

Veröffentlichungen aus dem  
**INSTITUT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN**

Heft 35

---

**PETER SCHICK**

**EINFLUSS VON STRECKENBEEINFLUSSUNGSANLAGEN  
AUF DIE KAPAZITÄT VON AUTOBAHNABSCHNITTEN  
SOWIE DIE STABILITÄT DES VERKEHRSFLOSSES**

---

Universität Stuttgart  
Institut für Straßen- und Verkehrswesen  
Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich

Juni 2003

Herausgeber : Institut für Straßen- und Verkehrswesen  
Universität Stuttgart

Einbandgestaltung : Volker Schmid

Copyright : Das Copyright liegt beim Verfasser.

Eigenverlag und Vertrieb : Institut für Straßen- und Verkehrswesen  
Universität Stuttgart

Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik  
Seidenstr. 36  
70174 Stuttgart

**ISSN 0932 - 402X**

**ISBN 3-9808218-4-6**

**D 93**

Stuttgart, im Juni 2003

# **Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses**

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität  
Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors der Ingenieurwissenschaften  
(Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

**Peter Schick**

aus Esslingen a.N.

Hauptberichter:	Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart D. Kühne
Mitberichter:	Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Heinz Tiefenthaler
Tag der mündlichen Prüfung:	25.06.2003

Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart

2003



## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation basiert auf das durch die Bundesanstalt für Straßenwesen finanzierte Forschungsprojekt „Ermittlung und Bewertung der Nutzenkomponenten von Streckenbeeinflussungsanlagen im Hinblick auf den Verkehrsablauf“, das ich während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik des Instituts für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit SSP-Consult, Stuttgart/München bearbeitet habe.

Für die Betreuung und Förderung der Arbeit sowie der Übernahme des Hauptberichts bedanke ich mich sehr herzlich bei dem ehemaligen Lehrstuhlsleiter Herrn Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Reinhart D. Kühne. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Universitätsprofessor Dipl.-Ing. Dr. Heinz Tiefenthaler, dem Vorstand des Instituts für Straßenbau und Verkehrsplanung der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck für die Übernahme des Mitberichts. Seine Anregungen und Anmerkungen haben sehr zur Abrundung der Arbeit beigetragen.

Mein weiterer Dank gilt den Herren Dipl.-Ing. Thomas Pischner, Dipl.-Ing. Stefan Hangleiter, Dipl.-Ing. (FH) Uwe Lambacher und Dipl.-Ing. Stefan Trupat, die im Rahmen des Forschungsprojekts unter anderem den aufwendigen Teil der Datengewinnung übernommen haben. Ihnen gilt mein Dank für die freundliche und produktive Zusammenarbeit und das stets „offene Ohr“ für Fragen. Darüber hinaus danke ich allen Mitarbeitern des Instituts, die das Gelingen der Arbeit durch kritische Anmerkungen und Ratschläge gefördert haben. Mein besonderer Dank gilt dabei Herrn Dipl.-Ing. (FH) Michael Veeck und Herrn cand.-ing. Ingo Wehberg für die große Unterstützung bei der Aufbereitung und Auswertung der enormen Datenmengen. Nicht zuletzt möchte ich meinen Eltern und meiner Freundin Janine danken, die mich mit viel Verständnis und Geduld bei der Anfertigung der Arbeit unterstützt haben.



## Zusammenfassung

Mit zunehmender Verkehrsbelastung des Straßennetzes und gleichzeitigem Rückgang der finanziellen Mittel werden Möglichkeiten zu einer Steigerung der Kapazität von Autobahnen mit betrieblichen Maßnahmen zunehmend von Bedeutung. In Deutschland wird dafür das Konzept der Beeinflussung des Verkehrs mittels variablen Geschwindigkeitsbeschränkungen und verkehrlichen Anordnungen verfolgt. Diese mit Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) bezeichneten Systeme sind standardisiert und auf einer Länge von 800 km in Betrieb. Weitere Investitionen sind geplant.

Während die Erfolge dieser Anlagen bei der Senkung der Unfallzahlen durch mehrere Untersuchungen belegt sind, liegen wenige Kenntnisse über die Auswirkungen auf die Kapazität vor. Einzelne, zum Teil lange zurück liegende Untersuchungen berichten von einer geringen Steigerung der maximalen Verkehrsstärke und lassen Stabilisierungswirkungen des Verkehrsflusses vermuten.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Auswirkungen von SBA auf die Kapazität (max. Verkehrsstärke) und die Leistungsfähigkeit (q-v-Funktion) der Strecke sowie auf die Homogenität und die Stabilität des Verkehrsflusses zu untersuchen.

Der Untersuchungsansatz besteht in einer empirischen Betrachtung des Verkehrsflusses an Mit-SBA- und Ohne-SBA-Strecken. Dabei muss auf eine größtmögliche Vergleichbarkeit aller Einflussfaktoren auf den Verkehrsablauf (Weg-, Umfeld- und Verkehrsbedingungen) geachtet werden. Insgesamt wurden Messdaten von 244 Messquerschnitten an 9 verschiedenen Strecken für einen Zeitraum von in der Regel 14 Tagen und in der zeitlichen Auflösung von einer Minute beschafft.

Die Untersuchung der Kapazität erfolgt über die Betrachtung der maximalen, empirischen Verkehrsstärke (emp.  $q_{max}$ ). Voraussetzung dafür ist, dass an dem jeweiligen Querschnitt im Untersuchungszeitraum die Verkehrsnachfrage die Kapazität überschritten hat. Als Ergebnis ergeben sich weitgehend gleiche Kapazitäten für beeinflusste und unbeeinflusste Streckenabschnitte. Im Rahmen dieser Untersuchung kann also keine kapazitätssteigernde Wirkung von SBA festgestellt werden. Diese Aussage gilt für die - bei einem Vergleich verschiedener Streckenabschnitte erreichbaren - Genauigkeit von wenigen Prozent. Die gleiche Aussage ergibt sich bei der Untersuchung der Leistungsfähigkeit (q-v-Funktion). Hier kann im Rahmen der Untersuchungsgenauigkeit ebenfalls keine Steigerung nachgewiesen werden.

Dies gilt nicht für SBA, die die Funktion der temporären Standstreifenfreigabe beinhalten. Hiermit sind deutliche Steigerungen bei der Kapazität und der Leistungsfähigkeit erzielbar.

Die Untersuchung der Homogenität des Verkehrsablaufs zeigt deutliche Harmonisierungswirkungen von SBA. An beeinflussten Streckenabschnitten ist die Verteilung des Verkehrs auf die Fahrstreifen gleichmäßiger. Insbesondere wird der „Linksfahrer-Effekt“, also die Überfüllung des linken Fahrstreifens bei gleichzeitiger Unterauslastung des rechten und mittleren Fahrstreifens, reduziert.

Für die Untersuchung der Stabilisierungswirkung wurde eine neue Methode entwickelt, die Phasenübergänge vom freien in den stockenden Verkehr ermittelt und in Bezug zur Verkehrsstärke setzt. Dazu wird der „signifikante Verkehrszusammenbruch“ definiert. Dieser wird als ein Abfallen der Geschwindigkeit um mindestens 15 km/h in einem Zeitraum von maximal 5 Minuten beschrieben. Weitere Randbedingungen stellen sicher, dass zufällige Schwankungen des Verkehrsablaufs ausgefiltert werden. Als Ergebnis zeigt sich eine deutlich geringere Zusammenbruchswahrscheinlichkeit an beeinflussten Strecken. SBA stabilisieren demnach den Verkehr und halten den Verkehrsfluss nahe der Kapazitätsgrenze länger aufrecht.

Mit Hilfe des EWS-Bewertungsverfahrens werden die Reisezeitersparnisse für die Verkehrsteilnehmer in monetäre Einheiten umgerechnet und auf den allgemeinen Anwendungsfall übertragen. Zusätzlich wird der Nutzen quantifiziert, der sich aus Reisezeitersparnissen bei einem Wegfall einer statischen Geschwindigkeitsbegrenzung und durch eine temporäre Standstreifenfreigabe ergibt. Es zeigt sich, dass der Gesamtnutzen bei sehr hohen Verkehrsstärken bis hin zu der Höhe des bisher berücksichtigten Nutzens aus der Senkung der Unfallzahlen reicht.

Schließlich werden Vorschläge zur Optimierung des Steuerungsprogramms von Streckenbeeinflussungsanlagen im Hinblick auf die Stabilisierung eines Verkehrsflusses gegeben. Da Verkehrszusammenbrüche wegen ihrer probabilistischen Eigenschaften auch mit einer detaillierter Messung des Verkehrsflusses nicht vorhersehbar sind, sind verkehrsabhängige Steueralgorithmen wenig geeignet, um Verkehrszusammenbrüche zu vermeiden. Daher wird die zusätzliche Implementierung festzeitgesteuerter Harmonisierungsprogramme vorgeschlagen, die z.B. im regelmäßig auftretenden Berufsverkehr zur Steigerung der Wirksamkeit von SBA bei der Stauvermeidung eingesetzt werden könnten. Dies sollte verbunden werden mit einer verbesserten Information der Verkehrsteilnehmer (z.B. Hinweistafeln) aber auch mit einer verstärkten Überwachung des Befolgungsgrads.



## **Abstract**

### **Problem and objective of the research work**

As a result of the increasing traffic volume of the road network on the one hand and the reduction of funds on the other hand the possibilities to increase the capacity of freeways via operational measures are of growing importance. To this aim Germany follows the concept to control traffic using variable speed limits and traffic regulations. These systems are called “corridor control systems” (CCS) and automatically issue speed limits, non-passing regulations for trucks, warnings about dangerous weather and traffic conditions. Such systems are installed on German freeways over a length of more than 800 km with the aim to increase traffic safety and performance. For the years to come, considerable further investments in this kind of system are planned.

So far the examination of the effectiveness of CCS concentrated mainly on the reduction of accident figures. In this respect the corridor control systems lead to impressive results. Especially the number of accidents occurring due to special weather or surrounding conditions has been dramatically reduced (for instance the number of accidents occurring because of fog went down by 80%). Several substantial research projects secured the findings on accident reduction to such an extent as to allow for the implementation of these findings into cost-benefit analysis of investment decisions.

The effects of CCS on traffic flow have not been investigated into detail so far. Several examinations have been carried out on the harmonization of traffic flow in combination with examinations of accidents. These examinations assessed both the temporal as well as the spatial harmonization effects of the CCS. There exist only few examinations about the effects on capacity and performance respectively, although the first investigations dating from the seventies and the eighties already brought evidence on the positive effects of these systems. An even smaller number of reports exists on the stabilization effect of CCS, although early research done in this direction showed that these systems will lead to a stabilization of traffic flow.

The objective of this research work is to examine the effects of CCS with respect to traffic flow in the sector of the capacity limit, to determine existing mechanisms of action and to survey these mechanisms in an assessment procedure. To this aim examinations on capacity and performance of routes and on the stability of traffic flow are carried out using data sets of numerous corridors with and without CCS.

## **Methodology and data base**

The objective of this work of research is the determination and quantification of possible benefit components of CCS with respect to an improvement of traffic flow. Possible effects of the CCS on travel times of road users are particularly under investigation.

As a basis for this examination an empiric consideration is selected, that is, substantial measurements of traffic flow along numerous corridors are procured and evaluated. The measurement data are examined with respect to capacity, performance, as well as the homogeneity and stability of traffic flow. By comparing routes with CCS with routes without such systems the effects of these systems have been assessed.

Measurement data from 9 corridors and 244 cross-sections have been attained for this research project. The data set covers numerous implementation areas of CCS (two or three-lane cross-sections, routes in conurbations or connecting routes, topography: flat or hilly). For every cross-section there are available data on traffic flow for an interval of one minute for every lane over a time period of 14 days. Besides for selected cross-sections along routes with CCS the displays of the variable message signs (switching states) have been processed and linked to the measurement data on traffic flow.

In a first step 70 measurement cross-sections were selected on the basis of the plans of the sites and of the q-v-diagram for further examination. Due to their location and the high traffic volume these cross-sections proved especially suitable for statements on capacity. The cross-section were tested via an automated selection algorithm on their data quality and evaluated with respect to the objective of the examination.

## **Results from the examination of capacity**

Based on experience made in former research the capacity is established via consideration of the maximum traffic volume and not via application of a traffic flow model. In order to make sure that the rate of flow delivers a statement on capacity during the examination period it has to be observed that the traffic flow reaches capacity. To this aim the form of the point cloud in the unstable sector of the q-v-diagram has been examined. A clearly visible unstable sector with a parabolic envelope stays for congestion as a result of traffic overload and shows that the capacity at the cross section had been exceeded.

A variety of factors influence the capacity of a route section. To be able to quantify the influence of CCS by comparing different cross sections it is necessary that all other accompanying conditions (that is route, weather, traffic conditions) of the different cross sections are similar as much as possible. Within the attained data set

this condition was sufficiently fulfilled only along the corridor between the three-leg interchange Holledau and the interchange Neufahrn of the freeway A9 Munich-Nuremberg. In this sector the conditions for a comparison are very good, as one carriageway is equipped with a CCS and the other one has no such system. Comparable up to a certain extent to this data are the data on the freeway A8 Munich-Salzburg, from the route section interchange Brunntal to the freeway connector Bad Aibling.

If we compare the capacities of cross sections with identical accompanying conditions for all route, weather and traffic conditions, we will still find considerable differences. Evidence was found that these differences depend strongly on the traffic load (in terms of an average daily traffic load during the period of examination). In all sections the capacity increased with a rising traffic volume and with decreasing distance to the conurbations. Obviously the road users act more appropriate if the traffic volume increases or the distance to the next conurbation decreases and this way they make a higher capacity of the route sections possible.

This conclusion has been taken into consideration in the comparison of cross sections with and without a CCS. Therefore from the complete data set have been selected only those cross sections which showed both comparable route, weather and traffic conditions and a comparable traffic volume. All conditions have been fulfilled by 12 cross sections, of which 9 are cross sections with and 3 are cross sections without a CCS.

A comparison of the capacity of the selected cross sections did not show any significant differences. This is valid both for the commonly considered reference interval of one hour, as well as for shorter reference intervals of 15 minutes, 5 minutes and 1 minute. It has to be noticed that even if the analysis is done with utmost care a comparison of different cross sections will always contain a certain inaccuracy, as the influence of the local accompanying conditions can never be filtered out completely. This means that a slight increase of the maximum traffic flow (that is by only a small percentage) due to CCS cannot be detected with the help of this method of comparison. However a greater influence of CCS on capacity can be excluded in any case.

More precise statements could be made only on the basis of a more consistent database. This database could be obtained via a before/after comparison or ideally via a special switch and measurement program installed on a CCS.

We have a completely different situation if the CCS is combined with a temporarily functioning unblocking of shoulders. This way a very important increase of the capacity can be achieved. This capacity regularly corresponds to a capacity of a cross section with an additional lane. The CCS reduces the problems connected to traffic safety as the unblocking of the shoulder is done only temporarily and rarely and al-

ways in combination with the enactment of a speed limit and a survey of the traffic flow and in case of disturbances it displays the corresponding warnings upstream or cancels the unblocking of the shoulder.

### **Results from the analysis of performance**

This analysis regards the development of the speed level in dependence of the traffic flow (q-v-function). The illustration of the functional connection is done by using traffic flow models. Of the numerous traffic flow models developed, the linear and the square model have been used for their simplicity and reliability for the description of a stable traffic flow and the non-linear time-gap model for the description of an unstable traffic flow.

The comparison of the q-v-functions of different cross sections shows that the problem of comparability of different cross sections is even greater than the one occurring in case of capacity comparison. Local, objectively almost nondescript facts generate differences in the speed level. The problem of the subjective influences on the speed level also occurred in former examinations.

The comparison of cross sections with corridor control systems with cross sections lacking these systems does not show any significant differences. As in case of the examination of capacity because of the remaining inaccuracy of the comparison a slight increase of the performance cannot be made out clearly, a considerable effect however can be excluded.

The situation is different if through the equipment of a route with a corridor control system an already existing static speed limit is eliminated. In this case in the sector of free traffic flow the road users will profit from gains in average travel speed.

### **Results from the analysis of harmonization effects**

The harmonization effect of CCS has not been examined as a separate benefit component but as an explanation of the functionality of a CCS. To this aim the results of former research have been compiled and own research on the distribution of traffic on the different lanes, as well as on the effects of the non-passing regulation for trucks, has been accomplished.

A comparison between cross sections with corridor control systems and such sections without CCS show significant differences with respect to the distribution of the traffic on the lanes. In case of the cross sections with CCS the distribution is more uniform on average than it is in case of cross sections without CCS. CCS especially lead to a reduction of the so-called driving-on-the-left-lane-effect and this means that the peak traffic volume on the left lane is reduced in favor of a better utilization of the middle and the right lane.

## Results from the analysis of stabilization effects

Regarding the capacity and the performance of routes does not cover all possible mechanisms of action of CCS that could lead to a beneficial effect on traffic flow. The measurement of congestion times done by former research indicated that CCS lead to a stabilization of traffic flow. However up to now there does not exist any kind of quantification of this effect.

Within the framework of this research a methodology to describe the stability of a traffic flow is developed and applied at numerous cross sections. The basic approach consists in the definition of the *significant traffic breakdown* describing a reversal of the traffic from a stable into an unstable state. Extensive analyses on phases and phase transitions of traffic are done in order to delimit the significant traffic breakdowns from the accidental fluctuations in traffic flow. Based upon former knowledge and on parameter studies of the data set a significant traffic breakdown is defined as a speed drop by at least 15 km/h within a period of 5 minutes, whereas the traffic flow must be in the stable state ( $v > 75$  km/h) before the breakdown and in the unstable state ( $v < 85$  km/h) after the breakdown. A floating averaging avoids the influence of minor fluctuations on traffic flow. For the evaluation the traffic volume at the beginning of a traffic breakdown is of importance. The traffic densities of the calculated traffic breakdowns are differentiated in traffic volume classes. Finally the number of traffic breakdowns is divided through the number of existing traffic volume classes in order to define the probability of a traffic breakdown in dependence of the traffic volume.

A comparison shows that on cross sections with CCS breakdown probability is considerably lower than on cross sections without CCS. CCS reduce the probability of a reverse of the traffic flow from a stable into an unstable state. Consequently we can talk about a stabilization effect of the CCS. On routes with CCS traffic flow keeps for a longer period in the stable state for traffic volumes near the capacity limit. This way the road user can benefit from gains in travel time.

A detailed analysis of the traffic breakdowns shows that on cross sections without CCS these breakdowns generally start on the left lane, after a very high traffic volume had occurred on this lane. This effect is shown in the heavy speed decrease on the left lane, whereas on the right lane the traffic is still flowing. On cross sections with CCS the speed decrease on the left lane is more uniform and slower. The traffic flow can pass over into an extremely synchronous state both under spatial and temporal aspects at a speed level lying between 60 km/h to 80 km/h. This state can be kept for a very long period of a couple of hours. This state of the traffic is very stable.

Based on this knowledge suggestions for the optimisation of the stabilization effect of CCS are issued. As short-time forecasts of the traffic flow are very difficult to

make, CCS often rather follow the traffic flow than to influence it actively. The potential given away here could be recovered in some cases through the overlapping of the traffic-actuated control with a fixed-time program. This fixed-time program could be used to generate preventive harmonizing speed limits (T100 and T120) on routes on which the traffic development can be forecasted because of its regularity (for instance commuter traffic). The fixed-time program should be timed very accurately according to the development of the traffic volume. This timing would guarantee that the speed limits are displayed only in case of very high traffic volumes and this way the road users would not find it problematic to accept these speed limits. Flanking measures such as information campaigns (for instance warning and information signs) and speed control could lead to a further increase of the effect.

### **Monetary evaluation of the effects**

For the consideration of the evaluated benefit components in investment decisions the evaluated effects are generalized and monetarized by using the common scheme on recommendations on cost-benefit analysis on road networks in Germany. Solely the effects of the gains in travel time have been taken into consideration, as the effects of the pollutants, the effects on climate or on operational costs are negligibly low, and the effects on noise development have to be considered for each case in particular.

The calculation of the benefit is done for a fictive route of 1 km length that complies with the accompanying conditions of the examination (three-lane cross section with longitudinal inclination of less than 2% and a truck fraction of 15%). For this fictive route section the economic benefit of the gains in travel time is determined. As the benefit is mainly depending on the traffic load (ADT = average daily traffic) data on different ADT-values are delivered.

The benefit components show up as the following:

#### Elimination of a static speed limit by the installation of a CCS

For the speed limit T120 existing in reality, the height of this benefit component is comparably small. As this speed limit is acting in the sector of the free traffic flow, it appears already at small ADT-values.

#### Stabilization of traffic flow with the help of CCS

This benefit component occurs if the traffic volume reaches the capacity. This is the case for three-lane cross sections with an AAT(=average annual traffic) from at least 90,000 vehicles/24h respectively or a traffic volume from at least 4,000 vehicles/h. A considerable benefit can be made out from at least 110,000 vehicles/24h respectively 5,000 vehicles/h.

### Temporary unblocking of shoulders in combination with CCS

The high increase of the capacity due to the extension of the cross-section over one more lane generates a very high benefit. In case of three-lane cross sections this benefit starts from an AAT of 100,000 vehicles/24h and tops all other benefit components if the AAT lies beyond 120,000 vehicles/24h (even the reduction of the number of accidents) by magnitudes. However it has to be taken into consideration that this measure is disproportionately expensive, as it generally requires constructional measures.

### **Conclusions**

The present examination shows that CCS can lead in different ways to an improvement of traffic flow and this way to gains in travel time for road users. If along a route occur high traffic volumes (that is the traffic volume regularly reaches or exceeds the capacity limit) a considerable economic benefit is generated. Under the aspect of its magnitude this benefit reaches the value of the benefit generated by the reduction of the number of accidents considered so far and should therefore be taken into consideration in connection with investment decisions.

Evidence is brought that with operational measures congestion situations can be defused. These measures should be especially considered if for financial reasons constructional measures are not possible (or only in the far future). If a route is overloaded temporarily and only rarely (for instance due to holiday traffic or big events) already in the planning state of the extension measures the increase of capacity of a temporary unblocking of shoulders should be considered integratively.

Basically emphasis should be put on the fact that with the help of optimised control algorithms as well as improved information and last but not least more frequent control of the road users the potential of CCS could be increased further.





