierenden Gesamtkosten. Da der Kostensatz des nicht-gewerblichen Personenverkehrs beim Ansatz der Zahlungsbereitschaften deutlich über dem des Ansatzes der außermärklichen Wertschöpfung liegt, sind auch die ermittelten Summen der Zeitkosten bei jedem Verkehrsnachfrageszenario entsprechend höher (siehe Bild 8-22).

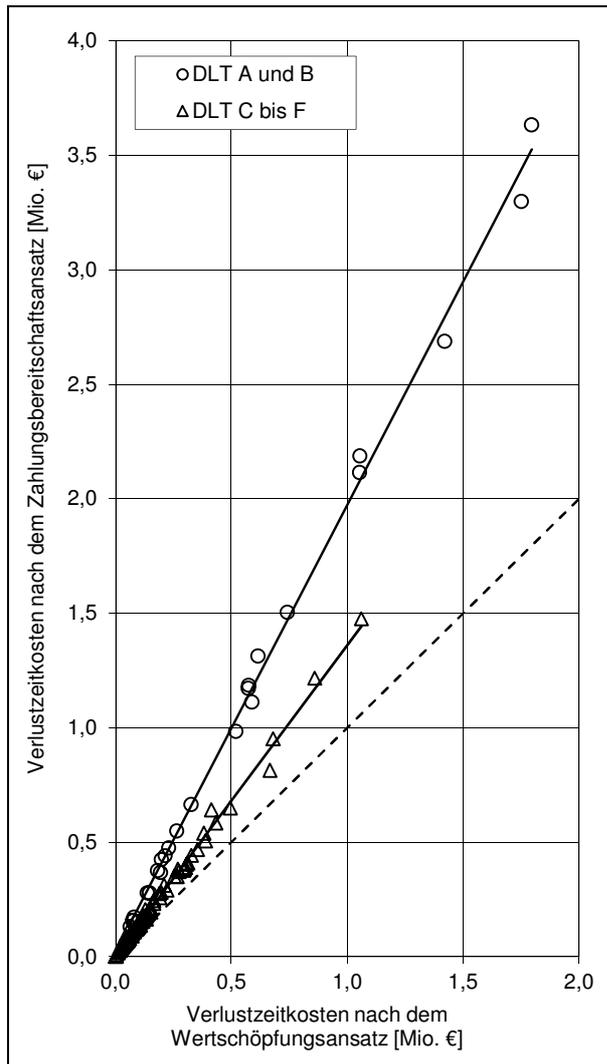


Bild 8-22: Vergleich der Gesamtkosten nach Wertschöpfungs- und Zahlungsbereitschaftsansatz

Deutlich wird dies vor allem bei Betrachtung der Strecken vom Dauerlinientyp A und B, die hauptsächlich vom nicht-gewerblichen Personenverkehr dominiert werden. Hier liegen die mit den Zeitkostensätzen nach dem Zahlungsbereitschaftsansatz berechneten Gesamtkosten im Mittel doppelt so hoch wie für den Ansatz der außermärklichen Wertschöpfung. Bei Strecken vom Dauerlinientyp C bis F, die durch einen höheren Anteil des gewerblichen Verkehrs gekennzeichnet sind, ergeben sich um etwa 60 % höhere Werte.

9 Ermittlung von Zeitverlusten in Stunden-Intervallen

9.1 Kontext der Richtlinien

In den Bemessungsverfahren des HBS (FGSV 2001, 2012) wird für Strecken von Autobahnen der Auslastungsgrad als Maß der Qualität des Verkehrsablaufs verwendet. Die Kapazität einer Autobahn wird dabei als deterministische Größe aufgefasst. Darüber hinaus werden q-v-Beziehungen zur Ermittlung von Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Verkehrsnachfrage angegeben, mit denen Fahrtzeiten im fließenden Verkehr berechnet werden können. Eine Quantifizierung der Auswirkungen von Überlastungen ist mit dem Bemessungsverfahren des HBS nicht möglich.

Im Gegensatz zu den Bemessungsverfahren des HBS, die dem Nachweis der Funktionsfähigkeit einer Straßenverkehrsanlage bei einer bestimmten stündlichen Verkehrsnachfrage dienen, werden im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen auch die Auswirkungen von Überlastungen bei der Ermittlung von Fahrtzeiten mit einbezogen. Die Veränderung von Fahrtzeiten stellt in der Regel eine wesentliche Nutzenkomponente bei der volkswirtschaftlichen Bewertung von Investitionsmaßnahmen im Straßenbau dar.

Bei der Planung von Straßenverkehrsanlagen kommt in der Praxis bislang das Bewertungsverfahren der Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen EWS (FGSV, 1997) zur Anwendung. In den EWS wird die Summe der Fahrtzeiten pro Jahr vereinfachend anhand von 15 Stufen der Verkehrsnachfrage ermittelt. Dabei kommen dreiteilige q-v-Beziehungen zur Anwendung, mit denen der Verkehrsfluss im fließenden Verkehr, im Stau sowie in einem Übergangsbereich zwischen fließendem und gestautem Verkehr nachgebildet wird.

In den zukünftigen Richtlinien für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen soll für die Ermittlung von Fahrtzeiten ein detaillierterer Ansatz auf der Grundlage von Ganglinien der Verkehrsnachfrage in Stunden-Intervallen umgesetzt werden. Im Kontext der Fortschreibung der EWS werden im Folgenden die Ergebnisse der in der vorliegenden Untersuchung durchgeführten Simulationen hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen dem Auslastungsgrad und den in Stunden-Intervallen verursachten Fahrtzeitverlusten ausgewertet.

9.2 Analytische Ermittlung von Fahrtzeiten auf Autobahnen

9.2.1 Verfahrensansatz

In den EWS (FGSV, 1997) erfolgt die Ermittlung der Geschwindigkeit in drei Verkehrsstärkestufen, für die unterschiedliche Geschwindigkeitsfunktionen angesetzt werden. Die Übergänge an den Grenzen der einzelnen Verkehrsstärkestufen erfolgen allerdings nicht kontinuierlich, so dass die resultierende, zusammengesetzte Funktion der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke Knicke und in einigen Fällen auch Sprünge aufweist. Für den Zustand des gestauten Verkehrs auf Autobahnen wird pauschal eine Geschwindigkeit von 20 km/h angesetzt.

Die Ermittlung von Fahrtzeiten durch eine funktionale Beziehung zwischen Verkehrsstärke und mittlerer Geschwindigkeit für alle Verkehrszustände bedeutet, dass die berechneten Fahrtzeiten von der Länge der betrachteten Strecke abhängig sind. Für den Zustand des fließenden Verkehrs ist dies zutreffend. Bei einer Überlastung auf einer Strecke kann dagegen nicht davon ausgegangen werden, dass sich der Stau immer genau über die betrachtete Strecke ausdehnt. Vielmehr bilden sich Staus in aller Regel an geometrischen oder verkehrlichen Engpässen, z. B. an einer hoch belasteten Zufahrt am Beginn der Strecke oder an einer Steigungsstrecke, und breiten sich entgegen der Fahrtrichtung aus. Die durch den Stau verursachten Zeitverluste sind dabei vom Ausmaß der Überlastung, ausgedrückt durch den Auslastungsgrad, nicht jedoch von der Länge der betrachteten Strecke abhängig.

Vor diesem Hintergrund wird ein zweigeteilter Modellansatz zur Ermittlung von Fahrtzeiten auf Autobahnen vorgeschlagen, bei dem zwischen einer streckenabhängigen und einer streckenunabhängigen Fahrtzeitkomponente differenziert wird:

- Streckenabhängige Komponente: Ermittlung der Fahrtzeit anhand der q-v-Beziehung,
- Streckenunabhängige Komponente: Ermittlung der überlastungsbedingten Fahrtzeitverluste über einen funktionalen Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad und der Summe der Fahrtzeitverluste.

Die Gesamtfahrtzeit ergibt sich als Summe aus der streckenabhängigen Fahrtzeit und den streckenunabhängigen Fahrtzeitverlusten infolge von Überlastungen. Das vorgeschlagene Vorgehen entspricht grundsätzlich der in Abschnitt 6.3 erläuterten Methodik für die Ermittlung der Gesamtverlustzeit im Rahmen der Simulationsrechnungen.

9.2.2 Fahrtgeschwindigkeit im fließenden Verkehr

Zur Bestimmung der mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit im fließenden Verkehr können die q-v-Beziehungen des HBS (FGSV, 2012) verwendet werden (vgl. Bild 9-1). Sie basieren auf dem Verkehrsflussmodell nach BRILON und PONZLET (1995):

$$v(q) = \frac{v_0}{1 + \frac{v_0}{L_0 \cdot (C_0 - q)}} \quad (9-1)$$

mit

$v(q)$ = mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit [km/h]

v_0, L_0, C_0 = Modellparameter

q = Verkehrsstärke [Kfz/h]

Das HBS liefert Werte der Modellparameter für Strecken von Autobahnen in Abhängigkeit von der Anzahl der Fahrstreifen, der Längsneigung, der Geschwindigkeitsregelung und der Lage der betrachteten Strecke (innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen).

Für Verkehrsstärken über der Kapazität ist neben den überlastungsbedingten Verlustzeiten ebenfalls eine streckenabhängige Komponente der Fahrtzeit zu berücksichtigen. Dafür kann die Geschwindigkeit v_{krit} bei Erreichen der Kapazität zugrunde gelegt werden (vgl. Gleichung (6-6)).

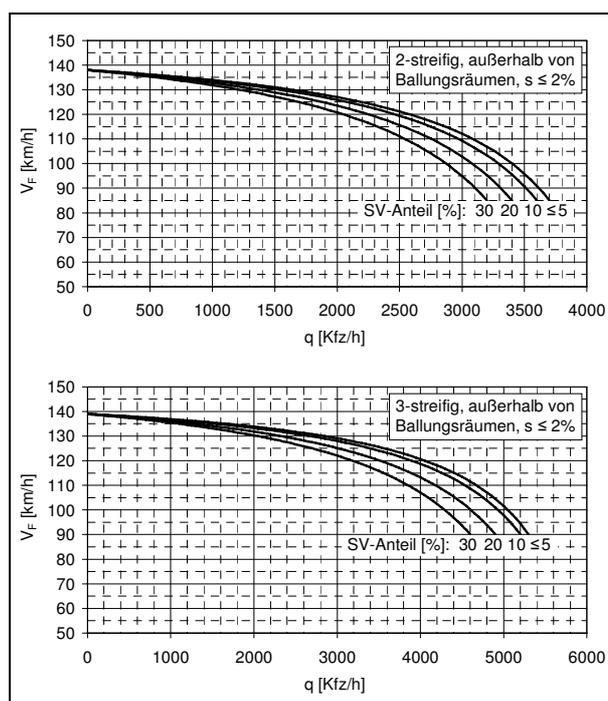


Bild 9-1: q-v-Diagramme des HBS (FGSV, 2012) für zwei- und dreistreifige Richtungsfahrbahnen außerhalb von Ballungsräumen

9.2.3 Fahrtzeitverluste bei Überlastungen

Im Falle einer Überlastung sind neben den streckenabhängigen Fahrtzeiten die überlastungsbedingten Verlustzeiten zu berücksichtigen. Diese können in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad ermittelt werden. Für die Ermittlung von Zusammenhängen zwischen dem Auslastungsgrad und der Summe der Fahrtzeitverluste wurden die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsrechnungen neu ausgewertet. Anhand der modellbasierten Simulationen war es möglich, jedem stündlichen Verkehrsstärkewert den zugehörigen Auslastungsgrad und die durch Überlastungen verursachten Verlustzeiten zuzuordnen. Bild 9-2 zeigt diesen Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad und den verursachten Zeitverlusten in Stundenintervallen für die vier Nachfrage-Szenarien der drei Beispielquerschnitte A5/121N, MQ67 und 9051RiG. Erkennbar ist der unterschiedliche Verlauf der Zeitverluste der in Streckencharakteristik und Fahrtweckzusammensetzung verschiedenen Strecken.

Für jeden Messquerschnitt und jedes Verkehrsnachfrageszenario wurden verschiedene Funktionstypen durch Minimierung der Fehlerquadrate an die simulierten Werte angepasst, um den ermittelten Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad und den überlastungsbedingten Zeitverlusten zu beschreiben. Für die Anpassung der Modellfunktion wurde ausschließlich der Auslastungsbereich $0,9 \leq x \leq 1,3$ berücksichtigt. Auslastungsgrade $x < 0,9$ verursachen nur selten nennenswerte Zeitverluste. Im HBS repräsentiert ein Auslastungsgrad von $x = 0,9$ die Grenze zwischen den Qualitätsstufen D und E, d. h. zwischen einem stabilem und einem instabilen Verkehrszustand. Im Hinblick auf die Plausibilität für den Anwender ist

es daher sinnvoll, die in Stunden mit einem Auslastungsgrad $x < 0,9$ verursachten geringen Zeitverluste bei der Modellanpassung zu vernachlässigen. Stündliche Auslastungsgrade $x > 1,3$ sind sehr selten und verursachen Zeitverluste, die in einer sehr großen Bandbreite liegen. Im Rahmen der durchgeführten Simulationen wurden solche hohen Auslastungsgrade überwiegend durch Variation der Verkehrsnachfrage erzeugt, um den Verlauf über einen größeren Auslastungsbereich einheitlich modellieren zu können. Solche Auslastungsgrade sind jedoch für übliche Planungsaufgaben nicht als relevant anzusehen und bleiben daher bei den weiteren Auswertungen unberücksichtigt.

Bei der Analyse der Abhängigkeit zwischen dem Auslastungsgrad und den überlastungsbedingten Zeitverlusten für die realen Verkehrsnachfragewerte wurden zwei Sachverhalte deutlich. Zum einen wurden bei 21 von 50 Messquerschnitten keine Auslastungsgrade $x > 0,9$ und damit keine überlastungsbedingten Zeitverluste ermittelt. Andere, sehr hoch belastete Messquerschnitte weisen hingegen zwei scheinbar voneinander unabhängige Äste bei der Darstellung der Zeitverluste in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad auf. Werden die Datensätze jedoch in ihrem zeitlichen Zusammenhang gesehen, wird deutlich, dass in der Regel auf einen Punkt im vorderen Ast ein Punkt im hinteren Ast folgt (vgl. Bild 9-3). Ursache dafür ist die in Kapitel 6.2.4 beschriebene und in Bild 6-2 veranschaulichte Zuordnung der überlastungsbedingten Verlustzeiten zu den auslösenden Verkehrsnachfragewerten. Werte im ersten Ast der Punktwolke der Zeitverluste in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad treten immer im Zusammenhang mit gravierenden Verkehrs-

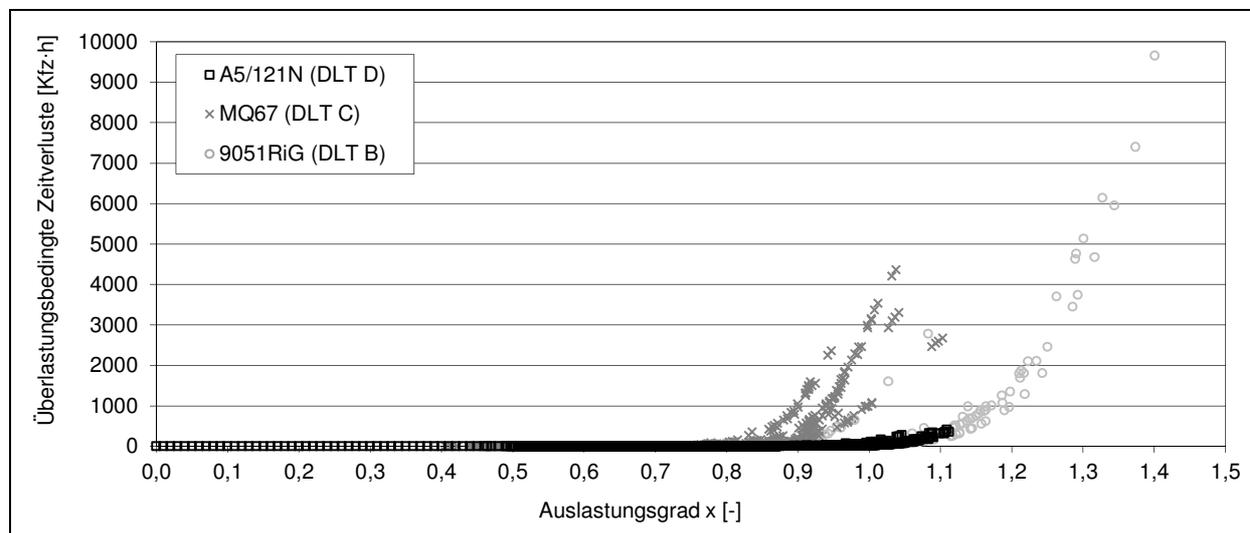


Bild 9-2: Überlastungsbedingte Zeitverluste in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad für drei Beispielquerschnitte

spitzen auf, bei denen die Verkehrsnachfrage in zwei oder mehr aufeinander folgenden Stunden-Intervallen die Kapazität der Strecke überschreitet. In diesen Fällen wird bei noch ansteigender Verkehrsnachfrage bereits ein Stau ausgelöst, der sich durch die weiter zunehmende Nachfrage im folgenden Intervall erst nach sehr langer Zeit auflösen kann. Damit fallen in den Folgeintervallen weitere Zeitverluste an, die teilweise dem Intervall der ersten Stautenstehung zugeordnet werden.

Dieses Beispiel verdeutlicht: Der Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad und den verursachten Zeitverlusten wird durch den Verlauf der Ganglinie im Bereich von Verkehrsspitzen maßgeblich beeinflusst. Das in Bild 9-3 dargestellte Phänomen zweier Äste beim Zusammenhang zwischen Zeitverlusten und Auslastungsgrad betrifft solche Querschnitte, die in vielen Stunden eine Verkehrsnachfrage erreichen, die deutlich jenseits der Kapazität nach HBS liegt und damit im Ergebnis der Bemessung zu einer Qualitätsstufe F führen würde.

Für die weiteren Auswertungen wurden die Daten der Szenarien mit realer Verkehrsnachfrage nicht berücksichtigt, da die Szenarien mit variiertem Verkehrsnachfrage den bemessungsrelevanten Auslastungsbereich hinreichend abdecken.

Für die Modellanpassung wurden verschiedene Typen von Potenz- und Exponentialfunktionen getestet. Tab. 9-1 zeigt die Parameter der Anpassung verschiedener Funktionstypen am Beispiel des Messquerschnitts A5/Q26GS für das Verkehrsnachfrageszenario N₅₀. Für alle Messquerschnitte ergab sich eine sehr gute Übereinstimmung im Verlauf und damit eine geringe Fehlerquadratsumme mit dem Funktionstyp

$$t_V(x) = A \cdot x^B \quad (9-2)$$

mit

t_V = Überlastungsbedingte Zeitverluste [Kfz·h]

x = Auslastungsgrad [-]

A, B = Modellparameter

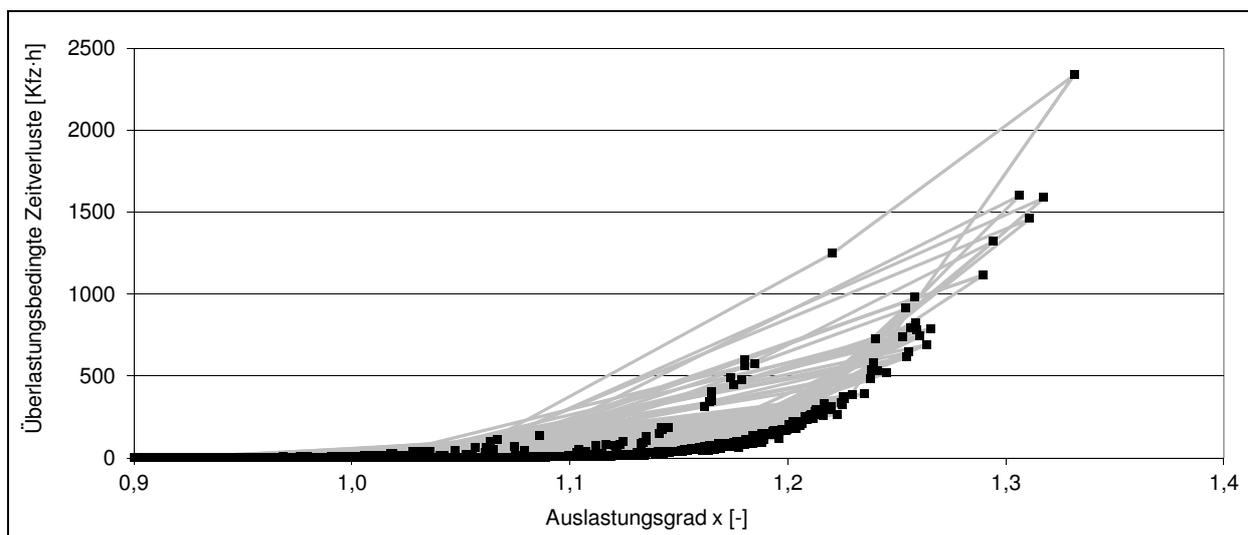


Bild 9-3: Überlastungsbedingte Zeitverluste in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad (Beispielquerschnitt: A3/21RN)

| Funktionstyp | Parameter A | Parameter B | Fehlerquadratsumme |
|---------------------------------|-------------|-------------|--------------------|
| $t_V = A \cdot x^B$ | 65 | 17 | 8.452 |
| $t_V = A \cdot (x - 0,9)^B$ | 9.277 | 2 | 5.163 |
| $t_V = A \cdot (x - 0,9)^B$ | 37.707 | 3 | 373 |
| $t_V = A \cdot (x - 0,9)^B$ | 54.261 | 3,27 | 215 |
| $t_V = A \cdot (x - 0,9)^B$ | 144.663 | 4 | 1.090 |
| $t_V = A \cdot e^{(B \cdot x)}$ | 0,2963 | 6,41 | 19.862 |

Tab. 9-1: Vergleich von Funktionstypen zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Auslastung und Verlustzeit am Beispiel des Querschnitts A5/Q26GS

Im untersuchten Bereich kleinerer Auslastungsgrade ($x < 0,90$) sind die simulierten Zeitverluste nicht null. Die Ursache dafür liegt darin begründet, dass durch die Variabilität der Verkehrsnachfrage und der Kapazität auch innerhalb nicht überlasteter Stunden-Intervalle ($x < 1$) in einzelnen 5-Minuten-Intervallen deutliche Verlustzeiten verursacht werden können. Die so entstandenen Verlustzeiten bei kleinerer Auslastung können mit der in Gleichung (9-2) gegebenen Funktion gut wiedergegeben werden. Um jedoch einen einheitlichen, stetigen Verlauf der Verlustzeiten in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad besonders im Bereich des Übergangs zwischen stabilem und instabilem Verkehr (Qualitätsstufe D bzw. E) erreichen zu können, sollten der Funktionswert und die Neigung der Modellfunktion für $x = 0,9$ jeweils null sein. Diese Bedingungen sind durch Gleichung (9-2) nicht erfüllt.

Als Alternative zu Gleichung (9-2) konnten unter Verwendung einer verschobenen Potenzfunktion ebenfalls sehr gute Übereinstimmungen bei allen Messquerschnitten erreicht werden:

$$t_v(x) = A \cdot (x - 0,9)^B \quad (9-3)$$

mit

- t_v = Überlastungsbedingte Zeitverluste [Kfz·h]
 x = Auslastungsgrad [-]
 A, B = Modellparameter

Dieser Ansatz erfüllt die o. g. Bedingung, dass der Funktionswert und die Neigung der Modellfunktion für $x = 0,9$ jeweils null sind. Er wird daher für die weiteren Analysen verwendet. Die Anpassung der Modellfunktion ergab, dass der Modellparameter B für alle Messquerschnitte und Verkehrsnachfrage-szenarien in einer Größenordnung von $B = 3$ liegt. Mit diesem Wert ergaben sich in den meisten Fällen die geringsten Fehlerquadratsummen (vgl. Beispiel in Tab. 9-1). Für die Ermittlung des Modellparameters A wurden verschiedene zusammenfassende Auswertungen vorgenommen. Dabei wurde eine Differenzierung nach dem Dauerlinientyp, nach der Lage der Strecke im Straßennetz (innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen) sowie nach der Fahrstreifenanzahl getestet. Die durch Minimierung der Fehlerquadrate ermittelten Parameter A der Modellfunktion nach Gleichung (9-3) sind Tab. 9-2 zu entnehmen.

In Bild 9-4 sind die Einzelwerte aller untersuchten vierstreifigen Querschnitte dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Einzelwerte zum Teil eine erhebliche Streuung aufweisen. Dies verdeutlicht, dass die

angepassten Modellfunktionen lediglich einen mittleren Zusammenhang repräsentieren, der im Einzelfall deutlich von den tatsächlichen Werten abweichen kann. Bild 9-5 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad und den überlastungsbedingten Zeitverlusten für die verschiedenen Dauerlinientypen. Die Differenzierung nach der Lage im Straßennetz ist in Bild 9-6 dargestellt.

Die absolute Höhe der Verlustzeiten ist in hohem Maße auch von der Fahrstreifenanzahl abhängig. Da sich der Auslastungsgrad auf die Kapazität der Strecke bezieht, geht eine Überlastung auf einem vierstreifigen Abschnitt bei gleichem Auslastungsgrad mit höheren Verlustzeiten einher als auf einem zwei- oder dreistreifigen Abschnitt. Um diesen Zusammenhang zu untersuchen, wurde in Bild 9-7 eine Differenzierung nach der Fahrstreifenanzahl vorgenommen. Ein eindeutiger Zusammenhang, d. h. eine höhere Verlustzeit bei höherer Fahrstreifenanzahl, ist jedoch nicht in jedem Fall zu erkennen. Es muss davon ausgegangen werden, dass sich die Einflüsse aus der Art der Ganglinie der Verkehrsnachfrage, der Lage der Strecke im Straßennetz, der Anzahl der Fahrstreifen sowie weiterer Parameter gegenseitig überlagern.