## Inhaltsverzeichnis

<b>1 EINFÜHRUNG</b>	<b>19</b>
<b>2 STRECKENBEEINFLUSSUNGSANLAGEN</b>	<b>20</b>
2.1 Entwicklung und Bedeutung von Streckenbeeinflussungsanlagen in Deutschland .....	20
2.1.1 Entwicklungsgeschichte .....	20
2.1.2 Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen .....	24
2.2 Internationale Entwicklungen .....	26
2.3 Aufbau und Wirkungsweise von Streckenbeeinflussungsanlagen .....	28
2.3.1 Anordnung verkehrlicher Gebote / Wechselverkehrszeichen.....	28
2.3.2 Verkehrs- und Umfeldmessungen.....	31
2.3.3 Steueralgorithmen.....	32
<b>3 STAND DER WISSENSCHAFT</b>	<b>36</b>
3.1 Grundlagen des Verkehrsablaufs.....	36
3.1.1 Begriffe und Definitionen.....	36
3.1.2 Makroskopische Beschreibung des Verkehrsflusses auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen .....	38
3.1.3 Einflüsse auf den Verkehrsablauf .....	46
3.1.4 Statische Geschwindigkeitsbeschränkungen und Lkw-ÜV.....	49
3.2 Untersuchungen zur Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen .....	51
3.2.1 Untersuchungen zur Reduktion von Unfällen.....	51
3.2.2 Untersuchungen zum Verkehrsablauf an SBA.....	52
3.2.3 Internationale Forschungsergebnisse .....	62
3.2.4 Bewertung Forschungsstand und Ableitung des Forschungsbedarfs .....	63
<b>4 UNTERSUCHUNGSMETHODIK UND DATENGRUNDLAGE</b>	<b>65</b>
4.1 Untersuchungsziel.....	65
4.2 Untersuchungsmethodik .....	66
4.3 Entwurf des Mess- und Auswertekonzepts .....	68
4.4 Datenerfassung und Datenaufbereitung .....	70
4.4.1 Auswahl von Strecken und Zeiträumen .....	70
4.4.2 Erstellung der Datenbank und Plausibilitätskontrolle der Daten.....	72
4.5 Auswertekonzept.....	75
4.5.1 Auswahl geeigneter Querschnitte .....	75
4.5.2 Abstufung der Untersuchung .....	76
4.6 Vergleichsmöglichkeiten im Rahmen der Datenbasis .....	77

<b>5</b>	<b>EMPIRISCHE MAXIMALE VERKEHRSTÄRKE</b>	<b>80</b>
5.1	Grundlagen.....	80
5.2	Maximale Verkehrsstärke im Stundenintervall.....	82
5.2.1	Betrachtung dreistreifiger Querschnitte .....	82
5.2.2	Betrachtung zweistreifiger Querschnitte .....	91
5.3	Maximale Verkehrsstärke in kürzeren zeitlichen Bezugsintervallen .....	96
5.3.1	Grundlagen.....	96
5.3.2	Betrachtung dreistreifiger Querschnitte .....	96
5.3.3	Betrachtung zweistreifiger Querschnitte .....	102
5.4	Maximale Verkehrsstärke in Abhängigkeit des Schaltzustands.....	104
5.4.1	Grundlagen.....	104
5.4.2	Exemplarische Betrachtung eines dreistr. Querschnitts an der A9..	105
5.5	Temporäre Standstreifenfreigabe (A94) .....	109
<b>6</b>	<b>LEISTUNGSFÄHIGKEIT</b>	<b>113</b>
6.1	Grundlagen.....	113
6.2	Auswahl eines geeigneten Verkehrsflussmodells.....	113
6.3	Anwendung der Modelle in verschiedenen Zeitintervallen.....	116
6.4	Untersuchung dreistreifiger Querschnitte der A9 und der A8 Ost.....	120
6.5	Geschwindigkeitsniveau in Abhängigkeit des Schaltzustands.....	127
<b>7</b>	<b>HOMOGENITÄT DES VERKEHRSFLOSSES</b>	<b>130</b>
7.1	Grundlagen.....	130
7.2	Untersuchungsmethode .....	132
7.3	Verteilung des Verkehrs auf die Fahrstreifen.....	136
<b>8</b>	<b>STABILITÄT DES VERKEHRSFLOSSES</b>	<b>141</b>
8.1	Grundlagen.....	141
8.1.1	Zusammenhang zwischen Kapazität und Stabilität .....	141
8.1.2	Entstehung von Verkehrszusammenbrüchen.....	142
8.1.3	„Stau aus dem Nichts“ im Rahmen der vorliegenden Datenbasis ...	148
8.2	Phasen und Phasenübergänge des Verkehrsflusses .....	151
8.2.1	Phasen des Verkehrsflusses .....	151
8.2.2	Phasenübergänge im Verkehrsfluss.....	156
8.3	Methodik zur Untersuchung der Stabilität eines Verkehrsflusses.....	158
8.3.1	Definition eines Verkehrszusammenbruchs .....	158
8.3.2	Kriterien zur Abgrenzung eines Verkehrszusammenbruchs.....	161
8.3.3	Exemplarische Anwendung der Untersuchungsmethode .....	164

8.3.4	Berechnung von Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten .....	167
8.4	Vergleich der Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten verschiedener Querschnitte.....	169
8.4.1	Einfluss der Verkehrsbelastung .....	169
8.4.2	Vergleich Mit-SBA- und Ohne-SBA-Querschnitte der A9 und der A8 Ost .....	172
8.5	Analyse der Wirkungsweise von Streckenbeeinflussungsanlagen.....	174
8.6	Optimierung der Stabilisierungswirkung von SBA .....	182
<b>9</b>	<b>MONETÄRE BEWERTUNG DER WIRKUNGEN AUF DEN VERKEHRSABLAUF</b>	<b>185</b>
9.1	Auswahl einer geeigneten Bewertungsmethodik.....	185
9.2	Abbildung der Wirkungen mit dem Bewertungsschema der EWS.....	187
9.3	Qualitative Analyse des Einflusses der SBA auf die einzelnen Nutzenkomponenten .....	189
9.3.1	Vorbemerkung .....	189
9.3.2	Auswirkungen von SBA auf Betriebskosten, Luftschadstoffe und Klimabelastung .....	191
9.3.3	Auswirkungen von SBA auf die Lärmbelastung .....	193
9.3.4	Auswirkungen von SBA auf die Fahrzeiten .....	194
9.4	Quantitative Gesamtbewertung des Nutzens.....	196
9.4.1	Anmerkungen zur Gültigkeit der Aussagen.....	196
9.4.2	Nutzen von SBA im Vergleich zu einer statischen Geschwindigkeitsbeschränkung (T100 oder T120).....	198
9.4.3	Nutzen von SBA durch Stabilisierung des Verkehrsflusses .....	200
9.4.4	Nutzen von SBA mit temporärer Standstreifenfreigabe .....	203
9.5	Zusammenfassung und Bewertung der Nutzenkomponenten von SBA....	206
<b>10</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	<b>213</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>219</b>
	<b>BEGRIFFS- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>226</b>
	<b>ANHANG</b>	<b>A-1 bis A-16</b>



## 1 EINFÜHRUNG

Die rasante Entwicklung des Straßenverkehrs seit den fünfziger Jahren führte in Deutschland trotz erheblicher Ausbaumaßnahmen des Straßennetzes rasch zu Verkehrsüberlastungen. Schon bald wurde erkannt, dass aus wirtschaftlichen und umweltpolitischen Gründen die Verkehrsprobleme nicht nur mit baulichen Maßnahmen gelöst werden können. Seither werden sowohl auf dem innerstädtischen als auch auf dem außerstädtischen Straßennetz betriebliche Maßnahmen zur Optimierung des Verkehrsablaufs durchgeführt.

Bei den Bundesfernstraßen wird hauptsächlich das Konzept der Beeinflussung des Verkehrs mittels Wechselverkehrszeichen verfolgt. Diese mit *Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA)* bezeichneten Systeme erlassen in Abhängigkeit der Verkehrssituation automatisch Geschwindigkeitsbegrenzungen sowie Lkw-Überholverbote und warnen vor gefährlichen Umfeld- und Verkehrsbedingungen. Derartige Systeme wurden seit 1965 auf über 800 km Länge mit dem Ziel der Erhöhung der Verkehrssicherheit und der Leistungsfähigkeit installiert. Erhebliche weitere Investitionen sind für die nächsten Jahre geplant.

Die Untersuchung der Wirksamkeit von SBA konzentrierte sich bislang überwiegend auf die Reduktion der Unfallzahlen und Unfallfolgen. Hier konnten eindrucksvolle Wirkungen von SBA festgestellt werden. Insbesondere bei der Senkung von umfeldbedingten Unfällen wurden enorme Erfolge nachgewiesen (z.B. Senkung von Nebelunfällen um 80%). Mehrere umfangreiche Forschungsarbeiten konnten die Erkenntnisse zur Unfallreduktion soweit absichern, dass diese in Kosten-Nutzen-Untersuchungen von Investitionsentscheidungen einfließen.

Die Auswirkungen von SBA auf den Verkehrsfluss sind weniger gut erforscht. Mehrere Untersuchungen wurden zur Harmonisierung des Verkehrsflusses in Zusammenhang mit Unfalluntersuchungen durchgeführt. Es konnten sowohl zeitliche als auch räumliche Harmonisierungswirkungen von SBA festgestellt werden. Wenig untersucht sind die Wirkungen auf Kapazität bzw. Leistungsfähigkeit einer Strecke, obwohl schon die ersten Betrachtungen in den 70er und 80er Jahren Hinweise für eine positive Wirkung ergaben. Noch weniger Untersuchungen liegen zur Stabilisierungswirkung von SBA vor, obwohl frühere Forschungsarbeiten Hinweise für eine Stabilisierung des Verkehrsflusses liefern.

Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit besteht darin, die Auswirkungen von SBA auf den Verkehrsfluss im Bereich der Kapazitätsgrenze zu untersuchen, vorhandene Wirkungsmechanismen festzustellen und in einem Bewertungsverfahren aufzunehmen. Dazu werden Untersuchungen zur Kapazität und zur Leistungsfähigkeit von Strecken und zur Stabilität des Verkehrsflusses an Datensätzen von zahlreichen Autobahnabschnitten mit und ohne SBA durchgeführt.

## **2 STRECKENBEEINFLUSSUNGSANLAGEN**

### **2.1 Entwicklung und Bedeutung von Streckenbeeinflussungsanlagen in Deutschland**

#### **2.1.1 Entwicklungsgeschichte**

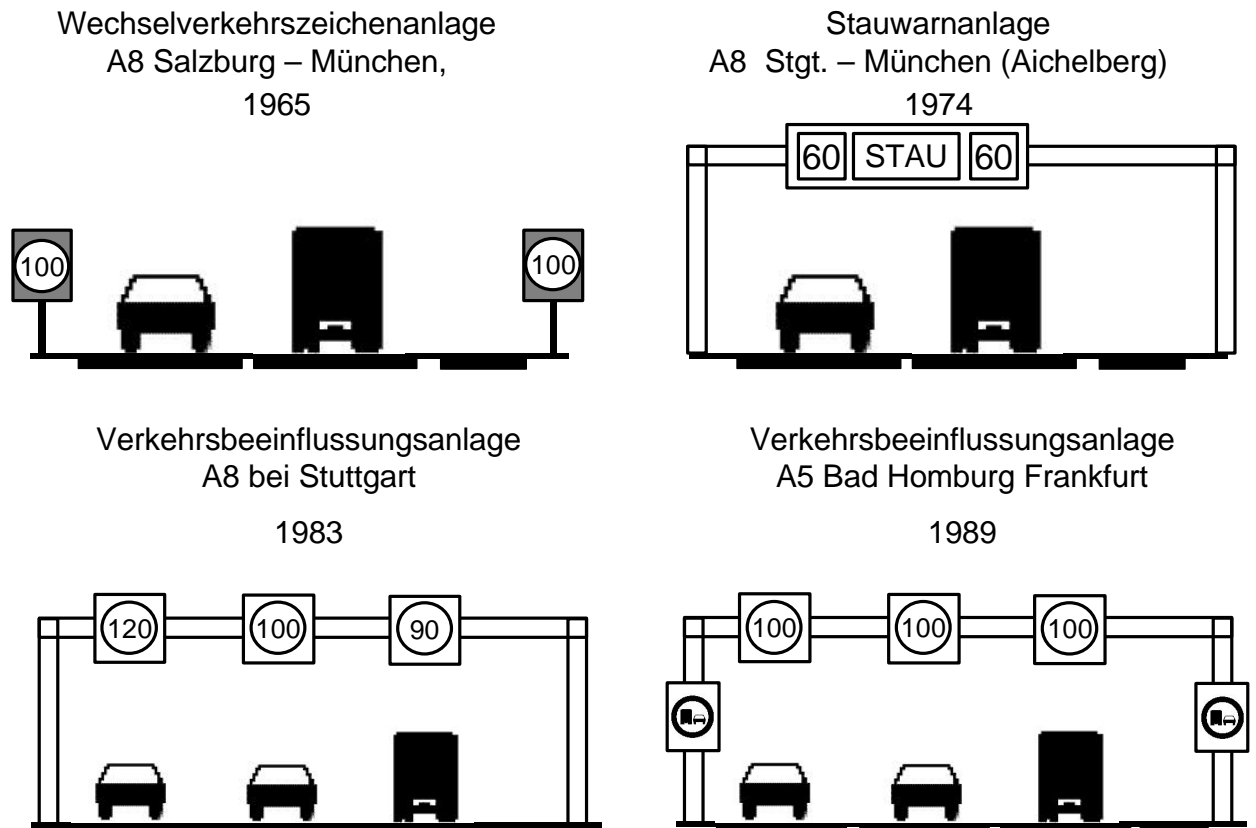
Die erste linienhafte Beeinflussung des Verkehrs erfolgte im Jahr 1965 durch die Errichtung einer Wechselverkehrszeichenanlage auf einem 30 km langen Abschnitt der A8 auf der Richtungsfahrbahn Salzburg – München. Die Anlage bestand aus neben der Fahrbahn angebrachten mechanischen Wechselverkehrszeichen im Abstand von 2 km, die StVO-gerechte Zeichen für die Geschwindigkeitsbegrenzungen 60, 80 und 100 km/h sowie „Gefahrstelle“ und „Unfall“ anzeigen konnten (Abb. 2-1). Diese Zeichen wurden vom Betreiberpersonal, das mittels Videotechnologie eine Übersicht über das Verkehrsgeschehen hatte, manuell geschaltet. Somit konnte erstmals auf einer Autobahn die Geschwindigkeit des Verkehrs beeinflusst sowie eine Unfallwarnung vorgenommen werden. Die ersten Erfahrungen und wissenschaftlichen Untersuchungen berichten von einer Abnahme der Störungen und Verkehrszusammenbrüche, einer Harmonisierung der Geschwindigkeitsverteilung sowie einer Steigerung der Leistungsfähigkeit (ZACKOR 1972, siehe auch Kapitel 3.2.2).

1970 wurde durch das Bundesministerium für Verkehr der erste Rahmenplan für eine Verkehrsbeeinflussung auf Autobahnen aufgestellt. Damit sollte auf kritischen, hochbelasteten Abschnitten eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit und eine größere Verkehrssicherheit erzielt werden. Ein Beispiel für eine in den 70er Jahren errichtete Anlage ist die Stauwarnanlage am Aichelberg zwischen Stuttgart und München (Abb. 2-1). Die bis zu achtprozentige Steigung des Aichelbergs stellte für den Fernverkehr ein erhebliches Hindernis dar, das zu häufigen Stauzuständen führte. Der dadurch entstandenen hohen Unfallträchtigkeit wurde mit der ersten elektronischen Stauwarnanlage Deutschlands mit 15 Anzeigequerschnitten begegnet.

In den 80er Jahren schritt die Entwicklung der nun „Verkehrsbeeinflussungsanlagen“ genannten Systeme voran. Eine sehr einfache Anlage wurde 1982 auf der A7 zwischen Hannover und Hamburg in beiden Fahrtrichtungen auf einer Länge von 30 km errichtet. Als Wechselverkehrszeichen wurden Prismenwender mit den drei Anzeigemöglichkeiten „80 km/h“, „100 km/h“ oder keine Anzeige im Abstand von 2 km nur auf dem Mittelstreifen, also nur links neben der Fahrbahn, errichtet. Die Steuerung erfolgte mit Hilfe der pro Fahrtrichtung nur an einer Induktionsschleife gemessenen Parameter Verkehrsstärke und Geschwindigkeit. Trotz dieses einfachen Systems wird von günstigen Auswirkungen auf den Verkehrsablauf, wie Steigerung der

Leistungsfähigkeit und Homogenisierung des Verkehrsflusses, berichtet (BODE und HALLER 1983).

Witterungsbedingungen wurden in einem Steuerungsmodell erstmals bei der Installation der Verkehrsbeeinflussungsanlage 1983 auf der A8 bei Stuttgart berücksichtigt. Hier wurde in beiden Richtungen auf einer Länge von 7 km eine moderne Anlage mit Schilderbrücken mit fahrstreifenbezogenen Wechselverkehrszeichen aufgebaut. Die Wechselverkehrszeichen konnten eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 60 bis 120 km/h in 10 km/h-Schritten anzeigen (Abb. 2-1).



**Abb. 2-1: wichtige Zwischenstufen in der Entwicklungsgeschichte der Anzeigesysteme von Streckenbeeinflussungsanlagen**

Die Datenerfassung war mit der Messung des Verkehrsflusses an 12 Doppel-Induktionsschleifen und den Umfeldbedingungen Fahrbahnnässe und Helligkeit für damalige Verhältnisse sehr umfangreich. Ein komplexes Steuerungsmodell ermöglichte eine fahrstreifenbezogene, automatische Steuerung der Anzeigequerschnitte. Auch hier ergab sich eine positive Entwicklung des Verkehrsflusses, ausgedrückt durch eine Reduzierung der Stauhäufigkeit und der Staudauer (ZACKOR UND SCHWENZER 1988).

### **Erste Streckenbeeinflussungsanlagen heutiger Bauart**

Anfang der 90er Jahre entstanden die ersten, damals „Linienbeeinflussungsanlagen“ genannten Systeme, die auch heute noch in Betrieb sind. Diese Anlagen besitzen ein umfangreiches System zur Erfassung des Verkehrs- und Umfeldzustands. Doppel-Induktionsschleifen erfassen fahrstreifenbezogen getrennt für Pkw und Lkw die Kenngrößen mittlere Geschwindigkeit und Verkehrsstärke in Minutenintervallen. Als umfeldbezogene Größen werden Fahrbahnnässe, Niederschlag und Sichtweite erfasst und als Anzeigeelemente stehen Wechselverkehrszeichen als Matrixzeichen in Glasfaseroptik zur Verfügung, die neben variablen Geschwindigkeitsbeschränkungen auch verkehrsrechtliche Anordnungen (insbesondere ein Lkw-Überholverbot) anzeigen können. Ein komplexer Steueralgorithmus entscheidet in Abhängigkeit der gemessenen Parameter über die Auswahl des Schaltprogramms.

Als erster Vertreter dieser Generation kann die Anlage auf der sechsstreifigen A5 Bad Homburg – Frankfurt gesehen werden, die 1989 in Betrieb ging. Diese Anlage besitzt die oben genannten Mess- und Anzeigeelemente an über 30 Querschnitten in beiden Fahrtrichtungen auf einer Länge von 15 km (Abb. 2-1). 1990 folgte der Bau einer SBA mit 16 Anzeigequerschnitten (AQ) auf einer Länge von ca. 20 km auf einer Richtungsfahrbahn der A3 Nürnberg – Fürth mit dem Ziel der Harmonisierung des Verkehrsflusses im Übergangsbereich von einem 3-streifigen auf einen 2-streifigen Streckenabschnitt. Eine weitere Anlage mit einer besonders großen Ausdehnung von über 30 km ist im Jahr 1992 auf der A9 München-Nürnberg in Betrieb gegangen.

Bis heute sind eine Vielzahl von Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) auf Bundesfernstraßen, vorwiegend auf Autobahnen und in wenigen Fällen auch auf zweibahnigen Bundesstraßen installiert worden. Im Jahr 2000 waren über 30 Streckenbeeinflussungsanlagen mit einer Beeinflussungslänge von etwa 800 km in Betrieb. Dazu wurden seit 1965 knapp 450 Mio. € in Verkehrsbeeinflussungsanlagen investiert (BMVBW 2001). Weitere 200 Mio. € sollen bis 2007 investiert werden (BMVBW 2002).

Eine Übersicht über Anzahl und Verteilung der Anlagen im Bundesgebiet gibt Abb. 2-2.



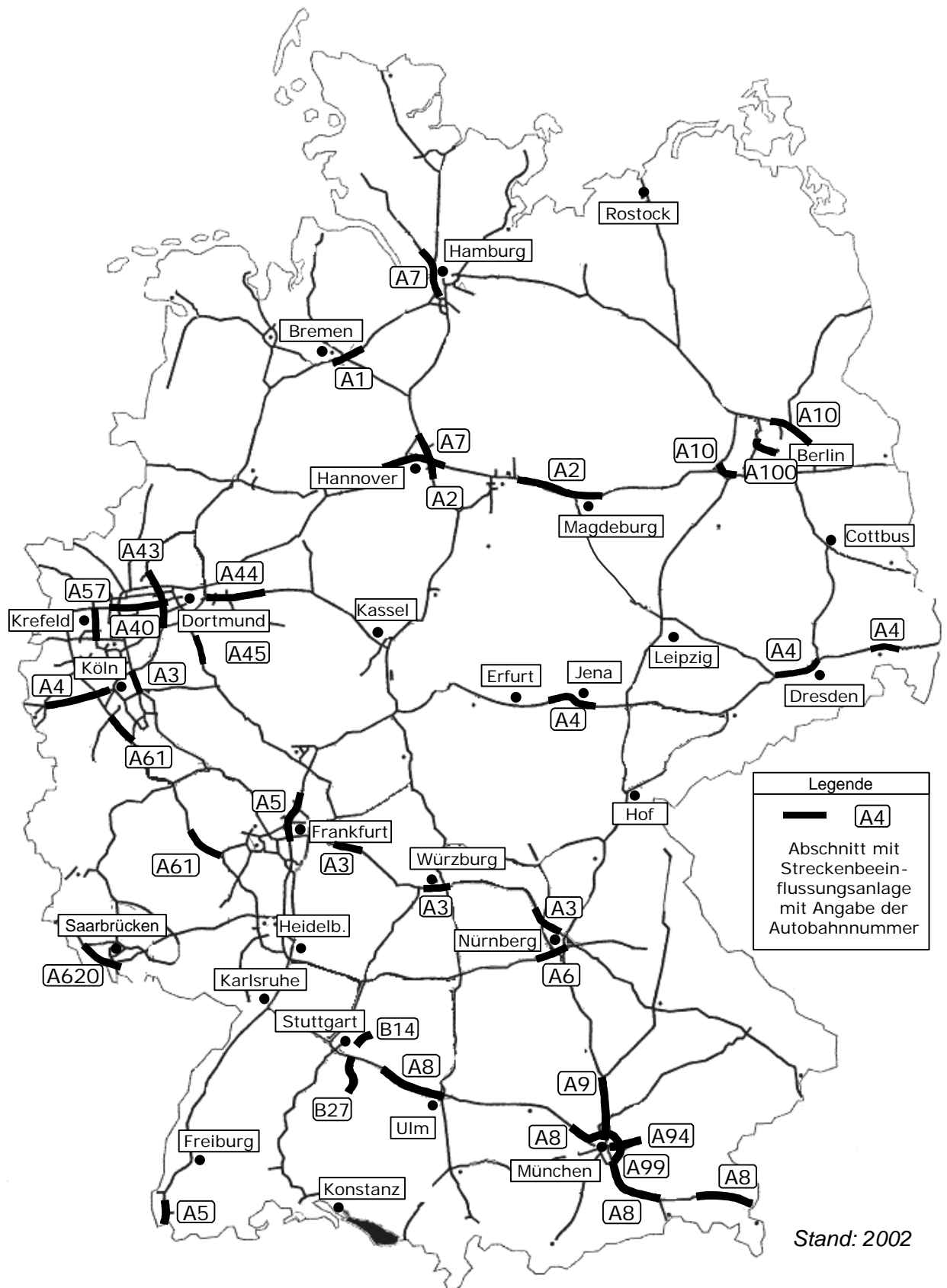


Abb. 2-2: Übersicht über vorhandene SBA auf den Bundesfernstraßen in Deutschland (eigene Darstellung, basierend auf KRAUSE 1995)

## 2.1.2 Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen

### Standardisierung

Mit zunehmender Verbreitung des Einsatzgebiets von SBA erfolgte eine Standardisierung von Aufbau und Betrieb zur Kostensenkung und um eine Einheitlichkeit für den Verkehrsteilnehmer zu schaffen. Diese Standardisierung geschah schrittweise und in Teilbereichen mit der fortschreitenden Entwicklung der Technologie.