Die Auswertungen zeigen, dass eine feine Differenzierung nach bestimmten Parametern aufgrund der Überlagerung unterschiedlicher Einflüsse nicht zu einer Erhöhung der Plausibilität des Zusammenhangs zwischen dem Auslastungsgrad und den verursachten Zeitverlusten führt. Als pragmatischer Ansatz wird daher vorgeschlagen, als Modellparameter einheitlich $A = 60.000$ anzusetzen. Eine genauere Ermittlung von überlastungsbedingten Zeitverlusten kann nur durch eine modellbasierte Simulation im jeweiligen Einzelfall erfolgen.

| | Differenzierung | Parameter A |
|----------------------|-----------------|-------------|
| Dauerlinientyp | A | 42.000 |
| | B | 79.000 |
| | C | 51.000 |
| | D | 36.000 |
| | E | 60.000 |
| | F | 20.000 |
| Lage der Strecke | iB | 34.000 |
| | aB | 64.000 |
| Fahrstreifenanzahl | 2 | 60.000 |
| | 3 | 57.000 |
| | 4 | 77.000 |
| ohne Differenzierung | | 60.000 |

Tab. 9-2: Ermittelte Werte für den Modellparameter A

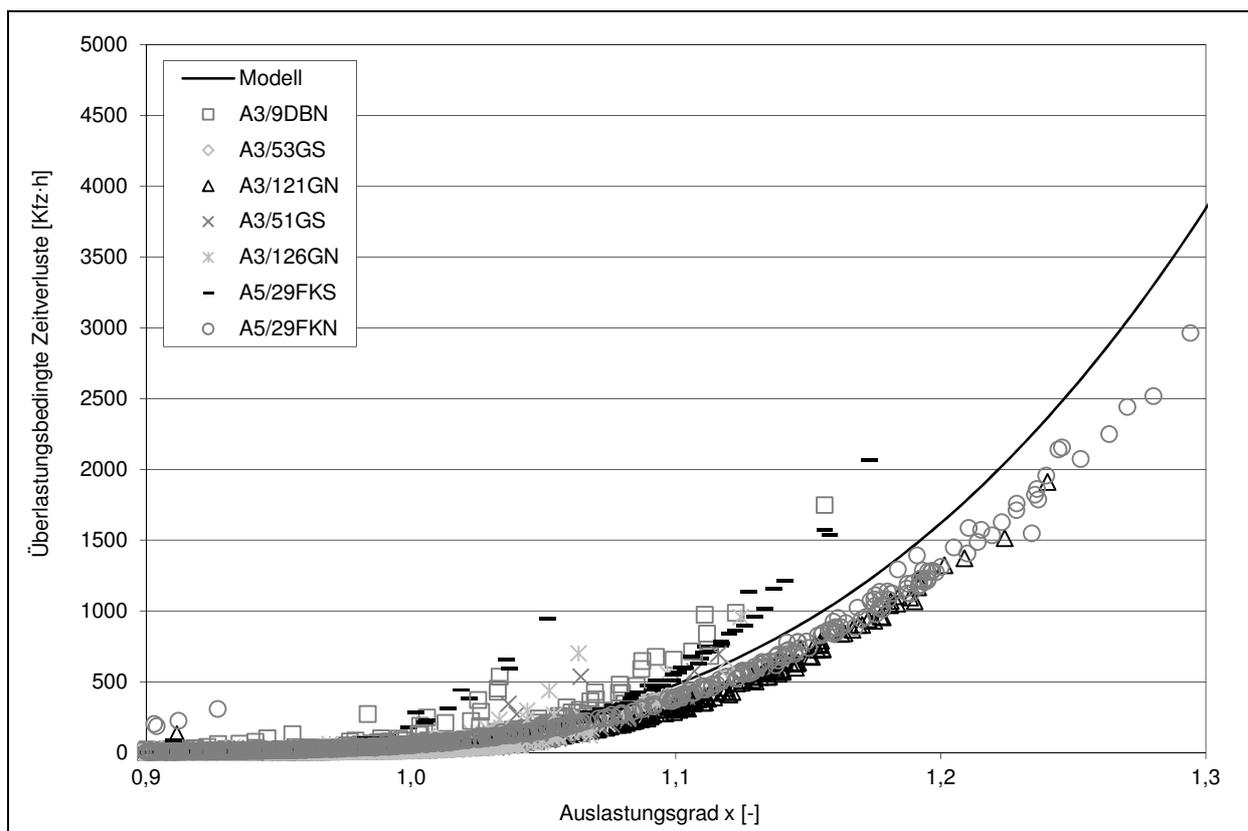


Bild 9-4: Überlastungsbedingte Zeitverluste in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad aller vierstreifigen Querschnitte

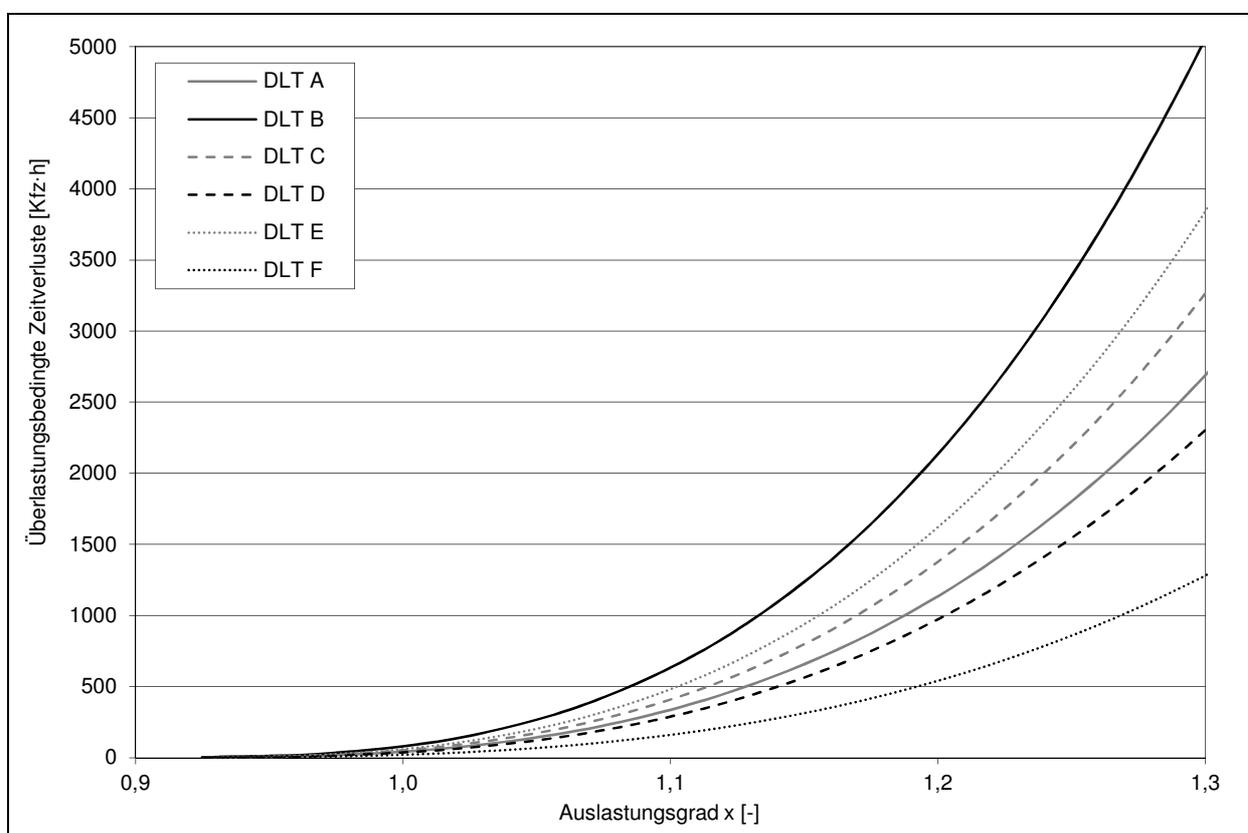


Bild 9-5: Überlastungsbedingte Zeitverluste in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad für verschiedene Dauerlinientypen

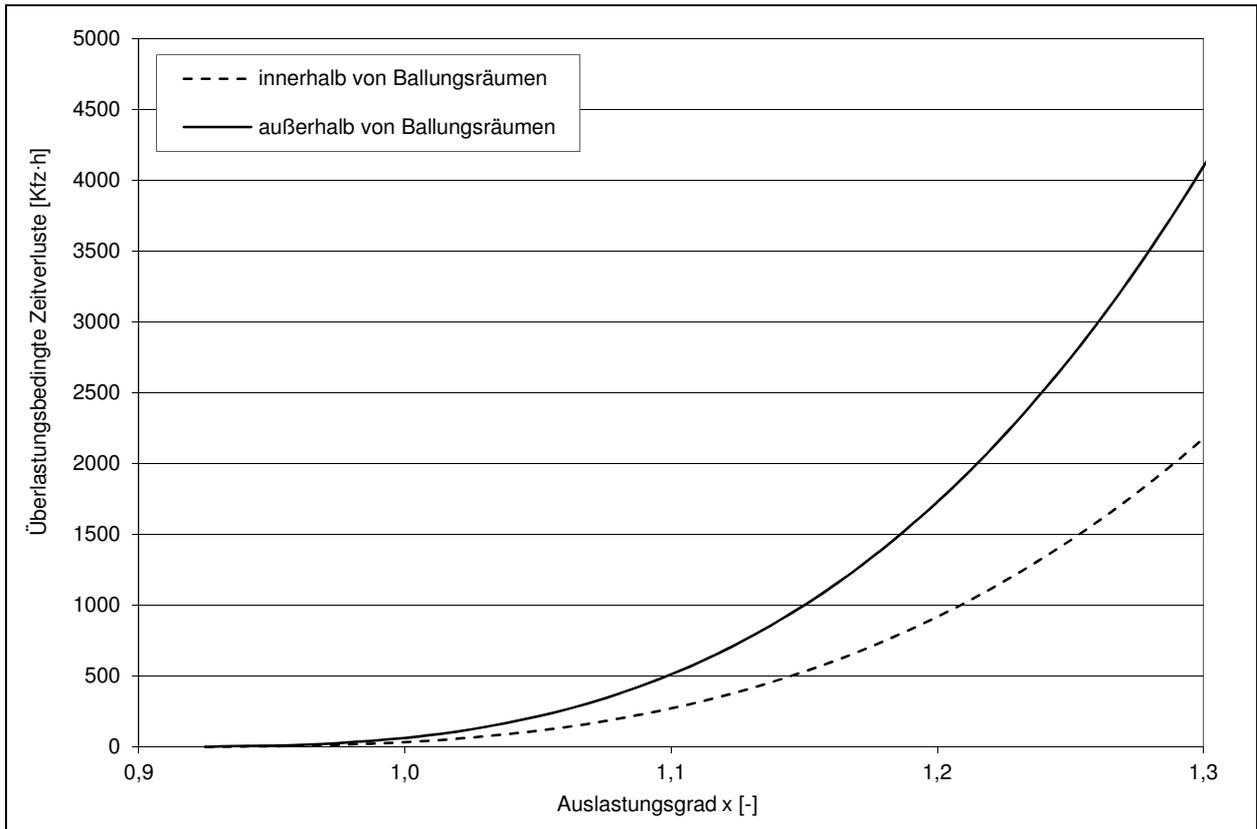


Bild 9-6: Überlastungsbedingte Zeitverluste in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad innerhalb und außerhalb von Ballungsräumen

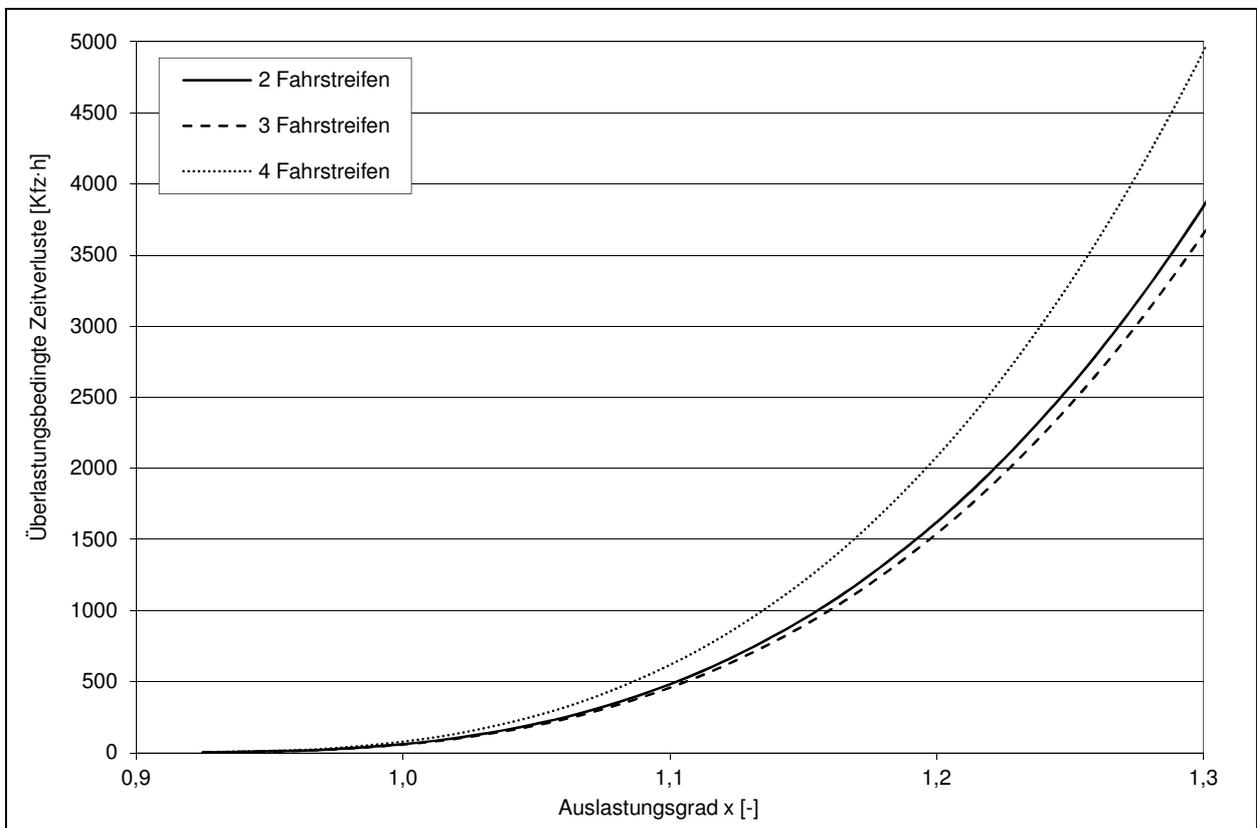


Bild 9-7: Überlastungsbedingte Zeitverluste in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad, differenziert nach der Fahrstreifenanzahl

10 Zusammenfassung und Fazit

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wird bei der Bemessung von Verkehrsanlagen nicht die höchste jemals auftretende Verkehrsbelastung zugrunde gelegt, sondern eine Überlastung in wenigen Stunden des Jahres in Kauf genommen. Als maßgebende Bemessungsstunde wird in Deutschland in der Regel die 30. Stunde der Dauerlinie der stündlichen Verkehrsnachfrage verwendet. Der Ansatz der 30. Stunde ist dabei allerdings als relativ willkürliche Festlegung anzusehen. Im europäischen Ausland wird teilweise die 50. Stunde zugrunde gelegt. Denkbar wäre auch die Verwendung der 100. Stunde.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden die Eignung der Verkehrsnachfrage in der 30. Stunde der Dauerlinie als Bemessungsverkehrsstärke für Autobahnen überprüft und Auswirkungen alternativer Bemessungsansätze volkswirtschaftlich bewertet. Anhand einer modellbasierten Ganzjahresanalyse des Verkehrsablaufs an 50 Querschnitten im Bundesautobahnnetz wurden die überlastungsbedingten Fahrtzeitverluste quantifiziert und über detaillierte Fahrtzweckzusammensetzungen und Zeitkostensätze volkswirtschaftlich bewertet.

Die empirische Grundlage der Untersuchung bildeten Daten von Dauerzählstellen in Hessen, Bayern, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein aus dem Jahr 2007. Insgesamt wurden 50 Messquerschnitte mit unterschiedlichen Fahrtzweckzusammensetzungen und Charakteristika der Verkehrsnachfrage untersucht. Da die an Dauerzählstellen gemessenen Verkehrsstärken im Fall einer Überlastung nicht die tatsächliche Verkehrsnachfrage repräsentieren, wurde die Verkehrsnachfrage durch die Überlagerung von Tageswerten der Verkehrsstärke mit tagesindividuellen Typganglinien nachgebildet. An einigen Querschnitten traten aufgrund der relativ geringen Verkehrsnachfrage keine oder nur sehr geringe Überlastungen auf. Daher wurden für jeden Querschnitt drei weitere, fiktive Datensätze erzeugt, die durch Multiplikation der Verkehrsnachfragewerte mit dem Quotienten aus der Kapazität des jeweiligen Querschnitts nach HBS und der Verkehrsnachfrage in der 30., 50. bzw. 100. Stunde erzeugt wurden.

Mit Hilfe des makroskopischen Simulationsprogramms KAPASIM wurden für jeden Querschnitt die aus Überlastungen resultierenden Fahrtzeitverluste über ein Jahr ermittelt. Das Programm berechnet streckenbezogene Fahrtzeitverluste mit einem Warteschlangenmodell, indem die model-

lierten Nachfrageganglinien der Ganglinie der Kapazität der jeweiligen (Teil-) Strecke gegenübergestellt werden. Für die Analyse des Zusammenhangs zwischen der Verkehrsnachfrage in Stunden-Intervallen und dem Ausmaß der verursachten Überlastungen wurden die staubedingten Fahrtzeitverluste jeweils der Stunde, in der der Stau ausgelöst wurde, zugeordnet. Damit wurde für jeden Querschnitt das Ausmaß der Überlastungen in den ersten 30, 50, 100, 200 und 300 Stunden der Dauerlinie quantifiziert und volkswirtschaftlich bewertet. Darüber hinaus wurden Zusammenhänge zwischen dem Auslastungsgrad und den verursachten Zeitverlusten in Stunden-Intervallen ermittelt und durch eine Modellfunktion beschrieben.

Bei der verkehrstechnischen Bemessung von Strecken von Autobahnen ist die Anzahl der Fahrstreifen in der Regel die einzige Zielgröße. Aufgrund der großen Sprünge zwischen der Kapazität zwei-, drei- und vierstreifiger Richtungsfahrbahnen wirkt sich eine Änderung der maßgebenden Bemessungsstunde in vielen Fällen nicht auf das Ergebnis der Bemessung aus. So traten bei den 50 untersuchten Strecken nur in sechs Fällen Änderungen der erforderlichen Fahrstreifenanzahl bei einem Wechsel zwischen der 30. und 50. Stunde auf, bei einem Wechsel zwischen der 50. und 100. Stunde lediglich in drei Fällen.

Die Ermittlung der Bemessungsverkehrsstärke als Prozentwert des DTV eignet sich nicht als Alternative zum Ansatz der Verkehrsnachfrage in einer n-ten Stunde. Die Ermittlung des Anteils der Verkehrsnachfrage in der 30. Stunde am DTV ergab auch für Querschnitte mit identischem Dauerlinientyp eine erhebliche Bandbreite dieses Anteilwertes. Die Verwendung eines bestimmten Prozentwertes des DTV ist daher nur für überschlägige Rechnungen vertretbar.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Bemessungsergebnisse haben die Tagestypen in den ersten Stunden der Dauerlinie der Verkehrsnachfrage. Auf Strecken mit einem hohen Anteil an Freizeit- und Urlaubsverkehr (Dauerlinientypen A und B) dominieren die Samstage, Sonn- und Feiertage in den ersten Stunden, während auf Strecken mit überwiegend Berufsverkehr (Dauerlinientypen C bis F) die höchsten Verkehrsnachfragewerte überwiegend an Werktagen und Urlaubswerktagen auftreten. In Einzelfällen treten auch Mischformen auf, bei denen sowohl an Werktagen und Urlaubswerktagen als auch an Wochenenden und Feiertagen ähnlich hohe Verkehrsnachfragewerte vorliegen. Eine getrennte Bemessung für eine n-te Stunde an Werktagen und Urlaubswerktagen

sowie eine m -te Stunde an Samstagen, Sonn- und Feiertagen ergibt nur in diesen wenigen Fällen einen – zumeist geringen – Unterschied zur Bemessung nach der n -ten Stunde sämtlicher Tage. Vor dem Hintergrund des erhöhten Berechnungsaufwands ist eine nach Tagestypen differenzierte Bemessung daher nicht sinnvoll.

Die Verteilung des Schwerverkehrs im Tages-, Wochen- und Jahresverlauf weist in der Regel deutlich von der Verteilung der Gesamtverkehrsnachfrage abweichende Muster auf. Da der Schwerverkehrsanteil in den höchst belasteten Stunden Schwankungen unterliegt, ist es nicht sinnvoll, für die Bemessung ausschließlich den Schwerverkehrsanteil in der n -ten Stunde zugrunde zu legen. Für die Festlegung des bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteils wurden verschiedene Ansätze gegenübergestellt. Im Ergebnis dieses Vergleichs wird empfohlen, bei einer Bemessung für eine n -te Stunde den Median des Schwerverkehrsanteils im Bereich der $(n - 5)$ -ten bis $(n + 5)$ -ten Stunde anzusetzen.

Die Ermittlung der staubedingten Zeitverluste und der volkswirtschaftlichen Kosten der Zeitverluste für die betrachteten Strecken ergab erhebliche Unterschiede in Abhängigkeit vom Dauerlinientyp. Dauerlinien vom Typ A und B sind durch sehr hohe Verkehrsnachfragewerte in den ersten Stunden gekennzeichnet. Dementsprechend werden bei diesen Strecken in der Regel über 90 % der staubedingten Zeitkosten in den ersten 30 Stunden der Dauerlinie verursacht. Bei Strecken mit einem flachen Verlauf der Dauerlinie in den ersten Stunden (Dauerlinientyp D) liegt der Anteil der staubedingten Zeitkosten in den ersten 30 Stunden dagegen nur in einer Größenordnung von 40 bis 60 %. Bei diesen Strecken wird in der Regel auch noch jenseits der 100. Stunde ein erheblicher Anteil der gesamten Zeitkosten verursacht. Der Anteil der zwischen der 30. und 50. Stunde verursachten Zeitkosten ist vergleichsweise unabhängig vom Dauerlinientyp und liegt in einer Größenordnung von 5 bis 20 %. Die Bandbreite der zwischen der 50. und 100. Stunde verursachten Zeitkosten ist dagegen mit Werten zwischen 0 und etwa 30 % deutlich größer.

Der Ansatz, Strecken mit unterschiedlichen Dauerlinientypen anhand verschiedener maßgebender Stunden zu bemessen, kann im Ergebnis dieser Untersuchung verworfen werden. Strecken mit Dauerlinientyp A und B weisen einen sehr großen Unterschied in der Höhe der Verkehrsnachfrage in den ersten Stunden der Dauerlinie der Verkehrsnachfrage auf. Die untersuchten Beispiele dieser Typen zeigen, dass die überlastungsbedingten

Zeitkosten auf sehr wenige, aber schwerwiegende Überlastungssituationen zurückzuführen sind, die meist bereits innerhalb der 10 höchst belasteten Stunden des Jahres verursacht werden. Eine Vermeidung dieser Überlastungen kann nur durch eine Bemessung auf Grundlage der höchsten stündlichen Verkehrsnachfrage erreicht werden. Dies widerspricht jedoch dem Grundsatz einer wirtschaftlichen Bemessung, zumal besonders bei diesen Streckentypen in den Stunden $n > 10$ deutlich geringere Verkehrsnachfragewerte auftreten. Dies gilt, wie bei Strecken aller Dauerlinientypen, jedoch nur dann, wenn die Dauerlinie in den ersten Stunden die durch die Fahrstreifenanzahl bestimmten Kapazitätsgrenzen schneidet. Die Wahl einer geringeren Stundenbelastung (z. B. $n = 50$) hingegen führt gegenüber der 30. Stunde zu keinen nennenswerten Änderungen in den Überlastungswirkungen, da in diesem Bereich der Dauerlinie in der Regel keine engpassbedingten Überlastungen mehr verursacht werden.

Dauerlinien mit flachem Verlauf, wie der am häufigsten auftretende Dauerlinientyp D, führen durch die nur langsam abnehmende Verkehrsnachfrage auch über die 30. Stunde hinaus zu wiederkehrenden überlastungsbedingten Zeitverlusten. Wie hoch diese Zeitverluste sind, ist insbesondere vom Niveau der Dauerlinie in Bezug auf die Kapazitätsgrenzen abhängig. Da die Überlastungen kontinuierlich über viele Stunden auftreten können, ist der Unterschied der Überlastungswirkungen bei einer Bemessung auf Grundlage der 50. Stunde im Vergleich zur 30. Stunde gering.

Für alle Dauerlinientypen kann jedoch grundsätzlich festgestellt werden, dass die für die Planung maßgebenden und vorwiegend durch die Fahrstreifenanzahl bestimmten Kapazitätssprünge in der Regel größer sind als die Verkehrsstärkedifferenzen der ersten n Stunden der Dauerlinie. Damit ergeben sich keine Auswirkungen der Wahl der n -ten Stunde als Bemessungsgrundlage auf die resultierende Fahrstreifenanzahl.