Heute ist die prinzipielle Entwicklung bei SBA im wesentlichen abgeschlossen und zahlreiche SBA befinden sich im Dauerbetrieb. Aktuell gültig für Bau und Betrieb sind folgende vier Richtlinien des Bundesministeriums für Verkehr:

- Richtlinie für Wechselverkehrszeichenanlagen (RWVA), 1997  
Gibt die bautechnischen Grundsätze für die Errichtung einer SBA vor. Dies beinhaltet die grundlegenden Parameter für den Entwurf, wie z.B. Anordnung, Anzeigehalte und Abstand der Wechselverkehrszeichen, Grundsätze der Datenerfassung und Datenaggregation, sowie Randbedingungen für den Einsatz von SBA.
- Richtlinie für Wechselverkehrszeichen (RWVZ), 1997  
Beschreibt Größe, Anordnung und darstellbare Zeicheninhalte einer SBA. Weiterhin werden grundsätzliche Schaltprogramme vorgegeben (z.B. Geschwindigkeitstrichter, Aufheben einer Maßnahme).
- Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS), 1993  
Vereinheitlicht die Datenerfassung, Datenübertragung und Datenaufzeichnung, um eine Kommunikation zwischen Systemen verschiedener Hersteller zu ermöglichen. Bezieht sich auf alle Ausrüstungselemente der Verkehrserfassung, Umfelderkennung und straßenseitigen Einrichtungen (Wechselverkehrszeichen).
- Merkblatt für Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ), 1997  
Gibt Vorgaben zum technischen Aufbau der Steuerzentralen und der Schnittstellen mit dem Ziel, innerhalb einer Anlage Produkte verschiedener Hersteller betreiben zu können. Weiterhin werden Grundlagen zum Aufbau eines Steuerungssystems (Algorithmen) gegeben.

### Neue technologische Entwicklungen

Mit Inbetriebnahme der komplexen SBA in den 90er Jahren mit umfassenden Mess-, Anzeige- und Steuereinrichtungen haben SBA einen technologischen Reifegrad erreicht, der die Anforderungen an eine umfassende Beeinflussung des Verkehrs erfüllt. Bei den einzelnen Komponenten liegt das Hauptziel in der Entwicklung von zuverlässigeren und kostengünstigeren Bauteilen.

- Messtechnik

Die konventionellen Induktionsschleifen zur Messung des Verkehrsflusses sind teuer, wartungsintensiv und benötigen zum Einbau eine Sperrung des Fahrstreifens. Aus diesem Grund finden Überkopf-Detektoren mit einer Kombination aus Radar- und Ultraschallmesstechnologie zunehmende Verbreitung (z.B. SBA A8 Grabenstätt-Bundesgrenze, Inbetriebnahme im Jahr 2000). Fortschritte ergeben sich ebenso im Bereich der Umfeldmessungen (z.B. Glättemessung).

- Anzeigetechnik

Neben den bekannten faseroptischen Schildern kommen neuerdings Wechselverkehrszeichen mit LED-Technik zum Einsatz. Diese haben große Vorteile in besserer Lesbarkeit, bei gleichzeitiger niedrigerer Energieaufnahme und höherer Lebensdauer als die bisherigen Halogenleuchten.

- Steuerungstechnik / Software

Schnellere und leistungsfähigere Computer ermöglichen komplexere Steueralgorithmen, die nicht nur auf aktuell gemessene Kenngrößen wie Verkehrsstärke, -dichte und Geschwindigkeit basieren, sondern durch eine umfassende Analyse des Verkehrsflusses kritische Verkehrszustände bereits im Entstehen erkennen und vor dem Eintreten der Störung eine Anzeige schalten (z.B. präventive Schaltungen, Fuzzy-Logik).

Neben dieser technologischen Weiterentwicklung findet auch eine Weiterentwicklung bei den Einsatzgebieten statt, die nun auch hochbelastete Bundesstraßen in Ballungsräumen umfassen. Weiterhin wurde bei einigen neuen SBA der Funktionsumfang um temporäre Standstreifenfreigabe und Zuflussregulierung erweitert (A99 Münchner Ring, A94 Bereich München-Messe, A40 Ruhrschnellweg). Ein ganz neues Einsatzgebiet findet sich bei einer Anlage in Österreich in der Lärminderung (Kapitel 2.2).

### **Zukünftige Bedeutung von SBA**

Aufgrund der positiven Erfahrungen bei der Verbesserung des Verkehrsablaufs und der Verkehrssicherheit einer Strecke ist in den nächsten Jahren ein deutliches Ausweiten des beeinflussten Streckennetzes auf Bundesfernstraßen geplant. Das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen plant die Investition von 200 Mio. € in den Jahren 2002 bis 2007 für Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen (BMVBW 2002).

## 2.2 Internationale Entwicklungen

Um den Entwicklungsstand der in Deutschland installierten SBA zu beurteilen und ausländische Erfahrungen einfließen zu lassen, soll an dieser Stelle eine kurze Übersicht über ausgewählte internationale Entwicklungen gegeben werden. Dabei sollen nur die Systeme betrachtet werden, die ähnlich den deutschen SBA verkehrsrechtliche Anordnungen mittels Wechselverkehrszeichen erlassen, und nicht die häufig anzutreffenden Systeme, die mittels Wechseltextanzeigen z.B. Umleitungsempfehlungen für die Verkehrsteilnehmer geben.

### Österreich

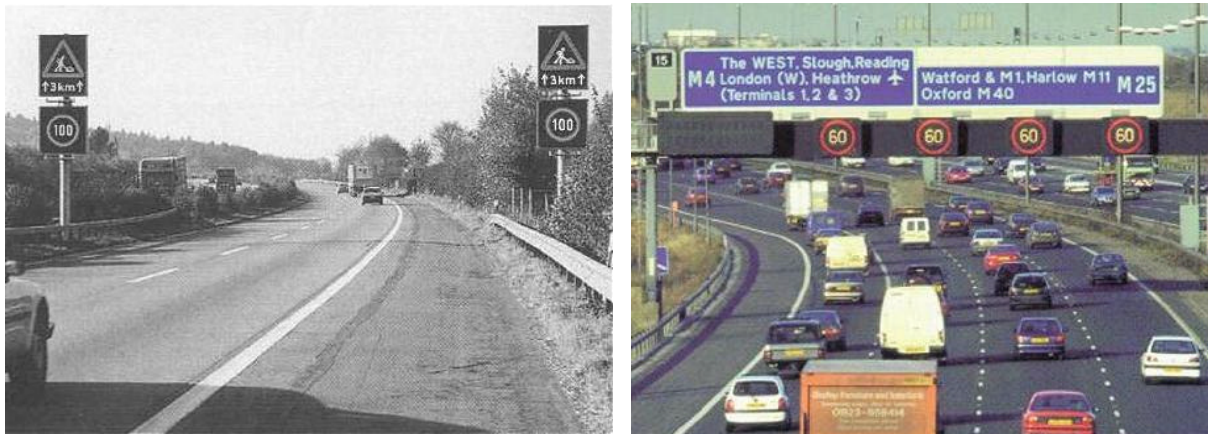
Neben der geplanten Ausrüstung der Inntal- und Brennerautobahn mit einer SBA und einer bestehenden SBA an der A2 Südbahn ist als Besonderheit das Projekt „Immissionsgesteuerte Verkehrsbeeinflussungsanlage“ zu erwähnen (TIEFENTHALER und BRUNNER 2000). In diesem Pilotprojekt werden variable Geschwindigkeitsbegrenzungen erlassen, um über die Geschwindigkeitsreduktion eine Reduktion der Lärmemissionen zu bewirken. Die Lärmsituation wird aus gemessenen Verkehrsdaten berechnet und nach Bedarf werden Geschwindigkeitsbegrenzungen, getrennt für Pkw (80 oder 100 km/h) und Lkw (60 oder 80 km/h), erlassen.

### Schweiz

Auf der N1 bei Bern wurde 1996 ein Verkehrsbeeinflussungssystem installiert. Diese Anlage ist im Hinblick auf Funktionsweise und Anzeigehalte beinahe identisch mit einer deutschen SBA (Abb. 2-3). Als Besonderheit kommt eine Methode der streckenbezogenen Verkehrsdatenerfassung zur Anwendung, die einzelne Fahrzeuge in ihrem Fahrtverlauf über mehrere Querschnitte wiedererkennt und damit sehr genau Reisezeiten ermitteln kann.

### Großbritannien

Als Versuchsanlage wurde 1996 ein 23 km langer Abschnitt auf der Motorway M25 (Londoner Ringautobahn) mit 26 Anzeigequerschnitten in Betrieb genommen. Die Wechselverkehrszeichen können eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 40, 50 oder 60 mph (entsprechend 64, 80 oder 96 km/h) anzeigen (Abb. 2-3). Eine Untersuchung der Wirkungen auf den Verkehrsablauf ergab, dass keine Steigerung der maximalen Verkehrsstärke festgestellt werden konnte, jedoch eine deutlich gleichmäßigere Verteilung des Verkehrs auf den Fahrstreifen.



**Abb. 2-3:** Linkes Bild: Streckenbeeinflussungssystem auf der N1 in der Schweiz  
 Rechtes Bild: SBA auf dem Motorway M25 in Großbritannien („*controlled motorway*“). (KELLER 2002)

### Niederlande

In den Niederlanden wurden, ähnlich zu den Aktivitäten in Deutschland, SBA errichtet, um eine Senkung von Unfallraten, eine Steigerung der Kapazität und eine Harmonisierung des Verkehrsflusses zu bewirken. Dabei wird die standardmäßig angezeigte Geschwindigkeit von 120 km/h in Abhängigkeit der Verkehrsdichte auf 90 oder 70 km/h, bei einem Unfall auf 50 km/h, reduziert.

Untersuchungen ergaben geringe Steigerungen der max. Verkehrsstärke (1-2%), einen deutlich gleichmäßigeren Verkehrsfluss und eine Verbesserung der Stabilität des Verkehrsflusses (Abnahme der Instabilitäten um ca. 50%) (HOOGEDORN 1999).

### Nicht-europäisches Ausland

Dem Autor sind einzelne Einsatzgebiete von SBA-ähnlichen Systemen in Australien, Japan und den USA bekannt. In Australien wurde zur Olympiade 2000 ein Verkehrskontrollzentrum in Betrieb genommen, das unter anderem auf einigen Strecken mit mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen Wechselverkehrszeichen mit variablen Geschwindigkeitsbegrenzungen steuert. In Japan existieren derartige WVZ auch im Innerortsbereich. In den USA gibt es zahlreiche Aktivitäten zum Verkehrsmanagement auf Highways, die auf Wechseltextanzeigen (Variable Message Signs) basieren. Die Textinhalte dieser VMS können allerdings zu den deutschen Wechselverkehrszeichen vergleichbare Funktionen erfüllen. So können z.B. Fahrstreifenzuweisungen („left lane closed“), Gefahren- und Unfallwarnungen („prepare to stop“, „accident 2 miles“, „reduce speed“) und gefährliche Umfeldbedingungen „road flooded“, „blowing snow“) angezeigt werden (DEPARTMENT OF TRANSPORTATION OF NORTH CAROLINA 1999).

## 2.3 Aufbau und Wirkungsweise von Streckenbeeinflussungsanlagen

### 2.3.1 Anordnung verkehrlicher Gebote / Wechselverkehrszeichen

Die Hauptziele bei der Installation von SBA sind, wie bereits erwähnt, die Erhöhung der Verkehrssicherheit und die Reduktion von Verkehrsstörungen. Als Mittel zur Erreichung dieser Ziele stehen

- verkehrsrechtliche Anordnungen nach StVO und
- die Warnung vor Gefahren

zur Verfügung. Die verkehrsrechtlichen Anordnungen lassen sich in Geschwindigkeitsbegrenzungen und Überholverbote unterscheiden.

Da die ersten SBA technologiebedingt nur sehr wenige Verkehrszeichen anzeigen konnten (z.B. bei Prismenwendern nur drei, bei Rollo-Technologie fünf) und weil die Haupteffekte im Erlass von Geschwindigkeitsbegrenzungen vermutet wurden, wurde schon bei den ersten Anlagen die auch heute noch übliche Staffelung der Anzeige in 20 km/h Schritten (also z.B. 60 / 80 / 100 km/h) verwendet. Obwohl heute durch die Punktmatrix-Technologie eine feinere Staffelung der Geschwindigkeiten möglich wäre, wird darauf verzichtet, da die Akzeptanz durch die Verkehrsteilnehmer berücksichtigt werden muss und eine feinere Staffelung eher zu einer Überforderung der Verkehrsteilnehmer führen könnte (ZACKOR UND SCHWENZER 1988).

Dass der Erlass von Geschwindigkeitsbeschränkungen eine positive Wirkung auf die maximale Verkehrsstärke einer Strecke ausübt, wurde schon früh in empirischen Untersuchungen (ZACKOR 1972) festgestellt, aber auch aus theoretischen Überlegungen hergeleitet (KÜHNE 1984). CREMER (1979) gibt an, dass die maximale Verkehrsstärke bei einer Begrenzung auf 80 km/h zu erreichen ist. Begründet wird dies mit einer Angleichung im Geschwindigkeitsverhalten und damit verbunden mit einer Angleichung im Abstandsverhalten – einer kritischen Größe für Störungen im Verkehrsablauf.

Mit dem Aufkommen von Schilderbrücken und den nun fahrstreifenbezogenen Wechselverkehrszeichen entstand der Gedanke einer Staffelung der Geschwindigkeit über die Fahrstreifen hinweg. Dies wurde erstmals bei der Anlage der A8 bei Stuttgart untersucht (ZACKOR UND SCHWENZER 1988). Bei dieser Anlage konnte am rechten Fahrstreifen eine geringere Geschwindigkeit als auf dem mittleren bzw. linken Fahrstreifen angezeigt werden. Schon nach kurzer Zeit zeigten sich allerdings negative Effekte wie die Zunahme der Spurwechselhäufigkeit und ein ungleichmäßigeres Geschwindigkeitsniveau. Heute wird von einer auf den verschiedenen Fahrstreifen unterschiedlichen Geschwindigkeitsbeschränkung abgesehen. Sie ist in den Richtlinien im Regelfall untersagt.

Neben den Geschwindigkeitsbeschränkungen erfolgte als weitere verkehrsrechtliche Anordnung der Erlass von Lkw-Überholverböten. Auch hier wurden schon früh positive Effekte wie die Erhöhung der Kapazität der dann nicht mehr vom Lkw-Verkehr benutzten Fahrstreifen vermutet, jedoch in geringerem Ausmaß als bei den Geschwindigkeitsbegrenzungen. Da das Lkw-Überholverbot in der Regel zusätzlich zu der Geschwindigkeitsbeschränkung angezeigt wird, wurde ein zusätzliches Wechselverkehrszeichen notwendig.

Speziell für die Erhöhung der Verkehrssicherheit wurde die Palette der anzeigbaren Warn- und Hinweistafeln stetig erweitert. Während die erste Anlage nur das Zeichen „Gefahrstelle“ mit dem Zusatz „Unfall“ anzeigen konnte, ist heute eine breite Palette mit der Warnung vor gefährlichen Fahrbahnbedingungen (Schleudergefahr, Glätte), Sichtbedingungen (Nebel) und Verkehrszuständen (Stau oder Staugefahr, Unfallwarnung, Baustellenwarnung, allgemeine Gefahrenwarnung) vorgeschrieben. Aus wirtschaftlichen Gründen wird diese Palette zusammen mit dem Überholverbot mit nur einem Wechselverkehrszeichen und einem textlichen Zusatzzeichen angezeigt.

Aus diesen Anforderungen ergab sich der in Abb. 2-4 veranschaulichte prinzipielle Aufbau einer SBA gemäß den aktuellen Richtlinien RWVA (1997) und RWVZ (1997). Dargestellt sind die drei Gruppen von Wechselverkehrszeichen und deren Anordnung an einem dreistreifigen Regelquerschnitt. In Abb. 2-5 ist dies mit einem Bild einer im Betrieb befindlichen SBA dieses Typs veranschaulicht.

Durch eine Änderung von §39 der StVO erlangten auch die glasfaseroptischen Zeichen mit weißer Schrift auf schwarzem Grund die Verbindlichkeit und sind damit bußgeldbewehrt. Bußgelder erlangen ihre Bedeutung erst im Zusammenhang mit ihrer Überwachung. Hierzu sind an einigen Stellen ortsfeste Überwachungsgeräte durch die Polizei eingerichtet worden, teilweise wird auch mobil überwacht. Insgesamt gestaltet sich die Überwachung aber wesentlich schwieriger als bei statischen Verkehrsanordnungen und tritt dementsprechend seltener auf.

Die Hauptwirkung der Anordnung der verkehrlichen Gebote sollte aber durch eine Einsichtigkeit, also einer Akzeptanz beim Verkehrsteilnehmer, erfolgen. Ein wichtiges Ziel bei der Parametrierung von SBA besteht demnach darin, unnötig restriktive Anzeigen zu vermeiden.

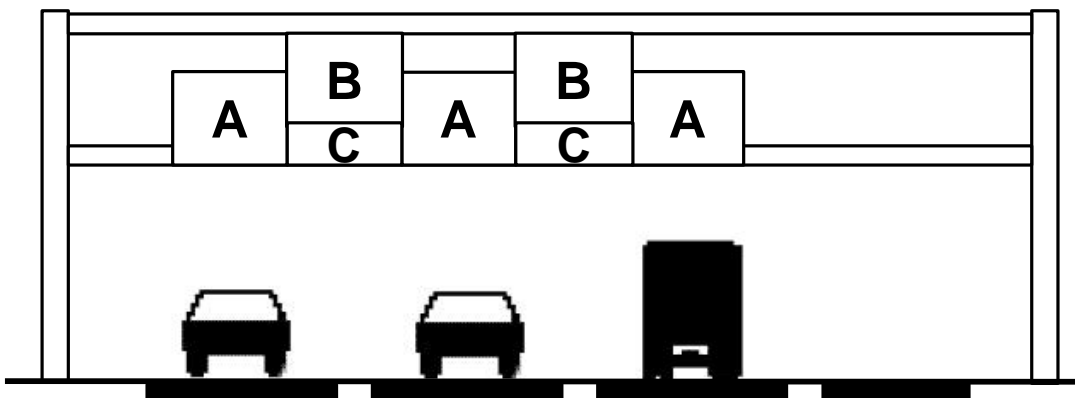
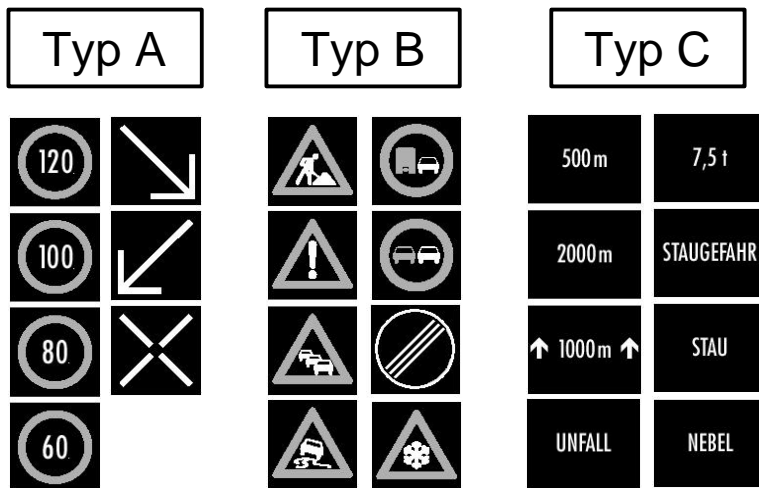


Abb. 2-4: Anordnung und darstellbare Wechselverkehrszeichen an dreistreifigen Autobahnen (eigene Darstellung nach RWVA bzw. RWVZ)

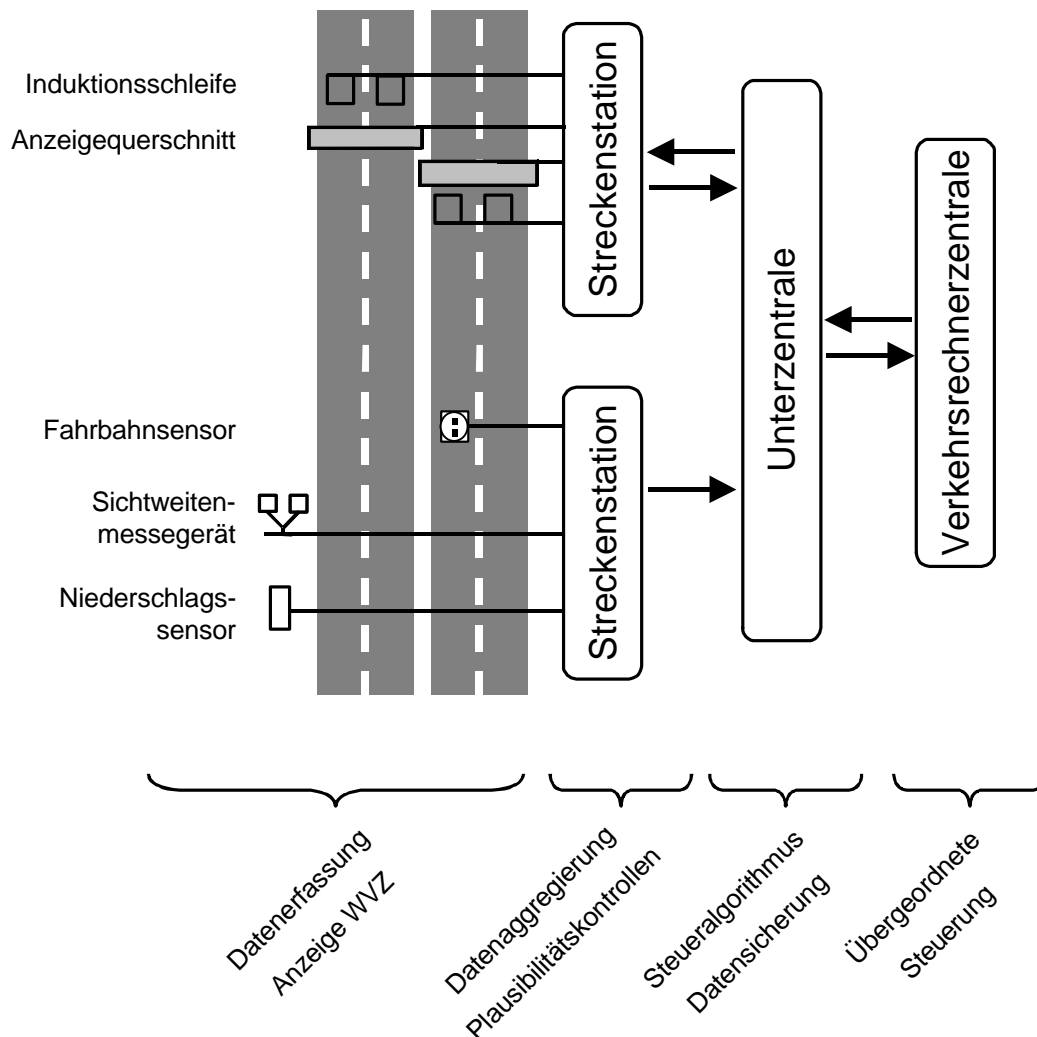


Abb. 2-5: Beispiel für eine moderne SBA in Deutschland (A8 Ost / Brunnthal – Bad Aibling, Fahrtrichtung München, kurz vor dem Irschenberg, Juli 2001)



### 2.3.2 Verkehrs- und Umfeldmessungen

Zur Auswahl der Schaltprogramme ist die Ermittlung von Kenngrößen des Verkehrsflusses und der Umfeldbedingungen notwendig. Je nach Bedeutung für den Steueralgorithmus und in Abhängigkeit der technologischen Möglichkeiten werden die einzelnen Werte mit unterschiedlicher Genauigkeit gemessen. Zur Reduktion der Datenmengen wird an der Messstelle gleich nach der Datenerfassung eine Datenaggregation vorgenommen. In der Regel werden die einzelnen Messwerte bereits auf der untersten Ebene in Minutenintervalle aggregiert. Anschließend erfolgt die Datenübertragung in einem hierarchischen System mit einer Kombination von baum- und busförmigem Netzwerk (Abb. 2-6).



**Abb. 2-6: Aufbau des Datenerfassungs- und -übertragungssystem bei Streckenbeeinflussungsanlagen (eigene Darstellung nach MARZ und RWVA)**

Die Erfassung der Verkehrskenngrößen (i.d.R. mittels Doppel-Induktionsschleifen) müssen den Verkehrsfluss mit einer in den „Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen“ (TLS) geforderten Genauigkeit erfassen. Dabei wird mittels Längenmessung eine Klassifizierung der Fahrzeuge in sechs Gruppen vorgenommen. Diese werden anschließend in die im Regelfall ausreichende Unterscheidung in die

zwei Fahrzeuggruppen „Pkw-ähnliche“- bzw. „Lkw-ähnliche“-Fahrzeuge zusammengefasst.

Für die Messung der Geschwindigkeit der Fahrzeuge ist eine Genauigkeit von  $< 3\%$  bei  $v > 100$  km/h und  $< 3$  km/h für  $v < 100$  km/h sowie für die Verkehrsstärken eine Genauigkeit im Minutenintervall von  $< 10\%$  für  $q_{\text{Kfz}} > 10$  Kfz/min und  $< 20\%$  für  $q_{\text{Kfz}} < 10$  Kfz/min vorgeschrieben (für das Stundenintervall gilt eine Abweichung von  $< 3\%$ ). Zusätzlich sind noch weitere statistische Tests zur Prüfung der Erfassungsgenauigkeit durchzuführen.

Für die Genauigkeit der Umfeldmessungen werden in den Richtlinien keine Grenzwerte angegeben. Während die Bestimmung der Helligkeit noch einfach und genau möglich ist, gestaltet sich die Erfassung von Sichtweite, Niederschlag und Glätte als schwierig. Die Gründe sind vielseitig wie z.B. Verschmutzung, Sondereinflüsse oder auch falsche Justierung sowie mangelhafte Wartung der Geräte. In Abhängigkeit des gewählten Systems und des Herstellers können sich deutliche Ungenauigkeiten ergeben. Eine gewisse Zuverlässigkeit wird dennoch durch die Mittelwertbildung der Messwerte aus mehreren Messstellen erreicht.

In der Praxis dürften aufgrund Plausibilitätskontrollen und robuster Steueralgorithmen bei neuen und gut gewarteten Anlagen die aus Fehldetektionen resultierenden Fehlschaltungen selten auftreten (MANGOLD et. al. 1996).

### 2.3.3 Steueralgorithmen

Die Steuerung der Anlagen erfolgt nach den Gesetzmäßigkeiten der Regelungstechnik. Die Wechselwirkung zwischen der SBA und dem Verkehrsteilnehmer kann als Regelkreis beschrieben werden:

- 1) Erfassung des Verkehrs (Ist-Zustand)
- 2) Verarbeitung der Daten und Auswahl des Schaltprogramms (Soll-Zustand)
- 3) Einwirken auf die Verkehrsteilnehmer mittels Anzeigen (Regler)

Dabei sind die Einwirkungsmöglichkeiten des Reglers beschränkt, da er nicht direkt, sondern nur über die Reaktion der Verkehrsteilnehmer auf die Elemente (Fahrzeuge) des Verkehrsstroms einwirken kann. Entscheidend dafür ist der Befolgungsgrad, der mit dem Anteil der Verkehrsteilnehmer, der ein bestimmtes Gebot befolgt, beschrieben werden kann. Natürlich kann von den Verkehrsteilnehmern z.B. bei der Beachtung der Geschwindigkeitsbeschränkung keine punktgenaue Befolgung erwartet werden. Einige Anzeigen des Typ-B-Wechselverkehrszeichens, wie z.B. „Schleudergefahr“ oder „Stauwarnung“, erfordern keine genau definierte Fahrweise, so dass dafür der Befolgungsgrad schwer zu bestimmen ist. Insgesamt sollte eine SBA ihre Wirkung nicht nur durch die Verbindlichkeit der Anzeigen nach StVO, son-

dern durch Sinnhaftigkeit der Anzeigen und mit einer damit verbundenen hohen Akzeptanz erreichen.

Weitere Probleme des Regelns entstehen durch die eingeschränkten Anzeigemöglichkeiten und die Abstände zwischen den Anzeigequerschnitten. Auf die Geschwindigkeiten kann nur in diskreten Werten, also Geschwindigkeitsbeschränkung in 20 km/h–Stufen und Überholverbot ja oder nein, eingewirkt werden. Bei größeren Abständen der Anzeigequerschnitte ist mit einem Vergessen des Anzeigehalts zu rechnen.

Neben diesen Problemen, den Verkehrsfluss in gewünschter Weise zu beeinflussen, gibt es auch Schwierigkeiten in der Bestimmung des Verkehrsflusses und der Auswahl des richtigen Schaltprogramms. Der Verkehrsfluss kann an einer Messstelle zwar sehr exakt bestimmt werden, aber diese Messstellen befinden sich in einem Abstand von in der Regel 1,5 bis 2 km. Aufgrund der stochastischen Eigenschaften des Verkehrsablaufs ist außerdem die Betrachtung eines gewissen Zeitraums nötig, um eine sichere Aussage über den Zustand des Verkehrsflusses treffen zu können.

### Steueralgorithmen nach MARZ

Das Merkblatt zur Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ) beschreibt, wie das System des Regelkreises an SBA an Bundesfernstraßen auszusehen hat. Dazu werden die Grundlagen für die Messwerterfassung und für die Steuerungsalgorithmen vorgegeben, die im Einzelfall an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden können. Die wichtigsten Zusammenhänge werden im folgenden kurz dargestellt und analysiert.

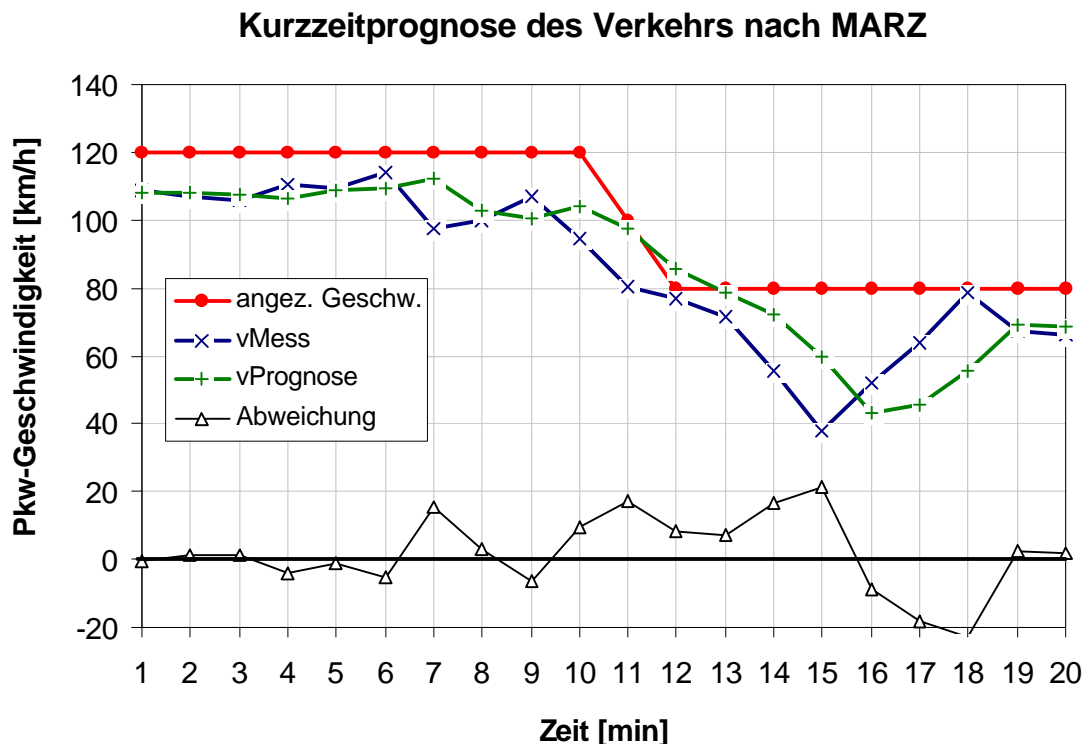
Die Grundlage für die Steuerlogik bildet die *Bemessungsverkehrsstärke*  $q_B$ . Diese wird aus den Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten für Pkw und Lkw ( $q_{Pkw}$ ,  $q_{Lkw}$ ,  $v_{Pkw}$ ,  $v_{Lkw}$ ) nach folgender Formel gebildet, bei der der übliche Faktor zwei bei der Umrechnung der Lkw-Verkehrsstärken in Pkw-Einheiten durch einen geschwindigkeitsabhängigen Parameter erweitert wird:

$$q_B = q_{Pkw} + (2,0 + 0,01 * (v_{Lkw} - v_{Pkw})) * q_{Lkw} \quad [v \text{ in km/h, } q \text{ in Kfz/h}]$$

Als Zeitintervall wird in der Regel das Minuten-Intervall verwendet. Zur besseren Anschaulichkeit wird der Wert allerdings mit 60 multipliziert, womit die Einheit Pkw-Einheiten/Stunde entsteht. Die Auswahl des Schaltprogramms basiert auf die Werte, die die Kurzzeitprognose für den Verkehrsfluss im nächsten Minutenintervall vorhersagt. Diese Kurzzeitprognose besteht aus dem Prognosemodell „Gleitender Mittelwert mit überlagertem Trend“. Dieses Prognosemodell basiert ausschließlich auf die Extrapolation aus Messwerten der vorausgegangenen Minutenintervalle und der Entwicklung der Differenz. Damit gelingt es, dem tatsächlichen Verlauf bei einer

gleichmäßigen Verkehrsentwicklung gerecht zu werden, abrupte Ereignisse werden aber erst mit Zeitverzögerung erkannt. In diesen Fällen wird möglicherweise das passende Schaltprogramm zu spät geschaltet.

In Abb. 2-7 ist dies beispielhaft für einen 20-Minuten-Zeitraum anhand eigener Messdaten untersucht (Daten des Messquerschnitts B23 der SBA A8 Brunenthal – Bad Aibling, nähere Angaben zur Datenbasis siehe Kapitel 4). In der Abbildung erkennt man, wie von Minute 7 bis Minute 15 ein Geschwindigkeitseinbruch auftritt. Die prognostizierte Geschwindigkeit ( $v_{\text{prognose}}$ ) folgt der tatsächlichen Geschwindigkeit ( $v_{\text{Mess}}$ ) etwas verzögert. Es entsteht eine Differenz ( $v_{\text{Abweichung}}$ ) zwischen der prognostizierten und der tatsächlichen Geschwindigkeit. Der abrupte Einbruch kann nicht rechtzeitig genug erkannt werden und die Geschwindigkeitsbeschränkung wird etwas zu spät erlassen. Dies ist ein Grund dafür, warum die angezeigte Geschwindigkeit und der reale Verkehrsfluss differieren können.



**Abb. 2-7: Eigene Untersuchung zur Qualität der Kurzzeitprognose gemäß der Richtlinienvorgabe (Betrachtung eines 20-Minuten-Zeitraums am Messquerschnitt B23 der SBA A8 Brunenthal-Bad Aibling)**

Aus diesem Grund gibt es Bestrebungen, den Algorithmus zur Kurzzeitprognose zu verbessern, um Verkehrsstörungen früher zu erkennen. Hierzu werden Verfahren zur abschnittsbezogenen Störfallerkennung entwickelt und an manchen SBA bereits eingesetzt (HOOPS et. al. 2000). Weitergehende Entwicklungen versuchen, das passende Schaltprogramm schon im Entstehen oder noch besser vor Entstehung einer Verkehrsstörung zu erlassen. Diese *präventiven Schaltungen* sind Gegenstand der aktuellen Forschung (STEINHOFF et. al. 2002).

## Schaltprogramme

Innerhalb des Systems werden ein oder mehrere Messquerschnitte einem Anzeigequerschnitt zugewiesen. Gemäß den Bestimmungen der RWVZ wird ein Längsabgleich (z.B. Geschwindigkeitstrichter) durchgeführt.

Als übliche Schaltprogramme werden eingesetzt:

- Harmonisierungsprogramm

Wählt aus Bemessungsverkehrsstärke der Richtungsfahrbahn, Pkw-Geschwindigkeit und Verkehrsdichte (Erfüllung einer oder mehrerer Bedingungen) eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 60 bis 120 km/h aus (Tabelle 2-1):

Geschaltete Geschw. Typ-A-WVZ	$Q_B$	$V_{\text{pkw,Progn.}}$	$K_{\text{Kfz}}$
120	$\geq 4000$ Pkw-E/h	-	-
100	$\geq 4800$ Pkw-E/h	-	-
80	$\geq 5400$ Pkw-E/h	$\leq 70$ km/h	$\geq 50$ Kfz/km
60	-	$\leq 50$ km/h	$\geq 50$ Kfz/km

**Tabelle 2-1: Einschaltbedingungen für Harmonisierung der Geschwindigkeit bei dreistreifigen Fahrbahnen (MARZ)**

Zur Vermeidung eines zu häufigen Änderns der Anzeigen werden die Einschaltkriterien höher gesetzt als die Ausschaltkriterien.

- Lkw-Überholverbot

Ein Lkw-Überholverbot für Lkw  $\geq 7,5$  t wird erlassen oberhalb bestimmter Verkehrsstärken und Lkw-Anteile.

- Nässewarnung

Schaltet zulässige Höchstgeschwindigkeit und Schleudergefahr bei Detektion bestimmter Nässestufen in einem oder mehrerer Niederschlagssensoren. Oberhalb eines bestimmten Lkw-Anteils wird im Typ-B-WVZ statt „Schleudergefahr“ das Zeichen „Lkw-Überholverbot“ angezeigt.

- Nebelwarnung

Zeigt eine Höchstgeschwindigkeit zusammen mit Gefahr und Textzusatz „Nebel“ bei Unterschreitung bestimmter Sichtweitenstufen an.

Weiterhin gibt es noch das Stauprogramm sowie mehrere Sonderprogramme, die manuell vom Betreiberpersonal an der Bedienstation eingegeben werden, wie z.B. Baustellenprogramme, Glättewarnung oder die Warnung vor Unfällen.

### 3 STAND DER WISSENSCHAFT

#### 3.1 Grundlagen des Verkehrsablaufs

##### 3.1.1 Begriffe und Definitionen

In der allgemeinen Form wird die Ortsveränderung von Personen, Gütern oder Nachrichten als *Verkehr* definiert. Die dazu notwendigen Bewegungsvorgänge (Beschleunigen, Fahren, Bremsen etc.) werden als *Verkehrsablauf* bezeichnet. Im Bereich des Straßenverkehrs können die einzelnen Verkehrsteilnehmer ihren Verkehrsablauf teilweise selbst bestimmen, aber in gewissem Maße müssen sie auf andere Verkehrsteilnehmer und Umfeldbedingungen Rücksicht nehmen. Diese Interaktion zwischen mehreren Fahrzeugen ergibt den *Verkehrsfluss*.

Der Verkehrsfluss kann mikroskopisch (also Kenngrößen für einzelne Fahrzeuge) oder makroskopisch (über einen Zeitraum gemittelte Größen) betrachtet werden.

Diese wichtigsten Kenngrößen zur makroskopischen Beschreibung sind

- Verkehrsstärke  $q$  (Fahrzeuge / Zeit)
- Verkehrsdichte  $k$  (Fahrzeuge / Weg)
- Geschwindigkeit  $v$  (gemittelt über alle Fahrzeuge)

Da Verkehrsfluss ein räumlich-zeitliches Ereignis ist, ergeben sich zwei Möglichkeiten der Betrachtung, nämlich

- die Betrachtung über einen Zeitraum von einem festen Ort aus (*lokal*)
- die Betrachtung über eine Strecke zu einem festen Zeitpunkt (*momentan*)

Bei der *lokalen Messung* werden alle Fahrzeuge erfasst, die innerhalb einer bestimmten Zeit (Messintervall) einen ortsfesten Querschnitt passieren. Dieses Messverfahren lässt sich leicht realisieren, indem an dem ortsfesten Punkt die Zeit gemessen wird, die die Fahrzeuge für das Durchfahren einer sehr kurzen Messstrecke benötigen. Man spricht dann vom *quasi-lokalen* Messverfahren. Bei der *momentanen Messung* werden die Fahrzeuge erfasst, die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt innerhalb einer Messstrecke befinden. Dieses Messverfahren ist technisch schwer zu realisieren, da die gleichzeitige Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung vieler Fahrzeuge notwendig ist.

Mit der lokalen Messung lassen sich die Größen  $q$  und  $v_{lok}$ , mit der momentanen Messung die Größen  $k$  und  $v_{mom}$  messen. Mittels der *Kontinuitätsgleichung* besteht bei stationären Verhältnissen der Zusammenhang (die *Fundamentalbeziehung*)

$$q = k \cdot v_{mom}$$

$q$  ... Verkehrsstärke [Fahrzeuge/Zeit]  
 $k$  ... Verkehrsdichte [Fahrzeuge/Weg]  
 $v_{mom}$  ... mittlere, momentane Geschwindigkeit [km/h]

Mittels des harmonischen Mittelwerts lässt sich die momentane Geschwindigkeit aus der lokalen Geschwindigkeit berechnen:

$$\bar{v}_{mom} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{v_{lok}(i)}} \quad \begin{array}{l} N \dots \text{gesamte Anzahl gemessener Fahrzeuge} \\ I \dots \text{Anzahl Fahrzeuge mit } v_{lok} \end{array}$$

Mit diesen Zusammenhängen lassen sich aus der lokalen Messung alle drei makroskopischen Kenngrößen des Verkehrsablaufs ermitteln. Daher werden in der Praxis nahezu ausschließlich lokale Messwerterfassungen durchgeführt. Dazu kommen nach TLS genormte Doppel-Induktionsschleifen oder Überkopfsensoren zum Einsatz (Kapitel 2.3.2).

Einen wichtigen Einfluss auf den Verkehrsfluss üben wegen ihres größeren Platzbedarfs, der geringeren Geschwindigkeit und Beschleunigungs- und Verzögerungsmöglichkeiten die Lastkraftwagen aus. Je nach Zweck (z.B. zur Steuerfestsetzung, für statistische Zwecke oder für die StVO) gibt es unterschiedliche Definitionen für die Abgrenzung Pkw – Lkw. Für Untersuchungen zum Verkehrsablauf spielen die fahrdynamischen Unterschiede eine Rolle und die Klassifizierung erfolgt anhand des zulässigen Gesamtgewichts (daher auch Schwerverkehr genannt). Die Grenze liegt bei 3,5 t. Als Kenngröße wird der *Lkw-Anteil*  $p$  wie folgt definiert:

$$p = \frac{n_{Lkw}}{n_{Pkw} + n_{Lkw}} \quad \begin{array}{l} n \dots \text{Anzahl Fahrzeuge} \\ p \dots \text{Lkw-Anteil [\%]} \end{array}$$

### Kapazität und Leistungsfähigkeit

In der Verkehrswissenschaft kam es in den letzten Jahren im deutschen Sprachgebrauch zu einer Diskussion über die Verwendung der Begriffe *Kapazität* und *Leistungsfähigkeit*. Ein Grund dafür war die deutsche Wiedervereinigung und die damit verbundene Harmonisierung der Begriffe in Ost und West. Im Jahr 2000 kam es durch die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen zu einer Neuauflage der Begriffsbestimmungen mit folgenden Definitionen (FGSV 2000):

- Kapazität: [Fahrzeuge / Zeit]

„Größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom bei gegebenen Weg- und Verkehrsbedingungen an dem für ihn bestimmten Querschnitt erreichen kann“.

- Leistungsfähigkeit: [Fahrzeuge\*Weg / Zeit]

„Maximal möglicher Wert der Verkehrsleistung“, wobei gilt:

Verkehrsleistung = Verkehrsarbeit je Zeiteinheit und

Verkehrsarbeit = Produkt aus der Anzahl der Verkehrselemente und der von ihnen zurückgelegten Wegstrecke.

Der Begriff „Kapazität“ bedeutet also eine Betrachtung der größtmöglichen Verkehrsstärke ohne Berücksichtigung der sich dabei einstellenden Geschwindigkeit bzw. Verkehrsqualität. Die Kapazität eines Querschnittes kann durch eine Messung streng genommen nur angenähert werden, da nicht sicher ist, ob die gemessene Verkehrsstärke auch die höchste mögliche Verkehrsstärke darstellt oder ob nicht eine noch höhere Verkehrsstärke möglich gewesen wäre. Für gemessene höchste Verkehrsstärken wird im folgenden anstelle des Begriffs „Kapazität“ der Begriff der *maximalen, empirischen Verkehrsstärke* (kurz: *emp.  $q_{max}$* ) verwendet. Aus *emp.  $q_{max}$*  kann durch modelltechnische Überlegungen oder durch Annäherung bei langen Messreihen die Kapazität abgeleitet werden.