Vor dem Hintergrund der in der Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse kann zusammenfassend abgeleitet werden, dass ein Wechsel von der 30. auf die 50. Stunde ohne große Auswirkungen bleibt. In wenigen Einzelfällen können sich dadurch bei Autobahnen geringere erforderliche Fahrstreifenanzahlen ergeben. Diese werden tendenziell eher Strecken mit einem hohen Anteil an Freizeit- und Urlaubsverkehr (Dauerlinientypen A und B) betreffen, weil dort die Dauerlinien in der Regel steiler abfallen und die Unterschiede zwischen den Bemessungsverkehrsstärken nach

der 30. und 50. Stunde größer sind. Im Sinne einer Harmonisierung der internationalen Verkehrsstatistiken erscheint ein Wechsel zweckmäßig. Da die Bemessung der Bundesautobahnen/ Schnellstraßen jedoch auch im Bereich der Staatsgrenzen in den Aufgabenbereich der einzelnen Länder fällt und im Bereich der Grenzen ohnehin eine Einzelfallprüfung der Streckenbemessung (im Sinne einer Überleitung) erfolgen muss, ist der praktische Nutzen eines solchen Wechsels in diesem Bereich gering. Die Festlegung der n-ten Stunde ist daher eine politische Entscheidung. So würde eine Anpassung an internationale Standards dem Eindruck entgegenwirken, dass Deutschland ein höheres Ausbauniveau fordert als andere Länder. Vor dem Hintergrund der Unterfinanzierung der Maßnahmen des Bedarfsplans würde mit einer Reduzierung des Standards eine Annäherung an die Realität einhergehen.

Literatur

- ANTUSCH, G.: Beiträge zur Problematik der Bemessung von Straßen Teil I. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 320, Bonn, 1981.
- ARNOLD, M.: Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsuntersuchung einer befristeten Umnutzung von Standstreifen an BAB für Zwecke des fließenden Verkehrs. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 820, Bonn, 2001.
- ARNOLD, M.; BÖTTCHER, S.: Bemessungsverkehrsstärken vor dem Hintergrund sich verändernder Pegel. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 922, Bonn, 2005.
- ARNOLD, M.; ZIEGLER, H.: Bemessungsverkehrsstärken auf einbahnigen Landstraßen. Schlussbericht zum Forschungsprojekt im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2011.
- BAUM, H.; KRANZ, T.: Zeitbewertung in ökonomischen Planungsrechnungen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn, 2012.
- BERGH, T.; BANG, K.; DVIDSSON, F.: Swedish Country Report. Proceedings of the 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, Stockholm, 2011.
- BERNARD, M.; AXHAUSEN, K.W.: Zeitkostenorientierte Bemessung mit zufallsverteilten Belastungen und Leistungsfähigkeiten. Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung, 539, IVT, ETH Zürich, 2008.
- BMVBS: Bundesverkehrswegeplan 2003. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Berlin, 2005.
- BRILON, W.; ESTEL, A.: Differenzierte Bewertung der Qualitätsstufen im HBS im Bereich der Überlastung. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 999, Bonn, 2008.
- BRILON, W.; GEISTEFELDT, J.: Modellierung von Dauerlinien und Ganglinien der Verkehrsnachfrage im Autobahnnetz. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben BR 889/10-1 mit Unterstützung der DFG, Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, 2007.
- BRILON, W.; GEISTEFELDT, J.: Überprüfung der Bemessungswerte des HBS für Autobahnabschnitte außerhalb der Knotenpunkte. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1033, Bonn, 2010.
- BRILON, W.; GEISTEFELDT, J.; REGLER, M.: Entwicklung von Zielgrößen für die Verkehrseinflussung auf Bundesfernstraßen in Hessen. Schlussbericht zum Forschungsprojekt im Auftrag des Hessischen Landesamts für Straßen- und Verkehrswesen, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, 2006.
- BRILON, W.; GEISTEFELDT, J.; WU, N.; ESTEL, A.: Modell-technische Erweiterung von KAPASIM Hessen. Schlussbericht zum Forschungsauftrag des Hessischen Landesamtes für Straßen- und Verkehrswesen, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, 2010.
- BRILON, W.; PONZLET, M.: Application of traffic flow models. In: Proceedings of the Workshop in Traffic and Granular Flow. World Scientific, Singapore, 1995.
- BRILON, W.; ZURLINDEN, H.: Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 870, Bonn, 2003.
- BRILON, W.; ZURLINDEN, H.; GEISTEFELDT, J.: Ganzjahresanalyse des Verkehrsflusses auf Autobahnen. Straßenverkehrstechnik, Heft 11/2004, Kirschbaum-Verlag, Bonn, 2004.

- DAGANZO, C. F.: The cell-transmission model. A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory, *Transportation Research* 28B, pp. 269-288, 1994.
- FGSV: Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS), Aktualisierung der RAS-W '86, Ausgabe 1997. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 1997.
- FGSV: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2001.
- FGSV: Hinweise zur Qualitätsanforderung und Qualitätssicherung der lokalen Verkehrsdatenerfassung für Verkehrsbeeinflussungsanlagen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2006.
- FGSV: Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2008.
- FGSV: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen, Entwurf der fortgeschriebenen Fassung vom 06.06.2012. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2012.
- GDDKIA: Wytuczne projektowania dróg I i II klasy technicznej - autostrady i drogi ekspresowe WPD-I (Richtlinien für Straßenentwurf der Kategorie I und II). Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad (Generaldirektion für Nationalstraßen und Autobahnen, Hrsg.), Ausgabe 31.03.1995, Warschau, 1995.
- GEISTEFELDT, J.: Schätzung von Reisezeiten auf Autobahnen unter Verwendung eines erweiterten Verkehrsflussmodells. Tagungsband zur HEUREKA '05 – Optimierung in Verkehr und Transport. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2005.
- GEISTEFELDT, J.: Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit auf Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 30, 2007.
- GOODWIN, C.: The Economic Cost of Congestion when Road Capacity is Constrained: Lessons from Congestion Charging in London. European Conference of Ministers of Transport, 16th International Symposium on Theory and Practice in Transport Economics, 2003.
- HEIDEMANN, D.; WIMBER, P.: Typisierung von Verkehrsstärkenganglinien durch clusteranalytische Verfahren. Bundesanstalt für Straßenwesen, Köln, 1982.
- MINISTER TRANSPORTU: Warunki techniczne jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Allgemeine technische Anforderungen an Straßen). Minister Transportu i Gospodarki Morskiej (Ministerium für Verkehr und Wirtschaft, Hrsg.), Warschau, Polen, 1999.
- PINKOFSKY, L.: Ganglinientypen. In: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2000. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 99, Bergisch-Gladbach, 2002.
- PINKOFSKY, L.: Typisierung von Ganglinien der Verkehrsstärke und ihre Eignung zur Modellierung der Verkehrsnachfrage. Schriftenreihe des Institutes für Verkehr und Stadtbauwesen, Technische Universität Braunschweig, 2006.
- REGLER, M.: Verkehrsablauf und Kapazität auf Autobahnen. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 28, 2004.
- RIJKSWATERSTAAT: Capaciteitswaarden Infrastructuur Autosnelwegen. Handboek versie 3, Adviesdienst Verkeer en Vervoer, Rotterdam, 2011.
- SCHMIDT, G.: Erhebungs- und Hochrechnungsmethodik der Straßenverkehrszählung 1975 in der Bundesrepublik Deutschland. Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft 4, Bergisch Gladbach, 1976.
- SETRA: service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (SETRA). Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison (ICTAAL, Hrsg.), Bagneux Cedex, 2000.
- SORENSEN, H.: Highway Capacity Research and Applications in Denmark. Proceedings of the 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, Stockholm, 2011.
- TRB: Highway Capacity Manual (HCM). Transportation Research Board (Hrsg.), 2000.
- TRB: Highway Capacity Manual (HCM). Transportation Research Board (Hrsg.), 2010.
- UNECE: Census of motor traffic on main international traffic arteries. United Nations Economic Commission for Europe (Hrsg.), Genf, 1995.

UNECE: TEM (trans-european north-south motorway) standards and recommended practice. United Nations Economic Commission for Europe (Hrsg.), Warschau, 2003.

UNECE: Preparation for the 2010 E-Road and 2010 E-Rail Traffic Censuses. United Nations Economic Commission for Europe (Hrsg.), Genf, 2009.

VSS: Schweizer Norm SN 640 005a. Schweizer Gangliniennorm, Zürich, 1999.

Anhang

| | |
|-----------|--|
| Anhang A: | Verzeichnis der untersuchten Messquerschnitte |
| Anhang B: | Charakteristik der untersuchten Strecken |
| Anhang C: | Ergebnisse mit variiertes Verkehrsnachfrage (N_{30}) |
| Anhang D: | Ergebnisse der vier Verkehrsnachfrage-Szenarien |

Legende zu Anhang C und D:

| | |
|-------------------------|--|
| t_v | Gesamtsumme der überlastungsbedingten Verlustzeiten im Untersuchungszeitraum |
| t_f | Gesamtsumme der Fahrtzeiten im Untersuchungszeitraum |
| GK_{ZB} | Gesamtkosten aus überlastungsbedingten Verlustzeiten nach dem Wertschöpfungsansatz für den gewerblichen Verkehr und dem Zahlungsbereitschaftsansatz für den nicht-gewerblichen Personenverkehr |
| GK_{WS} | Gesamtkosten aus überlastungsbedingten Verlustzeiten nach dem Wertschöpfungsansatz |
| K_W, K_U, K_{Sa}, K_S | Anteil der Zeitkosten der einzelnen Tagestypen (Werktag, Urlaubswerktag, Samstag, Sonn- und Feiertag) an den Gesamtzeitkosten |
| K_{30} | Anteil der Zeitkosten in den ersten 30 Stunden der Dauerlinie an den Gesamtzeitkosten |
| K_{50} | Anteil der Zeitkosten in den Stunden 31 bis 50 der Dauerlinie an den Gesamtzeitkosten |
| K_{100} | Anteil der Zeitkosten in den Stunden 51 bis 100 der Dauerlinie an den Gesamtzeitkosten |
| K_{200} | Anteil der Zeitkosten in den Stunden 101 bis 200 der Dauerlinie an den Gesamtzeitkosten |
| K_{300} | Anteil der Zeitkosten in den Stunden 201 bis 300 der Dauerlinie an den Gesamtzeitkosten |
| real | modellierte Verkehrsnachfrage aus realen Verkehrsstärkewerten |
| N_{30} | variiertes Verkehrsnachfrage, so dass der Auslastungsgrad in der 30. Stunde der Dauerlinie gleich 1 ist |
| N_{50} | variiertes Verkehrsnachfrage, so dass der Auslastungsgrad in der 50. Stunde der Dauerlinie gleich 1 ist |
| N_{100} | variiertes Verkehrsnachfrage, so dass der Auslastungsgrad in der 100. Stunde der Dauerlinie gleich 1 ist |

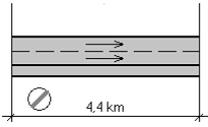
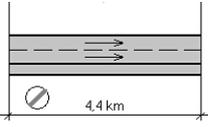
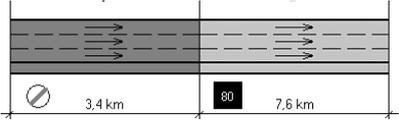
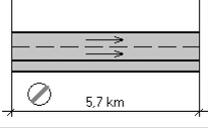
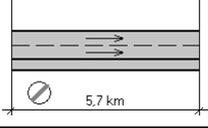
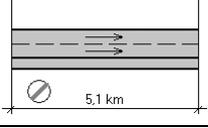
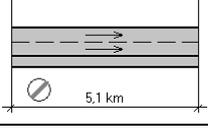
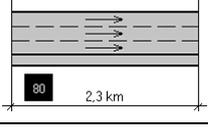
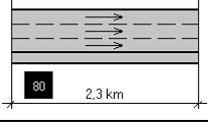
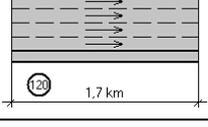
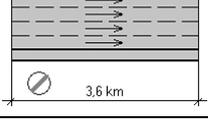
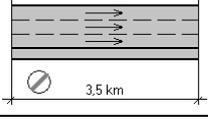
Anhang A: Verzeichnis der untersuchten Messquerschnitte