Der Begriff der Leistungsfähigkeit ist ein Produkt aus Fahrzeugzahl und Geschwindigkeit. Er berücksichtigt also auch die Geschwindigkeiten und damit die Verkehrsqualität an einer Strecke. Er kann nur durch modelltechnische Überlegungen bestimmt werden (Kapitel 3.1.2).

### **3.1.2 Makroskopische Beschreibung des Verkehrsflusses auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen**

Der Verkehrsteilnehmer muss sein Verhalten von anderen Verkehrsteilnehmern abhängig machen. Das wichtigste Kriterium beim Verkehrsfluss auf Schnellstraßen mit planfreien Richtungsfahrbahnen ist ein ausreichender Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug, um bei einem Abbremsen noch rechtzeitig zum Stillstand zu kommen. Dieser Sicherheitsabstand ist geschwindigkeitsabhängig. Um bei zunehmender Verkehrsdichte einen ausreichenden Abstand einzuhalten, reduzieren die Verkehrsteilnehmer ihre Geschwindigkeit. Daraus ergibt sich, dass der Verkehrsfluss wesentlich von der Verkehrsdichte abhängt.

Dieser Zusammenhang wurde erstmals von GREENSHIELDS (1935) beschrieben und in zahlreichen Untersuchungen bestätigt. In Abhängigkeit von der Verkehrsdichte können Zustandsformen des Verkehrsflusses für Schnellstraßen beschrieben werden (z.B. nach SCHNABEL UND LOHSE 1997):

- freier / nichtgebundener Verkehr

Der Verkehrsteilnehmer kann seine Geschwindigkeit frei nach seinen Wünschen und den baulichen Gegebenheiten wählen. Bedingung ist eine sehr geringe Verkehrsdichte.

- teilgebundener Verkehr

Mit Zunahme der Verkehrsdichte entsteht eine gegenseitige Beeinflussung. Durch die Abnahme der Überholmöglichkeiten bilden sich die ersten Fahrzeuggruppen mit gleicher Geschwindigkeit.



- gebundener Verkehr

Der weitere Anstieg der Verkehrsdichte führt zu einer weiteren Abnahme der Überholmöglichkeiten und im Extremfall zum Kolonnenverkehr, bei dem alle Fahrzeuge mit der gleichen Geschwindigkeit fahren.

- Stau bzw. "Stop-and-go"

Die Verkehrsdichte ist zu hoch, um noch im fließenden Verkehr bewältigt werden zu können. Durch geringe Störungen im Verkehrsfluss entsteht ein „Stau aus dem Nichts“. Ein unruhiger Verkehrsablauf mit ständigem Wechsel zwischen Stehen und Fahren bei niedriger Geschwindigkeit ist die Folge. Dieser Verkehrsfluss ist unbefriedigend und führt zu Verlusten für die Allgemeinheit (höhere Emissionen, Reisezeitverluste).

Innerhalb der Zustandsform des gebundenen Verkehrs kommt es oberhalb einer bestimmten Verkehrsdichte zu einem Wechsel des Verkehrsflusses vom fließenden Verkehr in den stockenden Verkehr. Man spricht von einem Übergang vom *stabilen* in den *instabilen* Bereich. Eine exakte Grenze für diesen Übergang kann nicht angegeben werden, da zufallsbedingte Ereignisse eine Rolle spielen.

Eine weitere Möglichkeit der Zustandsbeschreibung des Verkehrsflusses bilden die *Verkehrsqualitätsstufen* (im englischsprachigen Raum *Level-of-Service*, LOS genannt) die mit Einführung des HBS auch in Deutschland Bedeutung erlangen. Diese Verkehrsqualitätsstufen werden für Streckenabschnitte zwischen Knotenpunkten durch die Höhe der mittleren Geschwindigkeit unterschieden.

Qualitätsstufe	Pkw-Geschw. [km/h]		Beschreibung	Verkehrsqualität
	HBS(1994)	HBS(2001)		
A	≥ 130	≥ 130	freier Verkehr,	bestens
B	≥ 115	≥ 125	nahezu freier Verkehr,	gut
C	≥ 100	≥ 115	merkbare Einschränkungen	befriedigend
D	≥ 85	≥ 100	deutliche Einschränkungen	ausreichend
E	≥ 75	≥ 80	Kolonnen, Instabilität	mangelhaft
F	< 75	< 80	stop-and-go-Verkehr	ungenügend

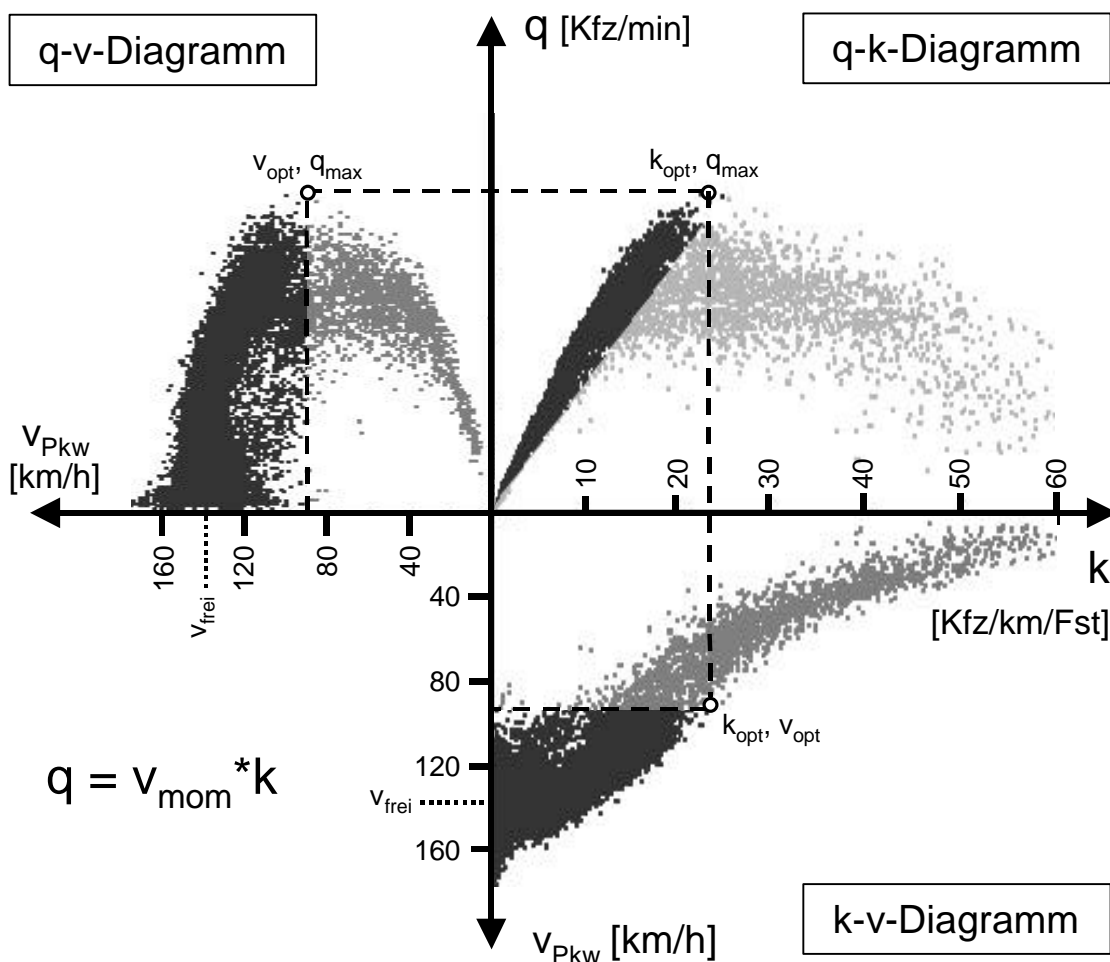
**Tabelle 3-1: Grenzwerte für mittleren Pkw-Reisegeschwindigkeiten auf Autobahnen für die sechs Qualitätsstufen (HBS 1994 bzw. HBS 2001)**

Unterhalb der mittleren Pkw-Geschwindigkeit von 75 km/h nach dem HBS-Entwurf (1994) und 80 km/h nach der endgültigen Fassung des HBS (2001) wird der Verkehrsfluss als zusammengebrochen und damit inakzeptabel bezeichnet (Qualitätsstufen F). Im Bereich der Qualitätsstufe E ist der Verkehrsfluss im kritischen Zustand an der Grenze von der Stabilität zur Instabilität. Hierauf wird in Kapitel 8 näher eingegangen.

## Fundamentaldiagramm

Die Darstellung der Abhängigkeiten der drei in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Größen Verkehrsstärke  $q$ , Verkehrsdichte  $k$  und mittlere Geschwindigkeit  $v$  wird als Fundamentaldiagramm bezeichnet. Dieses Fundamentaldiagramm ist eine dreidimensionale Punktwolke, die mittels Projektion in drei zweidimensionalen Diagrammen dargestellt werden kann. Diese drei Diagramme ermöglichen vielfache Aussagen über die Charakteristik des Verkehrsflusses an einem Querschnitt.

Abb. 3-1 zeigt eine typische Form der Punktwolke in den drei Darstellungsformen, wie sie sich an einem Querschnitt ergibt, der zeitweise Verkehrsüberlastungen und Stauzustände erfährt. Dargestellt sind die Werte des Messquerschnitts MQ 316 auf der Strecke der A9 München – Nürnberg, wie sie im Rahmen der eigenen Datenbasis gewonnen wurden.



**Abb. 3-1:** Typisches Fundamentaldiagramm für einen Querschnitt mit Verkehrsüberlastungen und Stauzuständen in den drei Formen q-v-Diagramm, q-k-Diagramm und k-v-Diagramm

(eigene Darstellung mit den Messwerten des MQ 316 der A9, Zeitintervall: 1 Minute, Trennung stabiler / instabiler Bereich bei  $v_{Pkw} = 85$  km/h)

Einige Randbedingungen geben die generelle Form des Fundamentaldiagramms vor:

- Wunschgeschwindigkeit im freien Verkehr  $v_{\text{frei}}$
- maximale Verkehrsstärke  $q_{\text{max}}$  bei der optimalen Geschwindigkeit  $v_{\text{opt}}$  und der optimalen Verkehrsdichte  $k_{\text{opt}}$
- maximale Verkehrsdichte im stehenden Verkehr  $k_{\text{max}}$

Die drei Diagramme werden als *q-v-Diagramm*, *q-k-Diagramm* und *k-v-Diagramm* bezeichnet.

Von besonderer Bedeutung ist das **q-v-Diagramm**, das als Grundlage zur Dimensionierung von Straßenquerschnitten dient. Es weist bei verkehrlich überlasteten Querschnitten eine parabelförmige Einhüllende der Punktwolke auf, d.h. für eine Verkehrsstärke gibt es zwei Geschwindigkeitswerte. Der Scheitelpunkt der Parabel liegt bei der maximalen Verkehrsstärke  $q_{\text{max}}$  und der optimalen Geschwindigkeit  $v_{\text{opt}}$ . Der obere Bereich umfasst den Zustand des freien, stabilen Verkehrs und der untere Bereich den des zusammengebrochenen, instabilen Verkehrs. Die Geschwindigkeit  $v_{\text{opt}}$  liegt üblicherweise bei mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen zwischen 80 und 90 km/h (vgl. Tabelle 3-1).

Da das *q-k-Diagramm* die Abhängigkeit zwischen den mit der Fundamentalbeziehung  $q = k \cdot v_{\text{mom}}$  verknüpften Werten beschreibt, wird dieses häufig als *Fundamentaldiagramm* bezeichnet. Die Steigung einer Geraden vom Ursprung zum Punkt gibt dessen momentane Geschwindigkeit  $v_{\text{mom}}$  an. Der stabile Bereich des Verkehrsflusses spiegelt sich als kompakte Punktwolke entlang einer Geraden, der instabile Bereich als relativ undefinierte, verstreute Punktwolke wider.

Im **k-v-Diagramm** schließlich sind die beiden Bereiche häufig schwer unterscheidbar. Die Punktwolke fällt mit zunehmender Verkehrsdichte monoton ab (evtl. kann der Übergang vom stabilen in den instabilen Bereich als Sprung erkannt werden). Dieses monotone Abfallen legt die Vermutung einer starken Abhängigkeit des Verkehrsflusses von der Dichte nahe.

Die Untersuchung der Form des Fundamentaldiagramms ist Gegenstand einer Vielzahl von Forschungsarbeiten. Neben der eben beschriebenen Zweiteilung können auch deutlich mehr unterschiedliche Zustandsformen des Verkehrsflusses unterschieden werden. Neuere Arbeiten beschäftigen sich mit dem Übergang zwischen diesen Zustandsformen und mit Hystereseeffekten, d.h. der Beobachtung, dass der Zustand des Verkehrs nicht nur mit den aktuell gemessenen Kenngrößen, sondern nur mit zusätzlicher Betrachtung der vorhergehenden Veränderung, beschrieben werden kann.

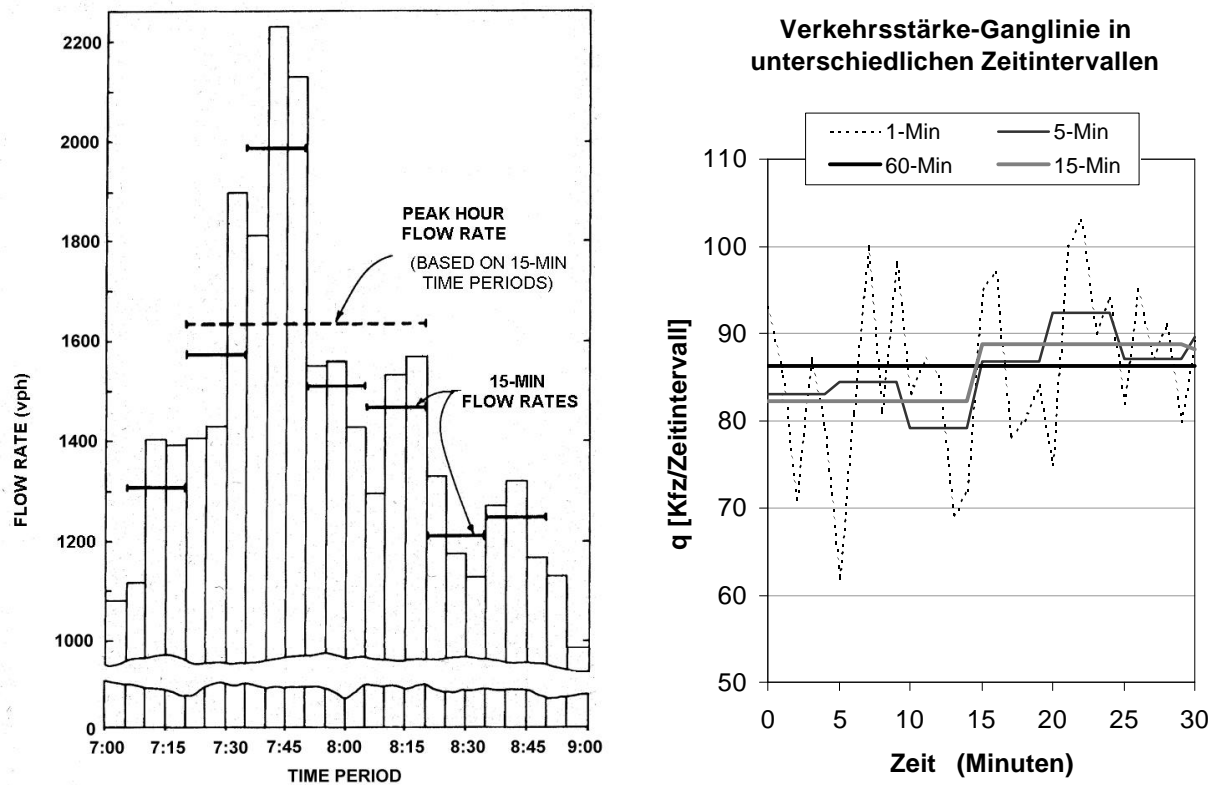
## **Einfluss des zeitlichen Bezugsintervalls**

Verkehrsfluss ist ein sehr instationäres Phänomen. Der Grund liegt in der Heterogenität des Fahrzeug- und Fahrerkollektivs sowie in den Zufälligkeiten, die sich in der Interaktion zwischen den Fahrern ergeben. Ein Verkehrsfluss entsteht erst durch die Interaktion mehrerer Verkehrsteilnehmer (Kapitel 3.1.1). Die Frage stellt sich nun nach dem „richtigen“ Aggregationsniveau für die Verkehrsflussgrößen: bei einer zu geringen Aggregation ist die statistische Aussagefähigkeit geringer, bei einer zu starken Aggregation verwischen kurzzeitige Effekte.

Grundsätzlich kann unterschieden werden zwischen dem Aggregieren über eine Mindestzahl von Fahrzeugen und dem Aggregieren über einen festen Zeitraum. In der Praxis spielt nur der letztere Fall eine Rolle, da bei der Messung des Verkehrsflusses in der Regel keine Einzelfahrzeuge, sondern die in einem festen Zeittakt zusammengefassten Größen abgespeichert werden. Dieser Zeittakt beträgt in der Regel 1 Minute, 5 Minuten, 15 Minuten oder 1 Stunde. Bei der anschließenden Untersuchung kann das Aggregationsniveau nur noch erhöht werden.

Frühere Untersuchungen haben überwiegend Messungen mit Zeitintervallen von einer Stunde verwendet. Ein Grund waren technische Begrenzungen beim Verarbeiten großer Datenmengen, ein weiterer Grund aber die hohe Aussagefähigkeit eines längeren Intervalls für die Bemessung von Straßenquerschnitten. In der US-amerikanischen Richtlinie *Highway Capacity Manual (HCM)* ist das 15-Minuten-Intervall gebräuchlich. Für verkehrstechnische Untersuchungen können 5-Minuten-Intervalle (z.B. bei der Videoerfassung) eine Rolle spielen (LEMKE 2000). Für verkehrstechnische Steuerungen sind möglichst kurze Intervalle wichtig, entsprechend ist für Streckenbeeinflussungsanlagen gemäß RWVA die Erfassung im 1-Minuten-Intervall vorgeschrieben. Für spezielle Untersuchungen werden auch 15-Sekunden- oder 30-Sekunden-Intervalle verwendet.

Welchen bedeutenden Einfluss die Wahl des Zeitintervalls hat, veranschaulichen die beiden Ganglinien in Abb. 3-2. Im linken Bild ist anhand der Messung der Verkehrsstärke in 5-Minuten-Intervallen über einen 2-h-Zeitraum an einem Messquerschnitt in den USA dargestellt, wie die maximale Verkehrsstärke von der Wahl des Bezugsintervalls abhängt. Im rechten Bild ist dies für alle vier Zeitintervalle anhand eigener Messwerte an der A9 München – Nürnberg veranschaulicht. Man erkennt, wie insbesondere das 1-Minuten-Intervall enorm den zufälligen Schwankungen im Verkehrsfluss unterliegt.



**Abb. 3-2: Einfluss der Länge des zeitlichen Bezugsintervalls auf die maximale Verkehrsstärke (linkes Bild: HCM 1998; rechtes Bild: eigene Darstellung mit Daten des MQ 311 der A9)**

Kurze Intervalllängen haben allerdings den Vorteil, dass sie bestimmte Charakteristika des Verkehrsflusses erst aufdecken können. Bei der Aggregation der Messdaten in Stundenintervalle entsteht eine erhebliche Verfälschung, wenn die verschiedenen Verkehrszustände des stabilen und des instabilen Verkehrs gemittelt werden und als ein Verkehrszustand mit mittlerer Geschwindigkeit erscheinen.

SACHSE (1992) hat den Einfluss des Bezugsintervalls auf die Leistungsfähigkeit an zweistreifigen Landstraßen untersucht. PONZLET (1996) hat dies für einen Autobahnquerschnitt durchgeführt. In beiden Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass allgemeingültige Umrechnungsfaktoren für die Kenngrößen von einem Zeitraum in einen anderen Zeitraum schwer anzugeben sind. Am Besten ist es daher, verkehrstechnische Untersuchungen separat in verschiedenen Zeitintervallen durchzuführen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Zeitintervalle betrachtet:

- das 1-Minuten-Intervall zur Beurteilung von Verkehrszuständen (z.B. im Fundamentaldiagramm),
- das 5-Minuten- und 60-Minuten-Intervall zur Untersuchung der Kapazität.

### Verkehrsflussmodelle für die freie Strecke

Die Zusammenhänge zwischen den Größen  $v$ ,  $q$  und  $k$  können im Fundamentaldiagramm mittels mathematischer Modellvorstellungen beschrieben werden. Diese Modelle können durch theoretische Ableitungen aus Grundzusammenhängen des Verkehrsablaufs oder durch empirische Beschreibung der Punktwolke im Diagramm gewonnen werden. Häufig werden Analogien zu Fluiden oder Partikelströmen aufgestellt, wobei allerdings berücksichtigt werden muss, dass es sich beim Verkehrsfluss um eine komplexe Interaktion zahlreicher Verkehrsteilnehmer handelt, die nicht zwangsläufig kausal oder nach immer gleichen logischen Grundsätzen erfolgt. Bei der quantitativen Erfassung und mathematischen Modellierung dieses Verhaltens bestehen erhebliche Schwierigkeiten.

Das erste Verkehrsflussmodell zur Beschreibung des Verkehrsflusses auf der freien Strecke stammt aus den Beobachtungen von GREENSHIELDS (1935), der mit fotografischen Messmethoden erstmals Untersuchungen zu Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit durchführte. Er postulierte einen linearen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Verkehrsdichte, der sich im  $q$ - $v$ -Diagramm als parabolischer Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Verkehrsdichte widerspiegelt (Abb. 3-3):

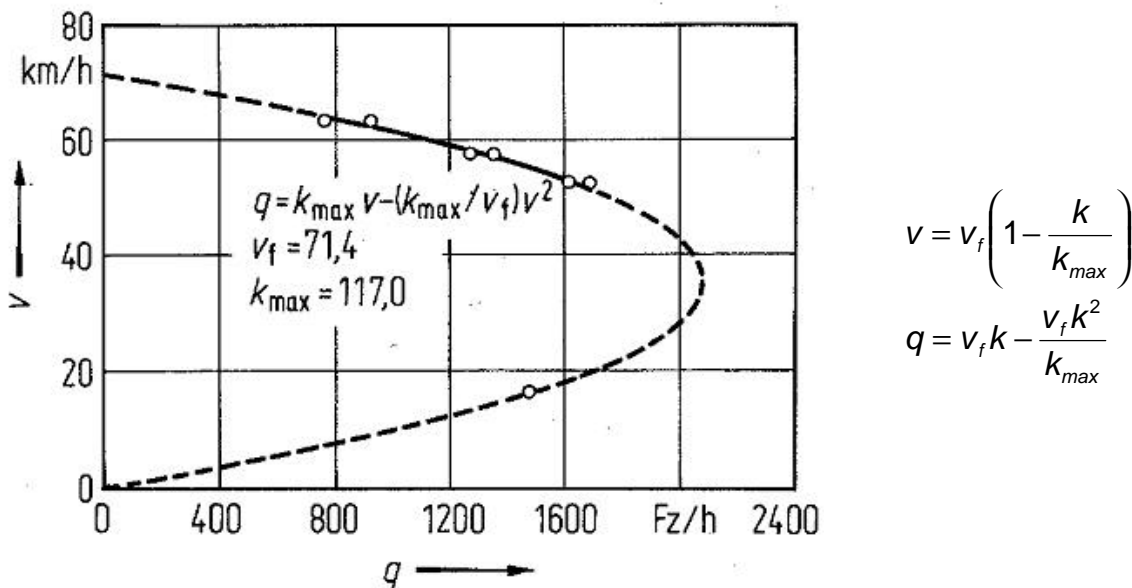
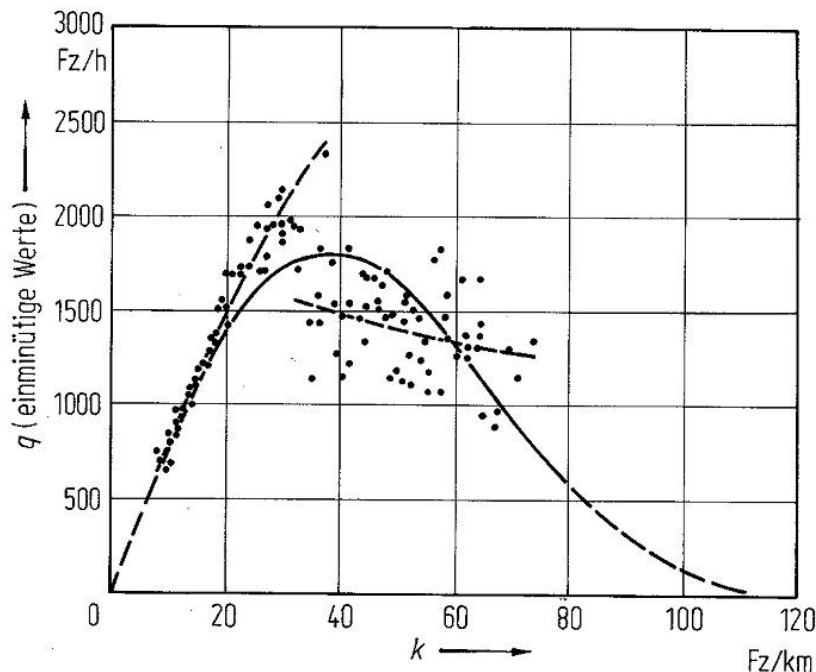


Abb. 3-3: Das erste mathematische Modell für den Verkehrsfluss von GREENSHIELDS (1935)

Dieses Modell gibt einige Charakteristika des Verkehrsflusses gut wieder: Die maximale Verkehrsstärke wird bei der optimalen Verkehrsdichte erreicht. Im  $q$ - $v$ -Diagramm existieren zwei Bereiche, d.h. bei gleicher Verkehrsstärke sind zwei Geschwindigkeiten möglich. Diese zwei Bereiche unterteilen den Verkehrsfluss in den stabilen und den instabilen Bereich. Da beide Bereiche mit einer Formel beschrieben werden, wird es als *Einbereichsmodell* bezeichnet.

Diese Erkenntnisse wurden zu *Zwei- oder Mehrbereichsmodellen* weiterentwickelt. Dies wurde zuerst von EDIE (1961) und anschließend von MAY und KELLER (1968) durchgeführt. Es zeigte sich, dass im Bereich des instabilen Verkehrs eine hyperbolische Funktion den Verkehrsfluss besser wiedergibt als eine parabolische Funktion (Abb. 3-4):



**Abb. 3-4: Zweibereichsmodell für den Verkehrsfluss (MAY und KELLER 1968)**

Zahlreiche weitere Versuche wurden unternommen, durch neue Ansätze oder eine Weiterentwicklung eine verbesserte Anpassung der Modelle an die empirischen Daten zu erreichen. Ein jüngeres Modell ist das *van-Aerde-Modell*, das in neueren Untersuchungen zum Verkehrsablauf und zur Bestimmung der Kapazität an mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen eingesetzt wurde (z.B. in LEMKE 2000). Der Ansatz basiert auf einem Fahrzeugfolgemodell, das die Brutto-Weglücke zwischen Fahrzeugen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit berechnet. Dieser Ansatz bildet insbesondere im  $k$ - $v$ -Diagramm den häufig beobachteten S-förmigen Verlauf gut wieder. Bei diesem Modell handelt es sich auch um ein Einbereichsmodell.

Eine neuere Untersuchung (WU 2000) greift aktuelle Forschungsergebnisse zum Zeitlückenverhalten im gebundenen Verkehr auf und formuliert ein Vier-Bereichs-Modell mit freiem Verkehr, Kolonnenverkehr, Stop-and-go-Verkehr und stehendem Verkehr. Zusätzlich wird der Übergang zwischen dem stabilen und dem instabilen Bereich durch Wahrscheinlichkeiten betrachtet, deren statistischer Mittelwert die Kapazität einer Strecke angibt. Dieses komplexe Modell kann weitere Phänomene des Verkehrsflusses erklären.

Alle diese Verkehrsflussmodelle haben gemein, dass sie aus den beobachteten Werten nicht nur eine maximale empirische Verkehrsstärke angeben, sondern die

Kapazität (also die theoretische maximale Verkehrsstärke) bestimmen. Dabei besitzen sie aber das Problem, dass die Modelle die Realität vereinfachen, Annahmen treffen und nur für bestimmte Rahmenbedingungen gültig sind. In der Praxis ergeben sich bei der Anwendung verschiedener Verkehrsmodelle Unterschiede von über 10 % bei der Bestimmung der Kapazität (WU 2000) oder gar absolut unrealistische Werte (LEMKE 2000).

Aus diesem Grund werden in einigen Untersuchungen zur Kapazität oder Leistungsfähigkeit (PONZLET 1996, LEMKE 2000) keine komplexen Verkehrsmodelle mit dem Ziel einer möglichst wirklichkeitsnahen Abbildung des Verkehrsablaufs eingesetzt. Stattdessen werden einfache z.B. lineare oder parabelförmige Funktionen im stabilen Bereich und parabelförmige oder hyperbolische Funktionen im instabilen Bereich verwendet. Diese Funktionen können die Kapazität der Strecke nicht angeben, da sie nur in dem gemessenen Wertebereich gültig sind. Als Ergebnis ergeben sich Kurvenscharen, die über das Geschwindigkeitsniveau und dessen Abhängigkeit von der Verkehrsstärke sowie die maximale Verkehrsstärke Auskunft geben können (Beispiel in Abb. 3-6 auf Seite 48).

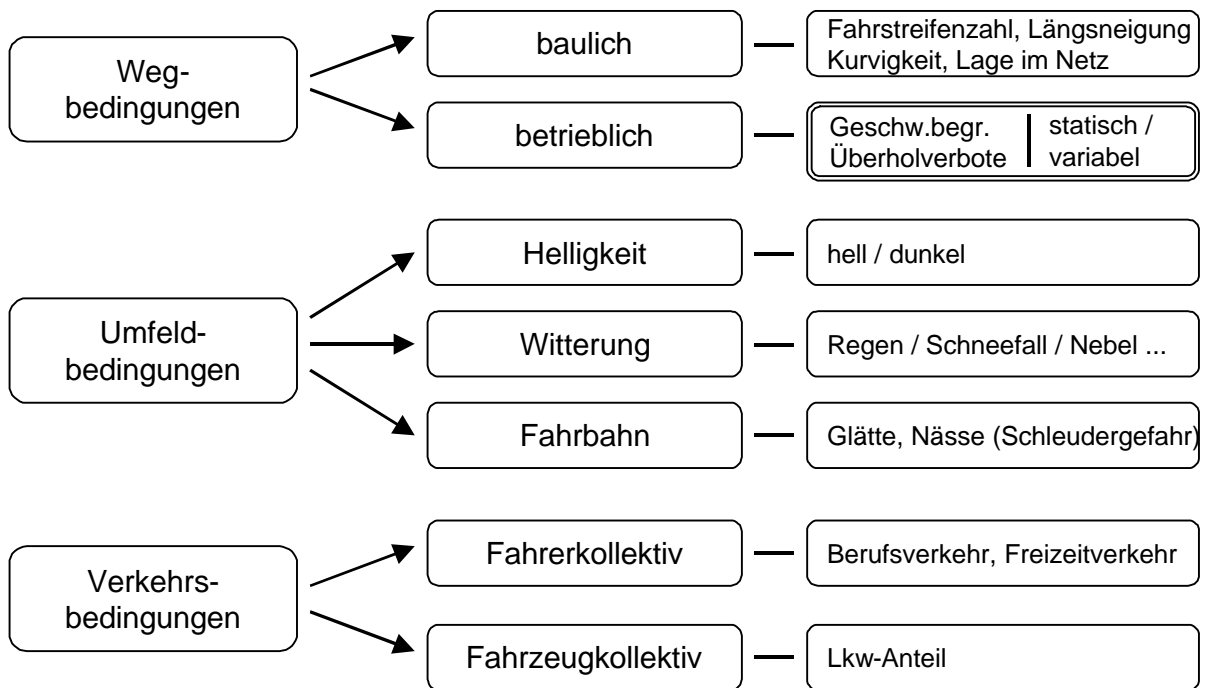
### 3.1.3 Einflüsse auf den Verkehrsablauf

Im vorherigen Kapitel wurden die wesentlichen Einflüsse durch Verkehrsdichte und Verkehrsstärke auf den Verkehrsablauf beschrieben. Hinzu kommen zyklische Schwankungen im Verkehrsablauf, die nicht von der Verkehrsbelastung abhängen, sondern in den unterschiedlichen Fahrweisen der Verkehrsteilnehmer (z.B. Wunschgeschwindigkeiten) begründet sind. Diese hängen vom Fahrtzweck ab und beeinflussen nicht nur das Geschwindigkeitsniveau, sondern auch die Kapazität an einem Querschnitt. Weiterhin existieren Einflüsse aus der Streckencharakteristik und den Umfeldbedingungen.

Zusammengefasst gibt es folgende Einflüsse auf Geschwindigkeitsniveau und Kapazität eines Querschnitts:

Die **Wegbedingungen** sind zeitlich konstante Einflussgrößen. Sie unterteilen sich in bauliche und betriebliche Parameter. Der Parameter „Lage im Netz“ ist mit dem Parameter „Fahrerkollektiv“ verknüpft, da bei Autobahnen in der Nähe eines Ballungsraumes überwiegend Berufsverkehr und bei Verbindungsstrecken viel Freizeitverkehr auftritt. Autobahnen wie die A9 München – Nürnberg können in Abhängigkeit des Zeitraumes beide Fahrerkollektive aufweisen. Bauliche Parameter spielen die Hauptrolle beim Einfluss auf das Verkehrsgeschehen. Aus diesem Grund müssen z.B. zwei- und dreistreifige Richtungsfahrbahnen getrennt betrachtet werden. Längsneigung und Kurvigkeit spielen nur bei größeren Ausprägungen eine Rolle (nach HBS bei einer Längsneigung  $> 2\%$ ). Der Einfluss der Betriebsbedingungen wird in den Kapiteln 3.1.4 und 3.2 ausführlich behandelt.





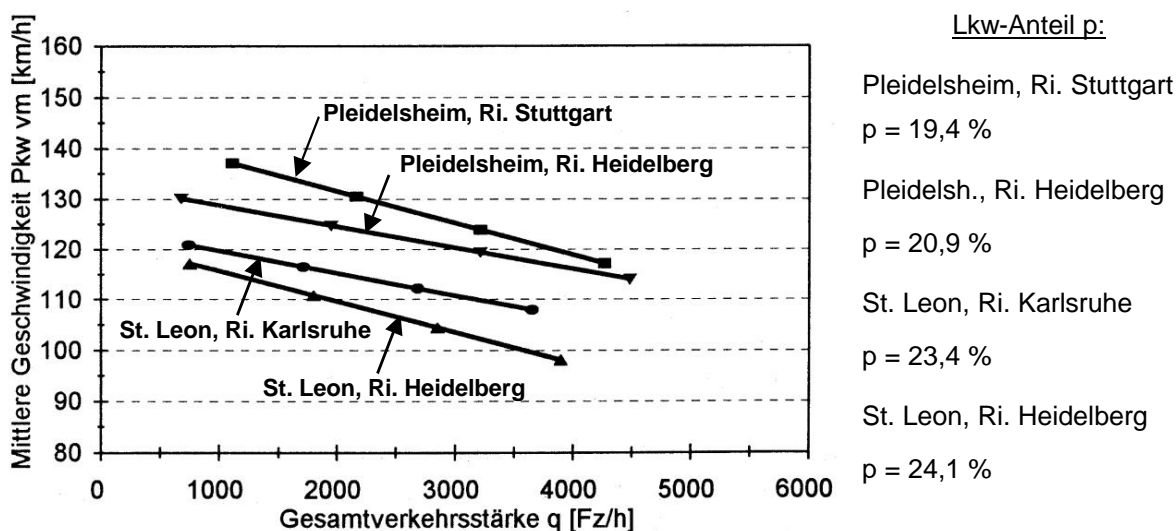
**Abb. 3-5: Einflüsse auf den Verkehrsablauf**

**Umfeld- und Verkehrsbedingungen** sind zeitlich variable Größen. Die in den Richtlinien angegebenen Werte für die Kapazität gelten in der Regel für trockene Fahrbahnen bei Tageslicht. In der Nacht und bei geringer Sicht oder Griffigkeit der Fahrbahn verhalten sich die Verkehrsteilnehmer vorsichtiger: sie halten mehr Abstand und fahren langsamer. Bei den verkehrsbedingten Parametern spielt das eben erwähnte Fahrerkollektiv eine Rolle. Die Fahrer im Berufsverkehr sind ortskundig und fahren möglicherweise konzentrierter. Der Freizeitverkehr ist heterogener und dementsprechend ungleichmäßiger. Das Fahrzeugkollektiv kann beschrieben werden durch den Lkw-Anteil, genauer betrachtet spielt auch die Zusammensetzung des Pkw-Kollektivs (stark motorisiert oder schwach motorisiert) eine Rolle. Im betrachteten Untersuchungsgebiet (Deutschland) kann die Zusammensetzung des Pkw-Kollektivs als einheitlich angesehen werden.

Es wird deutlich, dass der Einfluss einer Streckenbeeinflussungsanlage nur einen Einflussparameter unter vielen darstellt. Dies muss bei Vergleichen berücksichtigt werden.

Der Einfluss der zyklischen und der umfeldbedingten Schwankungen wurde in PONZLET (1996) umfassend untersucht. Als Fazit wurde gezogen, dass im Vergleich zu den Optimalbedingungen „hell und trocken“ und „dunkel und trocken“ eine um 9% geringere max. Verkehrsstärke auftrat, bei „hell und nass“ 13% geringer und bei „dunkel und nass“ 30% geringer. Da es sich hierbei um Mittelwerte handelt, die im Einzelfall stark schwanken, können keine Faktoren angegeben werden, mit denen Kapazität und Leistungsfähigkeit verschiedener Umfeldbedingungen umgerechnet werden können.

Die zahlreichen Weg- und Umfeldbedingungen stellen in ihrer Kombination eine komplexe Einflussgröße auf den Verkehrsfluss dar, sie sind aber immerhin messbare Größen. Zusätzlich gibt es noch sehr subjektiv auf die Verkehrsteilnehmer wirkende Einflussfaktoren, die kaum messbar sind. Dies betrifft insbesondere den Bereich des Fahrtzwecks und die Ortskundigkeit der Verkehrsteilnehmer. Diese nicht messbaren Größen müssen aber einen erheblichen Einfluss darstellen, wie bei der Betrachtung von Abb. 3-6 deutlich wird. Diese Abbildung veranschaulicht beispielhaft, wie unterschiedlich sich Geschwindigkeitsniveau und maximale Verkehrsstärke trotz vergleichbarer Weg-, Umfeld- und Verkehrsbedingungen bei verschiedenen Querschnitten darstellen können.



**Abb. 3-6: Auswirkungen subjektiver Einflussfaktoren: Geschwindigkeitsniveau und maximale Verkehrsstärke an vier sehr ähnlichen dreistreifigen Messquerschnitten (Darstellung nach PONZLET 1996)**

Die vier Querschnitte sind identisch vom baulichen Standard (dreistreifig, eben) und in Bezug auf das Fahrzeugkollektiv (Lkw-Anteil) und die Verkehrsnachfrage (Ganglinie) sehr ähnlich. Trotzdem verbleiben Unterschiede in der mittleren Geschwindigkeit von bis zu 20 km/h und in der maximalen Verkehrsstärke von ca. 500 Kfz/h. PONZLET (1996) erklärt dies mit Unterschieden in weiteren Rahmenbedingungen wie der Nähe zu Anschlussstellen oder Autobahnkreuzen, die durch zahlreiche Verflechtungsvorgänge langsamere Geschwindigkeiten und geringere Kapazitäten verursachen und Einflüssen durch Unterschiede im Fahrerkollektiv. Diese Randbedingungen lassen sich allerdings nicht objektiv erfassen und beschreiben.

Die Berücksichtigung und die Kenntnis der zahlreichen Einflussparameter ist im Rahmen dieser Arbeit wichtig für den Vergleich des Verkehrsablaufs an verschiedenen Querschnitten oder zu verschiedenen Zeitpunkten.

### 3.1.4 Statische Geschwindigkeitsbeschränkungen und Lkw-Überholverbote

Auf den Bundesautobahnen werden aus Sicherheitsaspekten notwendige Geschwindigkeitsbeschränkungen oder Überholverbote erlassen. Neben den Auswirkungen auf die Unfallzahlen sind auch die verkehrlichen Auswirkungen im Vergleich zur freien Strecke untersucht worden.

Geschwindigkeitsbeschränkungen wird vor allem eine harmonisierende Wirkung zugesprochen. Besonders die sehr schnell fahrenden Verkehrsteilnehmer werden zu einer Verminderung ihrer Geschwindigkeit veranlasst, als Folge ergeben sich geringere Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Fahrzeugen. Der Verkehrsfluss wird gleichmäßiger und weniger störungsanfällig.

Die Wirkung einer Geschwindigkeitsbegrenzung lässt sich gut mit einer Summenlinie und den Percentil-Werten (z.B.  $v_{85}$ ) darstellen (Abb. 3-7):

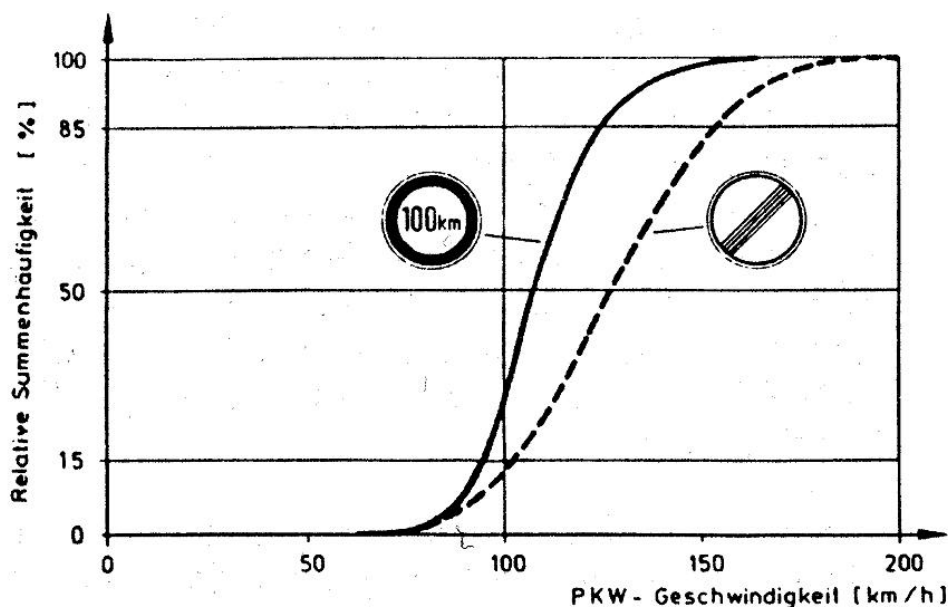


Abb. 3-7: Harmonisierung der Geschwindigkeitsverteilung durch Tempo-100-Beschränkung (LEUTZBACH 1993)

Man erkennt, wie die Geschwindigkeitsbegrenzung auf 100 km/h (im folgenden T100 genannt) eine deutliche Abnahme der Schiefe der Verteilung bewirkt. Die hohen Geschwindigkeiten reduzieren sich, die  $v_{85}$  sinkt von 150 km/h auf 120 km/h ab. Da die niedrigen Geschwindigkeiten gleich bleiben, sinkt die Differenzgeschwindigkeit zwischen den Verkehrsteilnehmern und die Sicherheit des Verkehrsflusses wird erhöht.

Insbesondere wird aber von einem paradoxen Phänomen berichtet (ZACKOR et al. 1988): die mittlere Geschwindigkeit steigt aufgrund Geschwindigkeitsbegrenzungen in höheren Dichtebereichen des Verkehrs an, da langsamere Fahrer zu einer Erhöhung ihrer Wunschgeschwindigkeit auf die Geschwindigkeitsgrenze ermuntert werden. Zusammen mit der Abnahme der hohen Extremwerte stellt sich ein gleich-

mäßigerer Verkehrsfluss auf höherem Geschwindigkeitsniveau ein. Weiterhin wird durch eine Abnahme der kritischen Situationen eine Stabilisierung des Verkehrsflusses bewirkt, d.h. der Verkehr schlägt erst bei höheren Verkehrsstärken vom stabilen in den instabilen Bereich um.

Ähnliche Ziele wie bei Geschwindigkeitsbeschränkungen werden auch durch den Erlass von Lkw-Überholverböten angestrebt: eine harmonisierende Wirkung auf den Verkehrsablauf und eine damit verbundene Reduktion von Störungen.