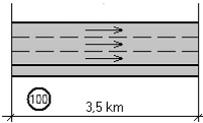
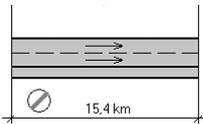
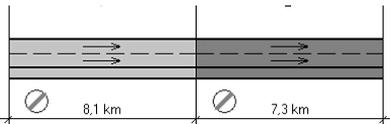
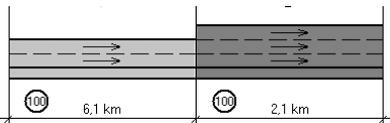
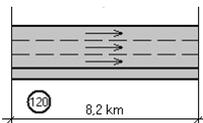
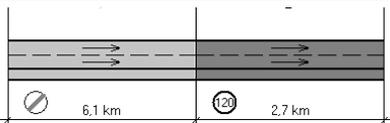
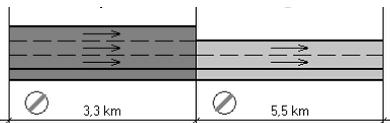
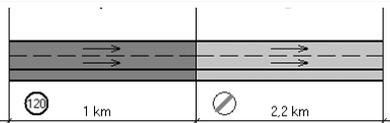
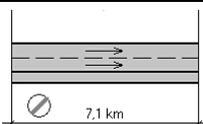
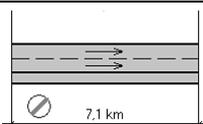
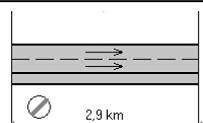
| Nr | BAB | Land | Fahrtr. | von Anschlussstelle | nach Anschlussstelle | Zählstelle | Str.-km |
|----|------|------|---------|---------------------------|---------------------------|------------|---------|
| 01 | A 3 | HE | N | AS Limburg-Nord | LG Rheinland-Pfalz | A3/1IDN | 98,80 |
| 02 | A 3 | HE | N | AS Bad Camberg | AS Limburg-Süd | A3/13IDN | 114,50 |
| 03 | A 3 | HE | N | AS Raunheim | AK Wiesbadener Kreuz | A3/9DBN | 156,60 |
| 04 | A 3 | HE | S | AD Mönchhof Dreieck | AS Kelsterbach | A3/22RS | 164,40 |
| 05 | A 3 | HE | N | AS Kelsterbach | AD Mönchhof Dreieck | A3/21RN | 163,60 |
| 06 | A 3 | HE | S | AS Frankfurt a.M. Süd | AK Offenbacher Kreuz | A3/53GS | 175,60 |
| 07 | A 3 | HE | N | AK Offenbacher Kreuz | AS Frankfurt a.M. Süd | A3/121GN | 178,60 |
| 08 | A 3 | HE | S | AS Seligenstadt | AD Seligenstädter Dreieck | A3/75GS | 201,00 |
| 09 | A 3 | HE | N | AS Seligenstädter Dreieck | AS Seligenstadt | A3/105GN | 198,45 |
| 10 | A 3 | HE | S | AK FFM Kreuz | AS Frankfurt a.M. Süd | A3/51GS | 173,20 |
| 11 | A 3 | HE | N | AS FFM Süd | AK Frankfurt a.M. Kreuz | A3/126GN | 172,60 |
| 12 | A 5 | HE | S | AS Alsfeld-Ost | AS Alsfeld-West | A5/1ALS | 393,60 |
| 13 | A 5 | HE | N | AS Alsfeld-West | AS Alsfeld-Ost | A5/1ALN | 393,60 |
| 14 | A 5 | HE | S | AS Ober-Mörlen | AS Friedberg | A5/Q26GS | 465,15 |
| 15 | A 5 | HE | S | AS Zwingenberg | AS Bensheim | A5/111S | 541,10 |
| 16 | A 5 | HE | N | AS Bensheim | AS Zwingenberg | A5/111N | 541,10 |
| 17 | A 5 | HE | S | AS Hemsbach | AK Weinheimer Kreuz | A5/121S | 60,40 |
| 18 | A 5 | HE | N | AK Weinheimer Kreuz | AS Hemsbach | A5/121N | 60,40 |
| 19 | A 5 | HE | S | AK Nordwestkreuz FFM | AK Westkreuz FFM | A5/Q60GS | 489,90 |
| 20 | A 5 | HE | N | AK Westkreuz FFM | AK Nordwestkreuz FFM | A5/Q120G | 490,00 |
| 21 | A 5 | HE | S | AS FFM-Niederrad | AS FFM-Flughafen | A5/29FKS | 496,50 |
| 22 | A 5 | HE | N | AS FFM-Flughafen | AS FFM-Niederrad | A5/29FKN | 496,50 |
| 23 | A 6 | HE | S | AD Viernheimer Dreieck | AK Viernheimer Kreuz | A6/120S | 557,70 |
| 24 | A 6 | HE | N | AK Viernheimer Kreuz | AD Viernheimer Dreieck | A6/120N | 557,70 |
| 25 | A 7 | HE | N | LG Bayern | AS Fulda-Süd | A7/13FUN | 586,30 |
| 26 | A 7 | HE | S | AS Fulda-Süd | LG Bayern | A7/13FUS | 586,30 |
| 27 | A 45 | HE | S | AS Haiger/Burbach | AS Dillenburg | A45/1EHS | 132,20 |
| 28 | A 45 | HE | N | AS Dillenburg | AS Haiger/Burbach | A45/1EHN | 132,20 |
| 29 | A 45 | HE | S | AK Gießener Südkreuz | AK Gambacher Kreuz | A45/1GIS | 179,10 |
| 30 | A 45 | HE | N | AK Gambacher Kreuz | AK Gießener Südkreuz | A45/1GIN | 179,10 |
| 31 | A 60 | HE | O | AD Mainspitz-Dreieck | AS Bischofsheim | A60/19RH | 8,95 |
| 32 | A 60 | HE | W | AS Bischofsheim | AD Mainspitz-Dreieck | A60/19RH | 8,95 |
| 33 | A 66 | HE | W | AS Bad Orb/Wächtersbach | AS Gelnhausen-Ost | A66/40LS | 155,70 |
| 34 | A 66 | HE | O | AS Gelnhausen-Ost | AS Bad Orb/Wächtersbach | A66/40LS | 155,70 |
| 35 | A 66 | HE | W | AK Schiersteiner Kreuz | AS Wiesbaden- | A66/4ZW | 33,40 |
| 36 | A 66 | HE | O | AS Wiesbaden-Frauenstein | AK Schiersteiner Kreuz | A66/4ZO | 33,40 |
| 37 | A 67 | HE | S | AD Rüsselsheimer Dreieck | AS Groß-Gerau | A67/9RHS | 10,00 |
| 38 | A 67 | HE | N | AS Groß-Gerau | AD Rüsselsheimer Dreieck | A67/9RHN | 10,00 |
| 39 | A 67 | HE | S | AS Gernsheim | AS Lorsch | A67/107S | 42,00 |
| 40 | A 67 | HE | N | AS Lorsch | AS Gernsheim | A67/107N | 42,00 |
| 41 | A 67 | HE | N | AD Viernheimer Dreieck | AS Lorsch | A67/113N | 52,00 |
| 42 | A 23 | SH | S | AS Schafstedt | AS Hanerau | 1922R1 | 68,27 |
| 43 | A 23 | SH | N | AS Hanerau | AS Schafstedt | 1922R2 | 68,27 |
| 44 | A 19 | MV | S | AS Kavelstorf | AS Laage | 1939R1 | 104,34 |
| 45 | A 19 | MV | N | AS Laage | AS Kavelstorf | 1939R2 | 104,34 |
| 46 | A 19 | MV | S | AS Malchow | AS Waren | 2540R1 | 39,00 |
| 47 | A 19 | MV | N | AS Waren | AS Malchow | 2540R2 | 39,00 |
| 48 | A 8 | BY | O | AS Weyarn | AS Irschenberg | MQ67 | 38,22 |
| 49 | A 95 | BY | S | AS Murnau/Kochel | AS Eschenlohe | MQ9051Ri | 58,37 |
| 50 | A 95 | BY | N | AS Eschenlohe | AS Murnau/Kochel | MQ9051Ri | 58,37 |

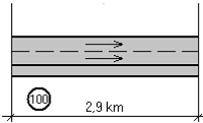
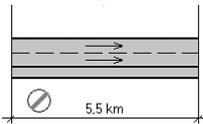
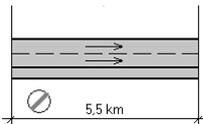
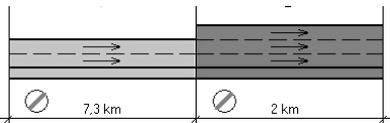
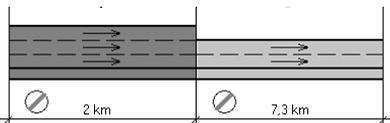
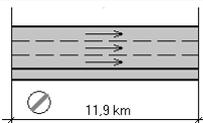
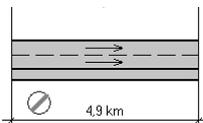
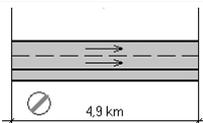
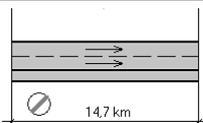
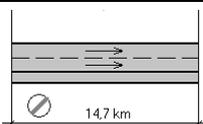
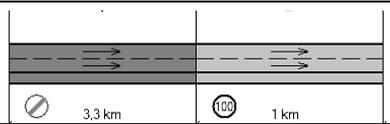
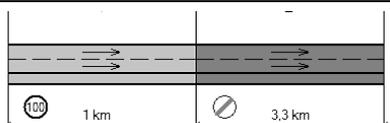
Anhang B: Charakteristik der untersuchten Strecken

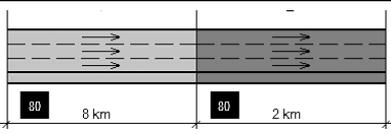
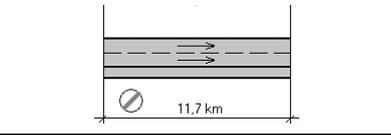
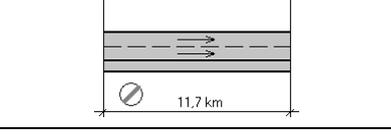
Der untersuchte Messquerschnitt befindet sich jeweils auf der hell dargestellten Teilstrecke.

| | | |
|--------|---|--|
| Nr. 01 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 3 Längsneigung: 4,7% SV-Anteil: 15% alle Stunden (9% Stunde 1-30) | |
| Nr. 02 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 3 Längsneigung: 3,8% SV-Anteil: 14% (9%) | |
| Nr. 03 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 4 Längsneigung: 3,3% SV-Anteil: 13% (9%) | |
| Nr. 04 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 3 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 12% (8%) | |
| Nr. 05 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 3 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 13% (9%) | |
| Nr. 06 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 4 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 12% (10%) | |
| Nr. 07 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 4 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 12% (9%) | |
| Nr. 08 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 3 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 15% (12%) | |
| Nr. 09 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 3 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 15% (11%) | |
| Nr. 10 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 4 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 13% (13%) | |
| Nr. 11 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 4 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 15% (10%) | |

| | | |
|--------|---|---|
| Nr. 12 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 3,1% SV-Anteil: 17% (3%) |  |
| Nr. 13 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 17% (12%) |  |
| Nr. 14 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 3 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 14% (10%) |  |
| Nr. 15 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 12% (7%) |  |
| Nr. 16 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 4% (3%) |  |
| Nr. 17 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 10% (9%) |  |
| Nr. 18 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 4% (3%) |  |
| Nr. 19 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 3 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 10% (7%) |  |
| Nr. 20 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 3 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 10% (8%) |  |
| Nr. 21 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 4 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 9% (5%) |  |
| Nr. 22 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 4 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 9% (5%) |  |
| Nr. 23 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 3 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 11% (10%) |  |

| | | |
|--------|---|---|
| Nr. 24 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 3 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 11% (8%) |  |
| Nr. 25 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 3,4% SV-Anteil: 20% (8%) |  |
| Nr. 26 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 3,5% SV-Anteil: 20% (8%) |  |
| Nr. 27 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 19% (14%) |  |
| Nr. 28 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 3 Längsneigung: 4,0% SV-Anteil: 19% (10%) |  |
| Nr. 29 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 2,3% SV-Anteil: 14% (9%) |  |
| Nr. 30 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 14% (8%) |  |
| Nr. 31 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 10% (7%) |  |
| Nr. 32 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 11% (7%) |  |
| Nr. 33 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 10% (9%) |  |
| Nr. 34 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 10% (9%) |  |
| Nr. 35 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 4% (2%) |  |

| | | |
|--------|---|---|
| Nr. 36 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 5% (2%) |  |
| Nr. 37 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 10% (7%) |  |
| Nr. 38 | Lage: innerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 10% (8%) |  |
| Nr. 39 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 13% (7%) |  |
| Nr. 40 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 13% (11%) |  |
| Nr. 41 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 3 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 12% (10%) |  |
| Nr. 42 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 17% (6%) |  |
| Nr. 43 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 18% (4%) |  |
| Nr. 44 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 18% (8%) |  |
| Nr. 45 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 18% (7%) |  |
| Nr. 46 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 17% (8%) |  |
| Nr. 47 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 16% (5%) |  |

| | | |
|--------|---|--|
| Nr. 48 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 3 Längsneigung: bis zu 7% SV-Anteil: 14% (4%) |  |
| Nr. 49 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 4% (1%) |  |
| Nr. 50 | Lage: außerhalb von Ballungsräumen Fahrstreifen: 2 Längsneigung: 0,0% SV-Anteil: 5% (1%) |  |