Eine Zusammenstellung bisheriger Forschungsergebnisse und umfangreiche eigene Messungen finden sich in DREWS (1996). Als Ergebnisse des Erlasses von Lkw-Überholverböten zeigten sich eine Erhöhung der Reisegeschwindigkeiten der Pkw und eine (geringe) Senkung bei den Lkw-Reisegeschwindigkeiten. Dies ist in Abhängigkeit vom Lkw-Anteil und der Längsneigung unterschiedlich stark ausgeprägt. Insgesamt sind die Effekte gering: bei höheren Verkehrsstärken konnte eine kleine Steigerung der Durchschnittsgeschwindigkeiten der Pkw (max. 3 km/h) und praktisch gleich bleibende Lkw-Geschwindigkeiten festgestellt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Einfluss der betrieblichen Maßnahmen „statische Geschwindigkeitsbeschränkung“ und „Lkw-Überholverbot“ auf das Geschwindigkeitsniveau bei höheren Verkehrsstärken und die Kapazität einer Strecke eher gering ist. Bei variablen Beschränkungen einer Streckenbeeinflussungsanlage könnten die Effekte aufgrund der höheren Bandbreite der Anzeigen und einer evtl. höheren Akzeptanz größer sein (Kapitel 3.2.2).

## 3.2 Untersuchungen zur Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen

### 3.2.1 Untersuchungen zur Reduktion von Unfällen

Das überwiegende Ziel bei der Errichtung von SBA besteht in der Senkung der Unfallzahlen. Die dabei erreichten Erfolge sind in zahlreichen Untersuchungen quantifiziert und monetarisiert worden. Grundlagen für diese Untersuchungen stellen Vergleiche eines Vorher-Zeitraums vor Inbetriebnahme und eines Nachher-Zeitraums nach Inbetriebnahme der SBA dar. Wegen der statistisch selten vorkommenden Unfallereignisse betragen diese Zeiträume üblicherweise jeweils ein bis drei Jahre. Die Wirkung einer SBA wird über einen Vergleich mit der Entwicklung der Unfallzahlen im gesamten Autobahnnetz berechnet.

Im folgenden werden die Ergebnisse einiger Untersuchungen zusammengefasst wiedergegeben:

- Reduktion der Gesamtunfallzahlen um über 30%, Abnahme der Unfälle mit Personenschaden um ca. 50% und der Verkehrstoten um 60% auf der SBA A5 bei Frankfurt (AUTOBAHNAMT FRANKFURT 1990)
- Starke Abnahme von Nässe- (30%) und Nebelunfällen (86%) auf der SBA A8 Stuttgart - Ulm (BALZ 1995)
- „Deutliche“ Reduktion der Unfalltypen „nicht angepasste Geschwindigkeit“ und „ungenügender Sicherheitsabstand“ auf den SBA an der A4 und der A61 (LANGE und STRUIF 1997)

Eine zusammenfassende Darstellung dieser und anderer Untersuchungen zu Unfallwirkungen kann KÜHNE et. al. (1999) entnommen werden.

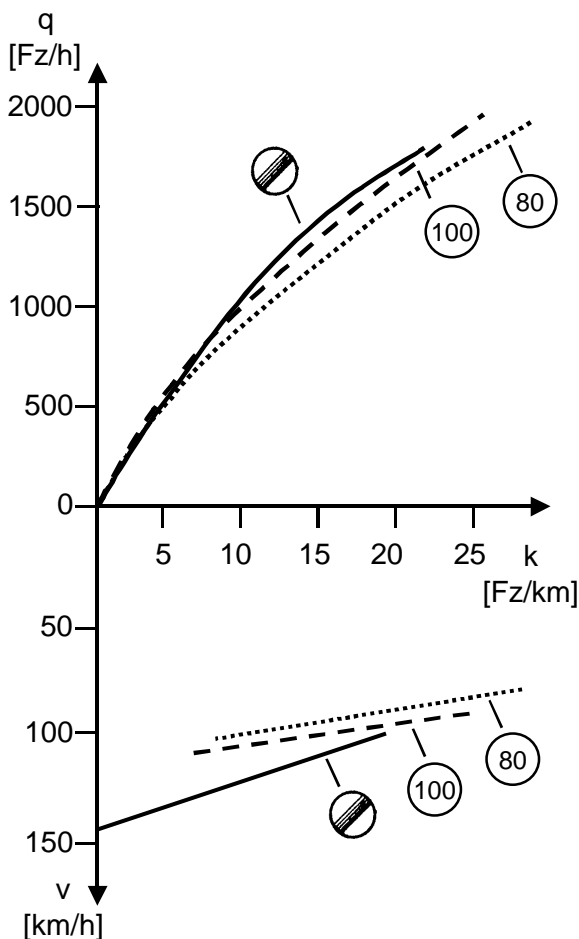
Eine aktuelle, umfangreiche Forschungsarbeit zur Entwicklung der Unfallzahlen an zehn SBA in Deutschland wurde von SIEGENER et. al. (2000) durchgeführt. Diese Arbeit untersuchte gezielt nur die Entwicklung der drei Unfalltypen, die von einer SBA beeinflusst werden können: Fahrurfälle, Unfälle im Längsverkehr und „sonstige Unfälle“. Weiterhin wurden die Unfallzahlen in Abhängigkeit der Verkehrsstärke untersucht. Dabei zeigte sich, dass das Wirksamkeitspotenzial von SBA überwiegend in Zeiten mit starker Verkehrsbelastung gegeben ist. Bei den meisten Anlagen zeigte sich im Vergleich zur Entwicklung auf dem gesamten Autobahnnetz ein Rückgang der Unfallzahlen von 15 bis 30%. An manchen Anlagen (vor allem bei denen mit bereits niedrigen Unfallraten im Vorher-Zeitraum) zeigten sich nur geringe Veränderungen, in Einzelfällen auch Zunahmen, die aber vermutlich durch statistische Einflüsse bedingt sind. Die Größenordnung des monetarisierten Nutzens aus der Unfallreduktion wird in Kapitel 9 mit dem monetarisierten Nutzen bei der Verbesserung des Verkehrsablaufs in Relation gesetzt.

### 3.2.2 Untersuchungen zum Verkehrsablauf an SBA

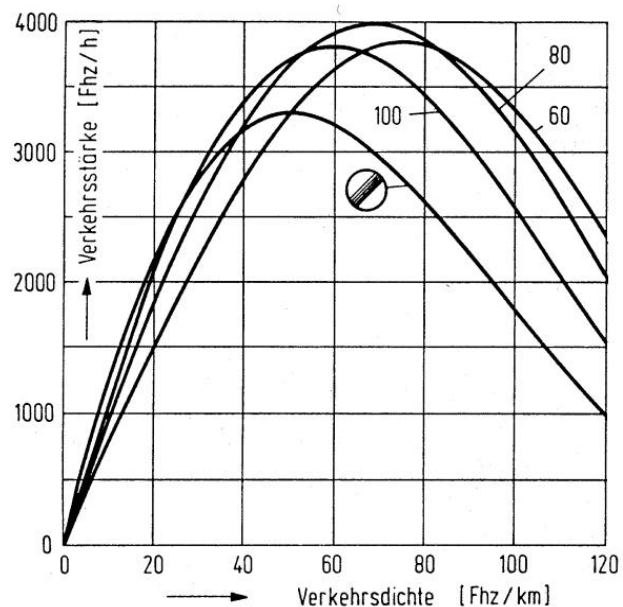
#### ZACKOR (1972)

Die erste Untersuchung zu Auswirkungen einer SBA auf den Verkehrsfluss wurde an der ersten Wechselverkehrszeichenanlage in Deutschland an der A8 Salzburg-München durchgeführt (ZACKOR 1972). Bedingt durch die damals beschränkten Möglichkeiten der Messtechnik konnten vergleichsweise wenige Daten (zwei Querschnitte über mehrere Stunden) erfasst und ausgewertet werden. Aufgrund der Konzeption der Anlage konnten die Verhältnisse bei einer Geschwindigkeitsbegrenzung T80, T100 und ohne Geschwindigkeitsbegrenzung untersucht werden.

Die in 5-Minuten-Intervallen gemessenen Werte für die drei Schaltzustände werden als Fundamental- und im k-v-Diagramm dargestellt (Abb. 3-8).



**Abb. 3-8:** Vergleich dreier Messungen mit verschiedenen Betriebszuständen an der A8 Salzburg – München (vereinfachte Darstellung nach ZACKOR 1972)



**Abb. 3-9:** Modell für den Verkehrsfluss im Fundamentaldiagramm bei Geschwindigkeitsbeschränkungen von CREMER (1979), abgebildet in ZACKOR et. al. (1988)

Man sieht, wie im k-v-Diagramm die Geraden für T100 und T80 eine geringere Neigung besitzen und in Bereiche höherer Verkehrsdichte reichen. Aus einer fiktiven Verlängerung der Gerade für die Messgruppe ohne Geschwindigkeitsbegrenzung

ergibt sich die Erkenntnis, dass mit Schaltung einer Geschwindigkeitsbegrenzung die mittlere Geschwindigkeit im dichten Verkehr steigt. Im Fundamentaldiagramm ist zu erkennen, wie die Geschwindigkeitsbegrenzungen zu einer höheren maximalen Verkehrsstärke führen.

Die drei dargestellten Messgruppen beziehen sich auf den Tagverkehr. Der Vergleich von drei weiteren Messgruppen im Nachtverkehr und der Vergleich aller Messgruppen mit der unbeeinflussten Gegenfahrbahn bestätigen die gewonnenen Erkenntnisse und führen zu dem Schluss, dass die Anlage zu einer Leistungssteigerung geführt hat.

Als weitere Ergebnisse werden angegeben:

- gute Akzeptanz der Geschwindigkeitsbegrenzungen bei Annahme einer 10%igen Toleranzgrenze
- Abnahme der Streuung der Geschwindigkeit und der Geschwindigkeitsdifferenzen
- Abnahme der Häufigkeit gefährlich kleiner Zeitlücken
- Stabilisierung des Verkehrsflusses

Diese empirischen Untersuchungen dienten CREMER (1979) im Rahmen des Aufbaus eines Verkehrsflussmodells für Schnellstraßen als Basis für die Berücksichtigung verschiedener Geschwindigkeitsbegrenzungen im Fundamentaldiagramm (Abb. 3-9). Der Vergleich der Kurven zeigt, wie durch Geschwindigkeitsbegrenzungen die maximale Verkehrsstärke gesteigert werden kann. Die höchsten Verkehrsstärken werden bei der Geschwindigkeitsbegrenzung T80 und einer Verkehrsdichte von 25 Kfz/km/Fahrsstreifen erreicht.

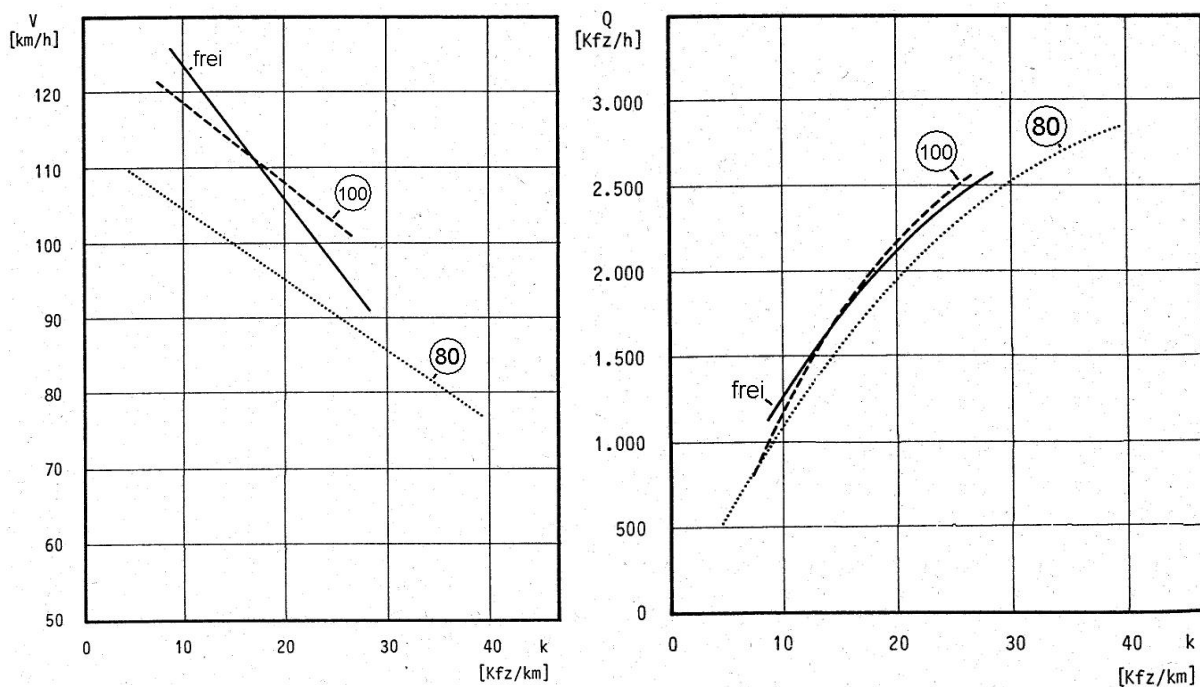
Diese zahlreichen - bereits bei der ersten Untersuchung festgestellten - positiven Auswirkungen auf den Verkehrsfluss prägten in der Folgezeit die Diskussion um den Nutzen von Streckenbeeinflussungsanlagen im Hinblick auf den Verkehrsablauf. Die Fragen der monetären Bewertung des Nutzens und der Übertragbarkeit auf andere Strecken wurden allerdings noch nicht beantwortet. Die damaligen Ergebnisse dürften im Hinblick auf das in einem Zeitraum von 30 Jahren völlig veränderte Fahrzeugkollektiv (mit zunehmender Motorleistung verbundener Anstieg der Geschwindigkeiten) und auch des Fahrerkollektivs (Veränderung der Fahrweise) in quantitativer Hinsicht zudem heute wenig Gültigkeit besitzen.

### **BODE und HALLER (1983)**

Im Jahr 1982 wurde auf der A7 bei Hannover eine Wechselerkehrszeichenanlage auf 30 km Länge in beiden Fahrtrichtungen speziell mit dem Ziel der Erhöhung der Leistungsfähigkeit errichtet. Aufgrund begrenzter Finanzmittel wurde das System sehr einfach konzipiert: nur eine Messschleife pro Fahrtrichtung und nur auf dem

Mittelstreifen alle 2 km aufgestellte Prismenwender mit den Geschwindigkeitsbegrenzungen T80, T100 und keine Geschwindigkeitsbegrenzung („neutral“). Im Sommer 1982 wurden Messungen des Verkehrsflusses mit dem Ziel durchgeführt, eine Leistungsfähigkeitserhöhung der Strecke zu ermitteln.

Die beiden Diagramme in Abb. 3-10 zeigen den Verkehrsfluss in Abhängigkeit des Schaltzustands, d.h. der erlassenen Geschwindigkeitsbegrenzungen T80 bzw. T100. Im k-v-Diagramm besitzt die T100-Gerade eine flachere Neigung als die „Neutral“-Gerade und im Bereich hoher Verkehrsstärken liegt sie höher. Die T80-Gerade reicht in Bereiche höherer Verkehrsdichten. Dies wird als Beleg für höhere mittlere Geschwindigkeiten und höhere maximalen Verkehrsdichten (und auch Verkehrsstärken, siehe q-k-Diagramm) genommen. Weiterhin wird aus einer fiktiven Verlängerung der „Neutral“-Gerade geschlossen, dass die mittleren Geschwindigkeiten bei sehr hohen Verkehrsdichten auch bei der T80-Gerade über der „Neutral“-Gerade liegen.



**Abb. 3-10: k-v-Diagramm und q-k-Diagramm in Abhängigkeit des Schaltzustands der Wechselverkehrszeichenanlage an der Messstelle Berghof, Fahrtrichtung Nord am 17.07.1982 (BODE und HALLER 1983)**

Weitere Analysen zeigen eine Homogenisierung des Verkehrsflusses im Sinne von kleineren Varianzen der Geschwindigkeitsverteilungen und eine damit verbundene Erhöhung der Sicherheit des Verkehrsflusses.



**ZACKOR und SCHWENZER (1988)**

Eine sehr moderne Anlage mit fahrstreifenbezogenen Wechselverkehrszeichen wurde 1983 auf einer Länge von 7 km bei Stuttgart auf beiden Richtungsfahrbahnen der A8 errichtet. Als Besonderheit konnten die Wechselverkehrszeichen eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 60 bis 120 km/h in 10 km/h-Schritten anzeigen und erstmalig wurden Witterungsbedingungen in einem Steuerungsmodell berücksichtigt.

Als Datenbasis zur Beurteilung der verkehrlichen Wirkungen standen Messungen an zwei Querschnitten über einen Zeitraum von 3 Tagen mit ausgeschalteter und 3 Tagen mit eingeschalteter Anlage zu Verfügung. Die Messzeiträume wurden in einen Zeitraum mit schwierigen, wechselnden Witterungsbedingungen (November) gelegt, um die Wirksamkeit der Anlage zu testen. Dadurch ergaben sich auch Überlagerungen witterungsbedingter Einflüsse auf den Ein-/Aus-Vergleich.

Ein wesentliches Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass bei eingeschalteter Anlage die mittleren Geschwindigkeiten bei gleicher Verkehrsdichte ansteigen. Die Geschwindigkeitsbegrenzungen führen also zu einer Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit. Dies wurde für unterschiedliche Umfeldbedingungen und auf beiden Querschnitten auf allen Fahrstreifen festgestellt (Auszüge für die Ergebnisse bei hell/trocken siehe Tabelle 3-2):

Zustand	Verkehrsdichte in Kfz/km					
	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 25	25-30	30-35
<b>Querschnitt Richtung München (alle Fst.)</b>						
Aus	-	116,2	115,0	111,5	107,5	103,1
Ein	-	117,6	115,1	112,2	110,9	107,0
<b>Querschnitt Richtung Karlsruhe (nur 2. und 3. Fst.)</b>						
Aus	116,3	112,7	109,4	102,5	-	
Ein	114,0	112,3	111,1	107,0	103,7	

**Tabelle 3-2: Vergleich der mittleren Geschwindigkeiten in aus- bzw. eingeschaltetem Zustand für helle, trockene Verhältnisse in Abhängigkeit der Verkehrsdichte (zusammenfassende Darstellung nach ZACKOR und SCHWENZER 1988)**

Es wird von weiteren positiven Auswirkungen bei der Homogenisierung und Stabilisierung des Verkehrsflusses und von einer insgesamt guten Akzeptanz der Geschwindigkeitsbegrenzung berichtet (bei einer Toleranzgrenze von 10 km/h).

Eine weitere Untersuchung analysierte die Entwicklung der Staumeldungen der Autobahnpolizei im Rahmen eines vierjährigen Zeitraums von 1982 bis 1985. Es zeigte sich in der Summe eine Reduktion von Staulänge, Staudauer und Stauhäufigkeit. Dabei wurde versucht, die zahlreichen externen Einflüsse zu berücksichtigen.

### **AUTOBAHNAMT FRANKFURT – Untersuchung der A5 (1990)**

Die Wirkungen der 1989 in Betrieb genommenen Verkehrsbeeinflussungsanlage auf der A5 Bad Homburg – Frankfurt wurden mit einer Vorher-/Nachher-Untersuchung ermittelt. Dazu wurde für einen jeweils einjährigen Vorher- und Nachher-Zeitraum für den Tagverkehr an Werktagen die Entwicklung der mittleren Geschwindigkeiten an jeweils einem Messquerschnitt in nördlicher und südlicher Richtung betrachtet.

Eine Betrachtung des Geschwindigkeitsverhaltens für die verschiedenen Schaltzustände frei, T120, T100 und T80 im Vergleich zum unbeeinflussten Vorher-Zeitraum ergibt als wichtigste Ergebnisse:

- Abnahme der Höchstgeschwindigkeiten ( $v_{85}$ ) und Zunahme der Geschwindigkeiten der langsamen Fahrer ( $v_{15}$ ), also ein gleichmäßigerer und homogenerer Verkehrsfluss, sowie
- bei Annahme einer gewissen Toleranzschwelle gute Befolgung der Geschwindigkeitsbegrenzungen T100 und T120 und eine geringere Befolgung bei T80.

Bedingt durch den langen Untersuchungszeitraum entstand ein starker Einfluss externer Rahmenbedingungen auf den Verkehrsfluss, der zu einem Überlagern der Effekte der Verkehrsbeeinflussungsanlage führte. Daher sind weitere quantitative Aussagen z.B. zur Entwicklung der Leistungsfähigkeit nicht möglich.

Basierend auf diesen Daten finden sich in BALZ (1995) Diagramme zur Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung, die die Homogenisierung des Verkehrsflusses bei hohen Verkehrsbelastungen durch die Anzeige von Geschwindigkeitsbegrenzungen darstellen.

### **STEIERWALD SCHÖNHARTING UND PARTNER / BMW (1994)**

Im Jahr 1994 erfolgte eine Untersuchung zur Wirksamkeit der SBA auf der A9 zwischen München und Nürnberg mittels Auswertung von zahlreichen Messfahrten. Diese Messfahrten teilten sich in 19 Messfahrten im Vorher-Zeitraum 1991 und 33 Messfahrten im Nachher-Zeitraum 1994 auf. Um durch die einzelnen Messfahrten eine Repräsentativität des gesamten Verkehrsablaufs zu erhalten, wurden die Fahrten auf mehrere Tage und unterschiedliche Zeiträume verteilt. Die mittlere Geschwindigkeit wurde in die drei Verkehrsqualitätsstufen „stop & go“, „zähfließend“ und „fließend“ eingeteilt und über alle Fahrten gemittelt (Tabelle 3-3).

In beiden Fahrtrichtungen ergibt sich eine deutliche Verbesserung des Verkehrsflusses, ausgedrückt durch eine Abnahme der Anteile der Fahrten mit stop & go und zähfließendem Verkehr. Darauf basierend wird eine Nutzenabschätzung getroffen.

	Geschwindigkeitsbereich (km/h)		1991 (Vorher)	1993 (Nachher)
Fahrtrichtung Nürnberg	0 – 30	stop & go	22 %	4 %
	30 – 60	zähfließend	8 %	5 %
	60 – 180	fließend	70 %	91 %
Fahrtrichtung München	0 – 30	stop & go	48 %	4 %
	30 – 60	zähfließend	8 %	4 %
	60 – 180	fließend	44 %	92 %

**Tabelle 3-3: Anteile der Testfahrten im Vorher-/Nachher-Vergleich bei der Inbetriebnahme der SBA A9 (STEIERWALD SCHÖNHARTING UND PARTNER/BMW 1994)**

Aufgrund überlagerter externer Effekte (Inbetriebnahme einer Wechselwegweisanlage in diesem Bereich) und möglicher Probleme der statistischen Aussagefähigkeit einzelner Messfahrten müssen die Ergebnisse mit gewisser Vorsicht betrachtet werden.

### **MANGOLD et. al. (1996)**

Eine ausführliche Untersuchung zur Funktionsweise und Zuverlässigkeit von SBA mit Umfelddatenerfassung wurde von MANGOLD et. al. (1996) durchgeführt. Das Ziel der Untersuchung bestand in der Beurteilung der Genauigkeit der Umfelddaten-Messgeräte und der Akzeptanz der erlassenen Schaltzustände durch den Verkehrsteilnehmer.