Anhang C: Ergebnisse mit variiertes Verkehrsnachfrage (N_{30})

| Nr. | DTV [Fz/d] | q_{\max} [Fz/h] | t_v [Fz·h] | t_F [Fz·h] | GK _{ZB} [€] | GK _{WS} [€] | K_w [%] | K_U [%] | K_{Sa} [%] | K_S [%] | K_{30} [%] | K_{50} [%] | K_{100} [%] | K_{200} [%] | K_{300} [%] |
|-----|---------------|----------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| 01 | 43.501 | 5.082 | 5.349 | 1.208.539 | 74.703 | 56.761 | 88,8 | 9,2 | 0,2 | 1,8 | 69,5 | 9,0 | 11,0 | 5,4 | 1,9 |
| 02 | 43.577 | 5.455 | 5.191 | 2.130.370 | 73.821 | 56.878 | 92,1 | 7,7 | 0,1 | 0,2 | 65,9 | 9,9 | 10,5 | 7,6 | 2,8 |
| 03 | 73.441 | 8.153 | 7.717 | 1.778.481 | 101.53 | 74.192 | 67,0 | 32,7 | 0,1 | 0,2 | 45,5 | 10,8 | 15,2 | 12,9 | 6,4 |
| 04 | 45.232 | 6.058 | 177 | 679.218 | 2.256 | 1.623 | 89,3 | 10,7 | 0,0 | 0,0 | 29,0 | 9,5 | 13,0 | 7,6 | 16,9 |
| 05 | 53.087 | 6.121 | 117 | 818.900 | 1.563 | 1.153 | 81,4 | 18,6 | 0,0 | 0,0 | 40,5 | 9,7 | 16,2 | 16,2 | 8,1 |
| 06 | 76.782 | 8.292 | 2.254 | 1.463.061 | 30.810 | 23.160 | 92,4 | 7,6 | 0,0 | 0,0 | 55,3 | 10,3 | 15,0 | 10,1 | 3,5 |
| 07 | 63.692 | 8.669 | 3.482 | 1.197.710 | 42.500 | 29.658 | 94,2 | 5,8 | 0,0 | 0,0 | 54,1 | 15,6 | 19,4 | 9,5 | 0,8 |
| 08 | 54.827 | 6.300 | 7.910 | 1.271.840 | 111.35 | 84.664 | 65,7 | 34,3 | 0,0 | 0,0 | 70,1 | 6,3 | 10,7 | 5,6 | 2,5 |
| 09 | 51.610 | 6.066 | 2.228 | 1.216.394 | 29.034 | 21.076 | 81,1 | 18,8 | 0,0 | 0,0 | 70,3 | 12,8 | 10,2 | 4,2 | 1,4 |
| 10 | 79.496 | 8.249 | 2.421 | 886.486 | 33.263 | 25.048 | 90,7 | 9,3 | 0,0 | 0,0 | 53,3 | 12,3 | 13,4 | 9,2 | 4,4 |
| 11 | 86.016 | 8.229 | 2.993 | 387.925 | 40.660 | 30.724 | 75,7 | 23,6 | 0,1 | 0,6 | 41,4 | 15,7 | 12,7 | 12,0 | 5,8 |
| 12 | 31.371 | 4.347 | 7.460 | 470.839 | 98.517 | 62.061 | 0,5 | 0,5 | 0,0 | 99,0 | 83,9 | 9,3 | 4,2 | 1,5 | 0,3 |
| 13 | 34.176 | 4.266 | 8.674 | 511.286 | 136.49 | 108.88 | 15,4 | 76,8 | 1,5 | 6,3 | 79,5 | 6,6 | 5,2 | 4,0 | 1,9 |
| 14 | 48.875 | 6.803 | 10.07 | 1.843.407 | 134.13 | 99.116 | 60,1 | 39,7 | 0,0 | 0,2 | 72,4 | 7,0 | 11,5 | 5,2 | 2,2 |
| 15 | 40.384 | 4.190 | 1.671 | 755.899 | 21.657 | 15.665 | 90,2 | 5,8 | 1,2 | 2,8 | 62,8 | 4,4 | 7,7 | 8,4 | 5,2 |
| 16 | 41.937 | 4.153 | 1.411 | 746.988 | 16.614 | 10.507 | 54,8 | 10,2 | 1,4 | 33,6 | 54,6 | 7,6 | 8,8 | 7,9 | 4,8 |
| 17 | 42.387 | 3.986 | 4.240 | 713.332 | 50.636 | 33.955 | 79,3 | 8,0 | 4,9 | 7,7 | 43,7 | 9,3 | 11,4 | 13,7 | 5,8 |
| 18 | 41.787 | 3.955 | 3.926 | 669.673 | 46.577 | 31.251 | 73,5 | 14,3 | 0,8 | 11,4 | 43,0 | 9,1 | 13,0 | 11,8 | 7,2 |
| 19 | 52.766 | 6.304 | 2.533 | 410.403 | 33.749 | 25.097 | 96,4 | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 62,2 | 14,2 | 15,2 | 6,4 | 1,1 |
| 20 | 58.557 | 6.481 | 3.097 | 463.305 | 41.105 | 30.412 | 95,9 | 4,1 | 0,0 | 0,0 | 67,1 | 8,5 | 8,7 | 7,4 | 3,1 |
| 21 | 69.437 | 8.829 | 8.054 | 391.491 | 107.45 | 80.003 | 91,4 | 8,6 | 0,0 | 0,0 | 64,4 | 8,6 | 10,1 | 8,8 | 3,2 |
| 22 | 60.004 | 8.566 | 6.394 | 687.795 | 74.503 | 50.449 | 94,4 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 52,5 | 15,5 | 20,6 | 9,7 | 1,0 |
| 23 | 50.341 | 5.835 | 4.592 | 557.759 | 66.820 | 52.152 | 74,2 | 25,4 | 0,0 | 0,4 | 61,6 | 11,1 | 11,5 | 7,3 | 3,1 |
| 24 | 47.243 | 6.330 | 8.079 | 602.194 | 107.01 | 79.227 | 91,7 | 8,2 | 0,0 | 0,0 | 79,1 | 7,0 | 5,9 | 4,4 | 1,5 |
| 25 | 27.419 | 4.268 | 9.804 | 1.463.195 | 143.82 | 101.84 | 3,2 | 11,6 | 1,5 | 83,7 | 90,2 | 5,6 | 2,7 | 0,9 | 0,3 |
| 26 | 30.697 | 4.453 | 20.56 | 1.651.752 | 281.71 | 196.70 | 7,0 | 45,0 | 2,3 | 45,7 | 92,3 | 3,1 | 2,4 | 1,0 | 0,6 |
| 27 | 35.632 | 4.089 | 5.510 | 1.098.180 | 89.326 | 73.244 | 84,2 | 15,3 | 0,1 | 0,5 | 82,1 | 6,9 | 5,6 | 3,2 | 0,8 |
| 28 | 45.203 | 5.277 | 5.271 | 1.308.689 | 79.205 | 61.956 | 86,9 | 6,9 | 0,1 | 6,1 | 64,1 | 9,6 | 13,8 | 7,0 | 2,4 |
| 29 | 37.579 | 4.380 | 6.060 | 1.115.891 | 78.399 | 55.978 | 80,7 | 14,2 | 0,1 | 5,0 | 54,6 | 8,0 | 12,4 | 9,9 | 5,9 |
| 30 | 33.802 | 3.992 | 3.532 | 954.068 | 47.498 | 35.342 | 83,8 | 15,4 | 0,0 | 0,8 | 54,5 | 15,1 | 12,5 | 9,3 | 3,5 |
| 31 | 32.767 | 4.176 | 6.650 | 353.249 | 77.978 | 52.897 | 94,4 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 39,0 | 15,1 | 24,1 | 18,1 | 1,8 |
| 32 | 34.117 | 4.101 | 5.358 | 388.450 | 63.456 | 43.297 | 89,0 | 11,0 | 0,0 | 0,0 | 32,2 | 11,8 | 19,9 | 20,5 | 7,7 |
| 33 | 27.078 | 4.078 | 2.932 | 593.716 | 34.993 | 23.925 | 92,1 | 6,7 | 0,0 | 1,2 | 75,6 | 11,8 | 6,9 | 3,8 | 1,4 |
| 34 | 27.635 | 4.395 | 6.012 | 619.131 | 72.954 | 50.938 | 96,4 | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 75,7 | 5,5 | 9,8 | 6,1 | 1,5 |
| 35 | 29.065 | 4.783 | 6.319 | 277.035 | 57.777 | 30.552 | 89,5 | 10,3 | 0,0 | 0,2 | 74,2 | 5,9 | 8,0 | 6,8 | 3,2 |
| 36 | 24.817 | 4.748 | 5.401 | 257.694 | 46.901 | 22.991 | 79,8 | 20,2 | 0,0 | 0,0 | 58,6 | 12,1 | 16,9 | 11,0 | 1,2 |
| 37 | 36.853 | 4.343 | 4.559 | 687.793 | 57.257 | 40.788 | 83,1 | 16,8 | 0,0 | 0,1 | 60,0 | 7,3 | 10,1 | 9,9 | 4,8 |
| 38 | 34.763 | 4.652 | 4.108 | 639.676 | 51.288 | 36.366 | 89,0 | 11,0 | 0,0 | 0,0 | 62,8 | 11,5 | 13,6 | 7,2 | 2,3 |
| 39 | 32.103 | 4.056 | 3.458 | 948.039 | 47.949 | 36.431 | 78,3 | 21,5 | 0,0 | 0,2 | 70,1 | 9,6 | 9,4 | 6,3 | 2,0 |
| 40 | 30.957 | 4.592 | 5.229 | 913.981 | 73.997 | 56.941 | 95,2 | 4,7 | 0,0 | 0,1 | 77,8 | 6,8 | 6,1 | 6,2 | 1,6 |
| 41 | 46.619 | 6.638 | 13.35 | 1.746.394 | 186.36 | 142.48 | 94,4 | 5,4 | 0,0 | 0,1 | 84,4 | 4,7 | 5,8 | 2,7 | 0,9 |
| 42 | 25.962 | 4.473 | 16.17 | 399.315 | 158.87 | 77.659 | 1,7 | 0,4 | 94,8 | 3,1 | 90,1 | 7,1 | 2,4 | 0,3 | 0,1 |
| 43 | 22.860 | 4.720 | 14.76 | 347.453 | 157.29 | 76.014 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 99,9 | 95,9 | 3,6 | 0,4 | 0,0 | 0,0 |
| 44 | 27.962 | 5.065 | 35.06 | 1.313.262 | 367.73 | 194.97 | 0,0 | 0,2 | 96,4 | 3,4 | 96,0 | 3,6 | 0,3 | 0,1 | 0,1 |
| 45 | 28.591 | 4.781 | 26.86 | 1.334.839 | 278.62 | 137.18 | 0,1 | 0,4 | 51,9 | 47,6 | 97,5 | 1,5 | 0,7 | 0,2 | 0,1 |
| 46 | 20.145 | 4.728 | 26.55 | 304.321 | 278.24 | 148.10 | 0,0 | 0,1 | 97,3 | 2,6 | 95,9 | 3,0 | 0,9 | 0,2 | 0,0 |
| 47 | 19.544 | 5.549 | 44.37 | 312.393 | 474.68 | 230.61 | 0,0 | 0,0 | 3,1 | 96,9 | 94,9 | 3,3 | 1,1 | 0,0 | 0,0 |
| 48 | 35.537 | 5.246 | 5.043 | 1.181.589 | 67.281 | 49.835 | 51,1 | 47,3 | 1,5 | 0,1 | 90,9 | 4,8 | 3,5 | 0,5 | 0,2 |
| 49 | 25.096 | 4.757 | 12.92 | 877.422 | 129.82 | 63.080 | 0,1 | 0,1 | 61,9 | 38,0 | 93,3 | 3,9 | 1,7 | 1,0 | 0,1 |
| 50 | 22.496 | 5.056 | 16.61 | 787.481 | 173.20 | 81.206 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 99,9 | 95,6 | 3,5 | 0,7 | 0,1 | 0,0 |

Anhang D: Ergebnisse der vier Verkehrsnachfrage-Szenarien

| Nr. | real | | N ₃₀ | | N ₅₀ | | N ₁₀₀ | |
|-----|---------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|------------------|-------------------------|
| | DTV [Fz/d] | GK _{WS} [€] | DTV [Fz/d] | GK _{WS} [€] | DTV [Fz/d] | GK _{WS} [€] | DTV [Fz/d] | GK _{WS} [€] |
| 01 | 42.057 | 20.631 | 43.501 | 56.761 | 44.261 | 94.665 | 46.386 | 354.997 |
| 02 | 43.678 | 60.736 | 43.577 | 56.878 | 44.774 | 118.201 | 46.862 | 389.240 |
| 03 | 49.748 | 42 | 73.441 | 74.192 | 74.529 | 111.461 | 76.753 | 255.130 |
| 04 | 65.777 | 1.447.803 | 45.232 | 1.623 | 46.196 | 2.270 | 48.096 | 4.365 |
| 05 | 64.904 | 485.355 | 53.087 | 1.153 | 53.798 | 1.601 | 55.065 | 2.919 |
| 06 | 68.909 | 1.366 | 76.782 | 23.160 | 78.394 | 44.251 | 80.829 | 120.561 |
| 07 | 73.269 | 648.585 | 63.692 | 29.658 | 64.635 | 43.337 | 67.059 | 104.739 |
| 08 | 39.185 | 87 | 54.827 | 84.664 | 55.934 | 134.576 | 58.017 | 306.947 |
| 09 | 37.350 | 16 | 51.610 | 21.076 | 53.048 | 41.966 | 56.060 | 152.500 |
| 10 | 66.278 | 320 | 79.496 | 25.048 | 80.699 | 41.707 | 83.364 | 127.152 |
| 11 | 37.285 | 0 | 86.016 | 30.724 | 86.916 | 44.000 | 89.433 | 127.882 |
| 12 | 27.323 | 2.044 | 31.371 | 62.061 | 32.379 | 129.852 | 34.273 | 414.376 |
| 13 | 27.361 | 556 | 34.176 | 108.886 | 34.764 | 153.693 | 35.780 | 299.589 |
| 14 | 51.000 | 206.678 | 48.875 | 99.116 | 50.052 | 149.478 | 52.427 | 328.607 |
| 15 | 36.993 | 1.994 | 40.384 | 15.666 | 41.090 | 24.765 | 42.153 | 46.488 |
| 16 | 37.652 | 1.147 | 41.937 | 10.507 | 42.879 | 17.742 | 44.580 | 44.097 |
| 17 | 37.344 | 2.079 | 42.387 | 33.955 | 42.873 | 46.867 | 44.105 | 110.543 |
| 18 | 39.167 | 6.575 | 41.787 | 31.251 | 42.623 | 54.756 | 43.493 | 100.473 |
| 19 | 54.412 | 54.071 | 52.766 | 25.097 | 54.007 | 44.887 | 56.188 | 114.718 |
| 20 | 55.897 | 7.774 | 58.557 | 30.412 | 59.584 | 50.365 | 61.245 | 113.698 |
| 21 | 71.828 | 190.656 | 69.437 | 80.003 | 70.648 | 124.933 | 72.897 | 276.189 |
| 22 | 71.625 | 1.195.628 | 60.004 | 50.449 | 60.856 | 67.761 | 63.649 | 165.817 |
| 23 | 34.157 | 30 | 50.341 | 52.152 | 51.584 | 95.224 | 54.096 | 303.199 |
| 24 | 32.674 | 38 | 47.243 | 79.227 | 48.318 | 136.190 | 50.942 | 433.725 |
| 25 | 19.333 | 50 | 27.419 | 101.841 | 28.629 | 269.557 | 30.553 | 860.438 |
| 26 | 19.405 | 14 | 30.697 | 196.701 | 31.946 | 381.368 | 34.080 | 1.062.408 |
| 27 | 27.243 | 163 | 35.632 | 73.244 | 36.364 | 133.923 | 38.796 | 666.693 |
| 28 | 26.572 | 1 | 45.203 | 61.956 | 45.928 | 100.977 | 47.696 | 295.511 |
| 29 | 37.005 | 41.856 | 37.579 | 55.978 | 38.556 | 90.826 | 39.725 | 164.823 |
| 30 | 37.061 | 463.065 | 33.802 | 35.342 | 34.387 | 59.204 | 35.811 | 191.843 |
| 31 | 39.942 | 1.221.402 | 32.767 | 52.897 | 33.121 | 64.885 | 34.279 | 121.817 |
| 32 | 31.754 | 8.778 | 34.117 | 43.297 | 34.439 | 54.376 | 35.333 | 103.304 |
| 33 | 20.982 | 160 | 27.078 | 23.925 | 28.583 | 66.190 | 30.652 | 210.918 |
| 34 | 21.364 | 204 | 27.635 | 50.938 | 28.251 | 82.722 | 29.379 | 190.476 |
| 35 | 26.143 | 3.587 | 29.065 | 30.552 | 29.734 | 47.005 | 30.683 | 84.579 |
| 36 | 26.535 | 70.855 | 24.817 | 22.991 | 25.314 | 32.581 | 26.286 | 61.015 |
| 37 | 33.016 | 2.968 | 36.853 | 40.788 | 37.738 | 74.825 | 38.737 | 144.909 |
| 38 | 32.810 | 12.049 | 34.763 | 36.366 | 35.649 | 58.450 | 37.158 | 123.233 |
| 39 | 30.825 | 11.558 | 32.103 | 36.431 | 33.192 | 91.382 | 34.856 | 312.628 |
| 40 | 28.963 | 17.537 | 30.957 | 56.941 | 32.007 | 103.233 | 33.910 | 267.518 |
| 41 | 30.373 | 22 | 46.619 | 142.489 | 47.829 | 222.803 | 50.112 | 496.111 |
| 42 | 8.427 | 0 | 25.962 | 77.659 | 27.401 | 215.683 | 30.127 | 741.231 |
| 43 | 8.452 | 0 | 22.860 | 76.014 | 25.200 | 265.096 | 29.064 | 1.055.455 |
| 44 | 12.787 | 0 | 27.962 | 194.973 | 30.173 | 519.146 | 33.271 | 1.420.791 |
| 45 | 12.982 | 0 | 28.591 | 137.185 | 30.302 | 327.351 | 33.419 | 1.053.378 |
| 46 | 8.662 | 0 | 20.145 | 148.106 | 22.351 | 588.987 | 25.197 | 1.750.713 |
| 47 | 8.436 | 0 | 19.544 | 230.618 | 21.466 | 573.211 | 24.423 | 1.795.502 |
| 48 | 40.054 | 748.018 | 35.537 | 49.835 | 36.450 | 96.268 | 39.842 | 680.938 |
| 49 | 6.599 | 0 | 25.096 | 63.080 | 26.745 | 181.994 | 28.966 | 574.875 |
| 50 | 6.506 | 0 | 22.496 | 81.206 | 24.047 | 198.866 | 26.569 | 614.778 |

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2014

V 238: Optimierung der Arbeitsprozesse im Straßenbetriebsdienst – Sommerdienst

Schmauder, Jung, Paritschkow € 19,00

V 239: Dynamische Messung der Griffigkeit von Fahrbahnmarkierungen

Steinauer, Oeser, Kemper, Schacht, Klein € 16,00

V 240: Minikreisverkehre – Ableitung ihrer Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen

Baier, Leu, Klemps-Kohnen, Reinartz, Maier, Schmotz € 23,50

V 241: Rastanlagen an BAB – Verbesserung der Auslastung und Erhöhung der Kapazität durch Telematiksysteme

Kleine, Lehmann, Lohoff, Rittershaus € 16,50

V 242: Bordsteinkanten mit einheitlicher Bordhöhe und Bodenindikatoren an Überquerungsstellen

Boenke, Grossmann, Piazzolla, Rebstock, Herrnsdorf, Pfeil € 20,00

V 243: Nutzen und Kosten von Verkehrsbeeinflussungsanlagen über den gesamten Lebenszyklus

Balmberger, Maibach, Schüller, Dahl, Schäfer € 17,50

V 244: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2013

Fitschen, Nordmann € 28,50

V 245: Überprüfung der Befahrbarkeit innerörtlicher Knotenpunkte mit Fahrzeugen des Schwerlastverkehrs

Friedrich, Hoffmann, Axer, Niemeier, Tengen, Adams, Santel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 246: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Verkehrssicherheit in Einfahrten auf Autobahnen

Kathmann, Roggendorf, Kemper, Baier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 247: Befahrbarkeit plangleicher Knotenpunkte mit Lang-Lkw

Lippold, Schemmel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 248: Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw – Grundlagentermittlung

Burg, Röhling
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2015

V 249: Auswirkungen von Querschnittsgestaltung und längsgerichteten Markierungen auf das Fahrverhalten auf Landstraßen

Schlag, Voigt, Lippold, Enzfelder
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 250: Befahrbarkeit spezieller Verkehrsanlagen auf Autobahnen mit Lang-Lkw

Lippold, Schemmel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 251: Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen von Straßenumgestaltungen nach dem „Shared Space“-Gedanken
Baier, Engelen, Klemps-Kohnen, Reinartz € 18,50

V 252: Standortkataster für Lärmschutzanlagen mit Ertragsprognose für potenzielle Photovoltaik-Anwendungen

Gündra, Barron, Henrichs, Jäger, Höfle, Marx, Peters, Reimer, Zipf € 15,00

V 253: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Sicherheit und den Ablauf des Verkehrs in Arbeitsstellen

Baier, Kemper
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 254: Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw

Wellner, Uhlig
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 255: Überholen und Räumen – Auswirkungen auf Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf durch Lang-Lkw

Zimmermann, Riffel, Roos
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 256: Grundlagen für die Einbeziehung der sonstigen Anlagenteile von Straßen in die systematische Straßenerhaltung als Voraussetzung eines umfassenden Asset Managements

Zander, Birbaum, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 257: Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen

Ohm, Fiedler, Zimmermann, Kraxenberger, Maier, Hantschel, Otto € 18,00

V 258: Regionalisierte Erfassung von Straßenwetter-Daten

Holldorb, Streich, Uhlig, Schäufole € 18,00

V 259: Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten

Geistefeldt, Sievers
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 260: Berechnung der optimalen Streudichte im Straßenwinterdienst

Hausmann € 15,50

V 261: Nutzung von Radwegen

in Gegenrichtung – Sicherheitsverbesserungen
Alrut, Bohle, Busek € 16,50

V 262: Verkehrstechnische Optimierung des Linksabbiegens vom nachgeordneten Straßennetz auf die Autobahn zur Vermeidung von Falschfahrten

Maier, Pohle, Schmotz, Nirschl, Erbsmehl € 16,00

V 263: Verkehrstechnische Bemessung von Landstraßen – Weiterentwicklung der Verfahren

Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff € 16,50

V 264: Qualitätsstufenkonzepte zur anlagenübergreifenden Bewertung des Verkehrsablaufs auf Außerortsstraßen

Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff € 17,00

V 265: Entwurfstechnische Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken

Bark, Kutschera, Resnikow, Baier, Schuckliß
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 266: Verfahren zur Bewertung der Verkehrs- und Angebotsqualität von Hauptverkehrsstraßen

Baier, Hartkopf € 14,50

V 267: Analyse der Einflüsse von zusätzlichen Textanzeigen im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen
Hartz, Saighani, Eng, Deml, Barby
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 268: Motorradunfälle – Einflussfaktoren der Verkehrsinfrastruktur
Hegewald, Fürneisen, Tautz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

V 269: Identifikation von unfallauffälligen Stellen motorisierter Zweiradfahrer innerhalb geschlossener Ortschaften
Pohle, Maier € 16,50

V 270: Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst (KliBet)
Holldorb, Rumpel, Biberach, Gerstengarbe, Österle, Hoffmann € 17,50

V 271: Verfahren zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien bei der Ausschreibung von Elementen der Straßeninfrastruktur
Offergeld, Funke, Eschenbruch, Fandrey, Röwekamp
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 272: Einsatzkriterien für Baubetriebsformen
Göttgens, Kemper, Volkenhoff, Oeser, Geistefeldt, Hohmann € 16,00

V 273: Autobahnverzeichnis 2016
Kühnen € 25,50

V 274: Liegedauer von Tausalzen auf Landstraßen
Schulz, Zimmermann, Roos € 18,00

V 275: Modellversuch für ein effizientes Störfallmanagement auf Bundesautobahnen
Grah, Skottke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 276: Psychologische Wirkung von Arbeitsstellen auf die Verkehrsteilnehmer
Petzoldt, Mair, Krems, Roßner, Bullinger € 30,50

V 277: Verkehrssicherheit in Einfahrten auf Autobahnen
Kathmann, Roggendorf, Scotti
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 278: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014
Fitschen, Nordmann € 30,50

V 279: HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen
Geistefeldt, Giuliani, Busch, Schendzielorz, Haug, Vortisch, Leyn, Trapp € 23,00

2017

V 280: Demografischer Wandel im Straßenbetriebsdienst – Analyse der möglichen Auswirkungen und Entwicklung von Lösungsstrategien
Pollack, Schulz-Ruckriegel € 15,50

V 281: Entwicklung von Maßnahmen gegen Unfallhäufungsstellen – Weiterentwicklung der Verfahren
Maier, Berger, Kollmus € 17,50

V 282: Aktualisierung des Überholmodells auf Landstraßen
Lippold, Vettors, Steinert € 19,50

V 283: Bewertungsmodelle für die Verkehrssicherheit von Autobahnen und von Landstraßenknotenpunkten
Bark, Krähling, Kutschera, Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Schuckließ, Maier, Berger € 19,50

V 284: Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten
Geistefeldt, Sievers
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 285: Praxisgerechte Anforderungen an Tausalz
Kamptner, Thümmeler, Ohmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 286: Telematisch gesteuertes Kompaktparken – Grundlagen und Entwicklung
Kleine, Lehmann € 16,50

V 287: Werkzeuge zur Durchführung des Bestandsaudits und einer erweiterten Streckenkontrolle
Bark, Kutschera, Resnikow, Follmann, Biederbick € 21,50

V 288: Überholungen von Lang-Lkw - Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und den Verkehrsablauf
Roos, Zimmermann, Köhler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 289: Verkehrsqualität an verkehrsunabhängig gesteuerten und koordinierten Lichtsignalanlagen
Geistefeldt, Giuliani, Vieten, Dias Pais in Vorbereitung

V 290: Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung
Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz, Kuhnimhof, Köhler € 19,00

V 291: Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko
Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz, Kuhnimhof, Köhler € 18,50

V 292: Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw
Burg, Schrempp, Röhling, Klaas-Wissing, Schreiner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 293: Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen
Geistefeldt, Hohmann, Estel
Unterauftragnehmer: Manz € 17,50

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de