Ein Teil der Untersuchung befasste sich auch mit den Auswirkungen von Geschwindigkeitsbegrenzungen auf die Leistungsfähigkeit von Strecken. Hierzu wurden an vier SBA verkehrliche Daten in Verbindung mit Umfelddaten und Schaltzuständen aufbereitet. Die Betrachtung erfolgt mittels Pkw-Verkehrsstärken, die aus der Kfz-Verkehrsstärke und einem Aufschlag für den Lkw-Anteil berechnet wurden.

Ein Vergleich der Fundamentaldiagramme des Messquerschnitts an der A5 für die Betriebszustände „frei“ und T120 ergibt eine Dehnung des stabilen Bereich in höhere Verkehrsstärken und –dichten bei Erlass der Begrenzung. Diese Dehnung existiert auch bei T100, restriktivere Begrenzungen bringen keinen weiteren Erfolg. Im Rahmen der Untersuchung wird allerdings kritisch angemerkt, dass die maximale Verkehrsstärke im Zustand „frei“ eigentlich nicht bekannt ist, da oberhalb einer bestimmten Verkehrsstärke die SBA immer Geschwindigkeitsbegrenzungen schaltet.

Ausführliche Untersuchungen zur Akzeptanz ergeben, dass der Befolgungsgrad bei verkehrlich bedingten Schaltungen höher als bei umfelddingten Schaltungen (Regen, Nebel) ist. Die Ursache liegt zum einen in der notwendigen Geschwindigkeitsreduktion durch die verkehrlichen Behinderungen und zum anderen in einem Unterschätzen der Gefahrensituation bei kritischen Umfelddingungen. Insgesamt wird die Akzeptanz mit gut bis befriedigend angegeben (bei Annahme einer Toleranzschwelle von 10 km/h).

**LANGE und STRUIF (1997)**

Im Auftrag des BMV untersuchte der Lehrstuhl für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau der RWTH Aachen das Fahrerverhalten im Bereich von SBA. Als Datengrundlage waren Verkehrsdaten und Schaltprotokolle von 18 Tagen an der SBA A4 Aachen-Köln und von 16 Tagen von der SBA A61 Ertal – Meckenheim vorhanden. Zusätzlich standen bei der A61 noch Verkehrsdaten aus dem Zeitraum vor Inbetriebnahme der Anlage zur Verfügung. Weiterhin wurden noch Nachfolgefahrten und zusätzliche Radarmessungen durchgeführt.

Untersucht wurde das Fahrerverhalten der Verkehrsteilnehmer als Reaktion auf die Anzeigen (Befolgungsgrad). Es zeigt sich bei geringeren Verkehrsstärken eine sehr unterschiedliche Befolgungen der Anzeigen: einige Fahrer befolgen die Anzeigen genau, einige wiederum überhaupt nicht. Bei hohen Verkehrsstärken bremsen jedoch schon wenige Fahrer, die sich an die Anzeigen halten, ganze Fahrzeugpuls ab und erhöhen somit den Gesamt-Befolgungsgrad.

Des weiteren wurden die Reaktionszeiten der SBA auf Verkehrsstörungen und damit die Sinnhaftigkeit der Anzeigen betrachtet. Es zeigen sich einige Unplausibilitäten bei der Anzeige von Geschwindigkeitsbegrenzungen, die insbesondere durch das zu langsame Reagieren der SBA auf Veränderungen im Verkehrsfluss begründet sind. Im Wesentlichen werden die Anzeigen aber als passend beschrieben.

Schließlich wurde die mittlere Geschwindigkeit bei verschiedenen Geschwindigkeitsbegrenzungen betrachtet. Hier zeigt sich eine Abnahme der mittleren Geschwindigkeit beim Schaltzustand T120 um 10 km/h im Vergleich zum Schaltzustand „frei“. Weiterhin wird von Harmonisierungseffekten berichtet.

**HOFFMANN-LEICHTER (1997)**

Die verkehrlichen Auswirkungen des zweiten Bauabschnitts der Streckenbeeinflussungsanlage auf der A5 bei Frankfurt wurden von HOFFMANN-LEICHTER (1997) erforscht. Ziel war die Ermittlung der Wirkungen der SBA bei speziellen Randbedingungen (Tagesbaustellen, Lkw-Überholverbot), die Überprüfung des Steuerungsmodells und die Ermittlung von Reisezeitveränderungen. Da das Untersuchungsprogramm als begleitende Untersuchung zur Inbetriebnahme der Anlage konzipiert wurde, konnten Daten in Form eines Vorher/Nachher-Vergleichs gewonnen werden.

Erhoben wurden:

- Daten von drei Messschleifen in jeder Fahrtrichtung von zwei Werktagen vor Inbetriebnahme (Dez. 1995) und mehreren Werktagen nach Inbetriebnahme (Juni 1996 und November 1996) in Form von 1-Minuten-Intervallen und Einzelfahrzeugen (Zeitlücken)

- Daten von Fahrstreifenwechseln an zwei Werktagen vor bzw. nach Inbetriebnahme der SBA an drei Querschnitten pro Fahrtrichtung (insgesamt Erfassung von fast 50.000 Fahrstreifenwechseln)

Ein Problem bei dem Vorher-/Nachher-Vergleich besteht in den saisonalen Unterschieden des Verkehrsflusses der einzelnen Zeiträume. So nahm von Dezember 1995 bis Juni 1996 die Verkehrsbelastung in Richtung Süden um 12% und in Richtung Norden um 16% zu. Weitere Unterschiede können sich durch verschiedene Witterungsbedingungen ergeben.

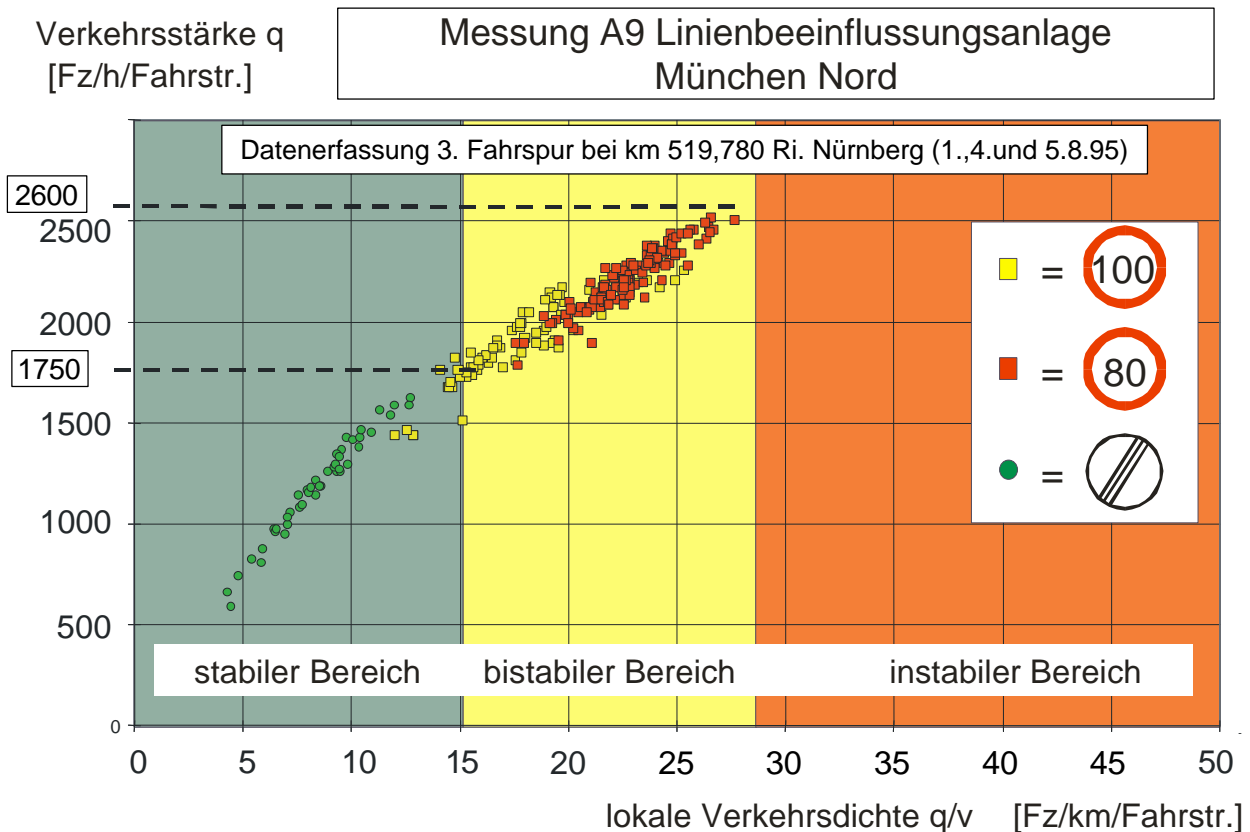
Aus den zahlreichen Einzeluntersuchungen werden hier folgende Ergebnisse wiedergegeben:

- Kaum messbare Unterschiede bei der Auslastung der Fahrstreifen (Betrachtung der prozentualen Verteilung des Verkehrs auf den drei Fahrstreifen)
- keine Veränderung bei der Häufigkeit und Charakteristik von Fahrstreifenwechseln (Auswertung der Videoaufzeichnungen)
- deutliche Reduktion der Standardabweichung (Abnahme der mittl. Standardabweichung Richtung Süden um 44% und Richtung Norden um 34%), besonders deutliche Reduktion bei der Anzeige „Stau“
- uneinheitliche Ergebnisse bei der Entwicklung der gefährlich kurzen Zeitlücken: teilweise ist eine Abnahme feststellbar, teilweise aber auch eine Zunahme. Begründet wird dies damit, dass manche Verkehrsteilnehmer aufgrund der SBA sich zu einer riskanteren Fahrweise verleiten lassen bedingt durch eine Zunahme der subjektiven Sicherheit.
- deutliche Steigerung der empirischen, maximalen Verkehrsstärke auf der südlichen Richtungsfahrbahn von 5.200 Kfz/h auf 5.900 Kfz/h (über 10% Steigerung), keine Veränderung auf der nördlichen Richtungsfahrbahn

### **KÜHNE (1997)**

Im Rahmen einer Untersuchung zur Verkehrsleittechnik-Systemen berichtet KÜHNE (1997) von einer Untersuchung von Messdaten von 3 Tagen in 5-Minuten-Intervallen an einem Querschnitt der SBA A9. Die Unterscheidung der Messwerte im Fundamentaldiagramm nach den Schaltzuständen ergibt ein Ansteigen des stabilen Bereichs bei Geschwindigkeitsbegrenzungen (Abb. 3-11):

Das Fundamentaldiagramm wird in drei Bereiche aufgeteilt: stabiler, bistabiler und instabiler Bereich. Die von der verkehrsabhängigen Geschwindigkeitsbegrenzung ausgehenden Homogenisierungseffekte führen zu einem Ausweiten des stabilen Asts der Punktwolke vom stabilen in den bistabilen Bereich. Dies wird als Erhöhung der Leistungsfähigkeit interpretiert.



**Abb. 3-11:** Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit des Schaltzustands, Messungen auf dem 3. Fahrstreifen der A9 bei München, Fahrtrichtung Nürnberg an 3 Tagen im August 1995 (KÜHNE 1997)

### STÖCKER und TRUPAT (2001)

Auf der äußerst stark belasteten A 40 Bochum – Essen (Ruhrschnellweg) wurde 1998 eine Verkehrsbeeinflussungsanlage in Betrieb genommen. Als Besonderheit wurde zusätzlich zu der SBA an fünf Anschlussstellen eine Zuflussregelung (ZFR) installiert. Für einen kurzen Zwischenraum vor Inbetriebnahme der ZFR konnte die Wirkung der SBA isoliert untersucht werden. Dazu wurden im Form eines Vorher-/Nachher-Vergleich die Messdaten an vier Querschnitten gewonnen (jeweils ein Tag Vorher-Zeitraum und ein Tag Nachher-Zeitraum). Weiterhin wurden Videoaufzeichnungen des Verkehrsgeschehens für einen Zeitraum von einigen Stunden durchgeführt und ausgewertet. Schließlich wurden die regelmäßig vom Verkehrsministerium Nordrhein-Westfalen erfassten Verkehrsstörungen auf Autobahnen über einen Vorher-/Nachher-Zeitraum von jeweils einem halben Jahr ausgewertet.

Eine große Schwierigkeit bei der Untersuchung stellt das Vorhandensein einer Dauerbaustelle in Teilbereichen der SBA im Nachher-Zeitraum dar, was eine erhebliche Einschränkung des betrachteten Datenumfangs bewirkte.

Als Ergebnis der verkehrlichen Untersuchungen ergeben sich bei Betrachtung der Varianz von Verkehrsstärke und Geschwindigkeit deutliche Harmonisierungswirkungen der SBA. Dies spiegelt sich in den Ergebnissen der Videoauswertung wieder, die eine Abnahme der Verkehrsstockungen beschreibt. Die Auswertung der

Störungsmeldungen ergibt bedingt durch die Baustelle im Nachher-Zeitraum ein uneinheitliches Bild. Bei Ausklammern des Baustellenbereichs ergibt sich ein Rückgang der Störungen um 24,5%.

Diese Ergebnisse müssen vor dem Hintergrund des kurzen Zeitraums für verkehrliche Messungen und der Schwierigkeiten des Baustellenbereichs kritisch gesehen werden.

### **STEINHOFF et. al. (2002)**

Ziel der Untersuchung von STEINHOFF et. al. (2002) war, die Wirksamkeit von *präventiven Schaltungen* zu untersuchen. Dabei handelt es sich um Schaltprogramme, die vor dem erwarteten Eintritt einer Störung im Verkehrsfluss aktiviert werden um damit den Verkehrsfluss zu harmonisieren und ein Ausbreiten der Störung zu verhindern. Zur frühzeitigen Erkennung von Störungen ist ein komplexer Algorithmus notwendig, der mit Hilfe bestimmter Kriterien den Verkehrsfluss im Hinblick auf seine Anfälligkeit auf Störungen beurteilen bzw. die Entstehung von Störungen im Ansatz erkennen kann. Die bisherigen Verfahren basieren auf die Messung von Geschwindigkeitsstreuungen und sind in unterschiedlicher Art und Weise an wenigen SBA in Deutschland implementiert.

Verkehrstechnische Untersuchungen basierend auf Datensätze in Minutenintervallen wurden an den drei SBA A8 Ost Brunnthäl – Bad Aibling, A3 Leverkusen – Heumar und A1 Kamen-Schwerte durchgeführt. Bei der A8 Ost wurden zusätzlich Einzelfahrzeugdaten an fünf Messquerschnitten erhoben. Als verkehrliche Kenngrößen wurden Zeitlücken (insbesondere das Time-to-collision-Maß, TTC), Standardabweichungen und Spektralanalysen der Geschwindigkeit durchgeführt. Als Besonderheit wurde eine Methode entwickelt, mit der der systematische Fehler ausgefiltert werden soll, der bei einem Vergleich verschiedener Schaltzustände aufgrund der Unterschiede in der Verkehrsbedingung entsteht. Diese Methode besteht darin, dass basierend auf den Verkehrsdaten im unbeeinflussten Zustand, jeder Verkehrsstärke eine wahrscheinlichste Geschwindigkeit zugeordnet wird.

Als Ergebnisse zeigen sich an allen drei untersuchten Strecken nur eine geringe Akzeptanz der Geschwindigkeitsbeschränkungen. Das Geschwindigkeitsniveau der Verkehrsteilnehmer sinkt nur um 2 km/h pro 10 km/h Senkung der zulässigen Geschwindigkeit. Bei zusätzlicher Anzeige einer Warnung wie „Stau“ oder „Gefahr“ wurde eine bessere Akzeptanz gemessen. Bei der Messung der kritischen Zeitlücke (TTC-Maß) zeigten sich Hinweise für eine Verbesserung der Verkehrssicherheit. Beim Harmonisierungsmaß ergab sich - ausgedrückt durch einen Rückgang der Standardabweichung im Bereich 90 bis 120 km/h - ein harmonischerer Verkehrsfluss. Auch die Spektralanalyse ergab Hinweise, dass vor allem die Schaltung „100 km/h + Überholverbot Lkw“ einen gleichmäßigeren Verkehrsfluss bewirkt.

### 3.2.3 Internationale Forschungsergebnisse

Im folgenden sollen kurz einige Erfahrungen von Wechselverkehrszeichenanlagen auf ausländischen Autobahnen wiedergegeben werden. Die Ergebnisse lassen sich allerdings nur begrenzt auf deutsche Verhältnisse übertragen, da zum einen in allen anderen Ländern eine generelle Geschwindigkeitsbegrenzung auf Autobahnen vorhanden ist und zum anderen Unterschiede in Konzeption und Betrieb der Anlagen bestehen.

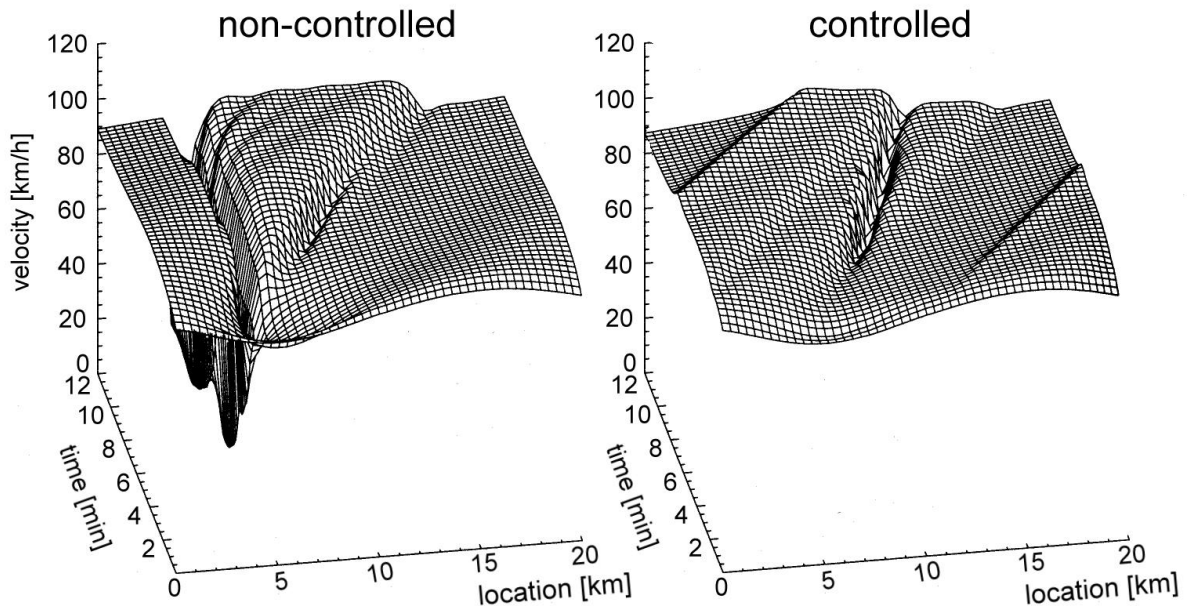
HOOGEDORN (1999) fasst im Rahmen seiner Arbeiten zur Entwicklung eines Verkehrsflussmodells die bisherigen Untersuchungen an Wechselverkehrszeichenanlagen in den Niederlanden zusammen. Diese Zusammenfassung basiert auf sechs Untersuchungen im Zeitraum von 1983 – 1999. Es wird von folgenden Ergebnissen berichtet:

- keine oder nur minimale (1-2%) Steigerung der Kapazität
- Abnahme der Streuung der Geschwindigkeiten, geringfügig gleichmäßigere Verteilung des Verkehrs auf den Fahrstreifen
- deutliche Abnahme der Instabilitäten im Verkehrsfluss, ausgedrückt durch eine erhebliche Abnahme der signifikanten Verkehrszusammenbrüche und der Schockwellen

Begründet werden diese Ergebnisse durch zwei Effekte, die aus dem Erlass der temporären Geschwindigkeitsbegrenzungen resultieren: Zum einen eine Abnahme der sehr hohen Geschwindigkeiten (Homogenisierung des Verkehrsflusses) und zum anderen eine Erhöhung der Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer (psychologischer Effekt). Als Ergebnis entsteht ein Verkehrsfluss, der sich robuster gegenüber Störungen verhält und somit eine höhere Stabilität aufweist.

HOOGEDORN berücksichtigt diese Ergebnisse in seinem Verkehrsflussmodell und simuliert die Auswirkungen einer kleinen Verkehrsstörung im Vergleich für eine unbeeinflusste und eine beeinflusste Strecke (Abb. 3-12). Die Simulation zeigt, dass die rechtzeitige Warnung vor der stromabwärts liegenden Verkehrsstörung eine frühere Anpassung des Verhaltens der Verkehrsteilnehmer bewirkt. Aufgrund der verhaltenen Fahrweise schaukelt sich die Verkehrsstörung nicht weiter auf und ein vollständiger Zusammenbruch in den Stauzustand wird vermieden. Es ergibt sich eine deutliche Steigerung der Durchschnittsgeschwindigkeiten von Pkw und Lkw und dementsprechend deutliche Reisezeitersparnisse.





**Abb. 3-12:** Räumlich-zeitliche Betrachtung des Geschwindigkeitsniveaus auf dem rechten Fahrstreifen beim Auftreten einer Störung im Verkehrsfluss (Ergebnisse einer Simulation für die beiden Betriebszustände „unbeeinflusst“ bzw. „beeinflusst“, HOOGEDORN 1999)

Die Ergebnisse einer Untersuchung der Wechselverkehrszeichenanlage auf der Ringautobahn um London (M25 Controlled Motorway) finden sich in einem Bericht des TRANSPORTATION RESEARCH LABORATORY (TRL 1997). Bei dieser Untersuchung wurden Verkehrsdaten einer 12-monatigen Nachher-Periode mit Streckenbeeinflussungsanlage mit einer 5-monatigen Vorher-Periode ohne Anlage erfasst und verglichen.

Folgende Ergebnisse zeigten sich:

- Zunahme der Verkehrsstärke auf dem vorher wenig ausgelasteten rechten Fahrstreifen um 15%, also eine deutlich bessere Verteilung des Verkehrs (vierstreifiger Querschnitt)
- gleichmäßigere Verteilung der Zeitlücken
- Aufnahme eines Verkehrszuwachses von bis zu 3,7% im Untersuchungszeitraum ohne Zunahme der Störungen
- keine signifikanten Unterschiede bei der Spitzenverkehrsstärke
- geringe Abnahme der Instabilitäten (Verkehrszusammenbrüche)

### 3.2.4 Bewertung des Forschungsstands und Ableitung des Forschungsbedarfs

Im Unterschied zu den umfassenden Untersuchungen zur Entwicklung der Unfallzahlen liegen zu den Auswirkungen von SBA auf den Verkehrsablauf eher sporadische Einzeluntersuchungen vor. Diese Untersuchungen berichten übereinstimmend von Harmonisierungswirkungen und von der Abnahme von Stauzuständen. Bei den

Aussagen zu einer Änderung der Kapazität bzw. der Leistungsfähigkeit der Strecke finden sich wenig gesicherte Ergebnisse. In wenigen Untersuchungen wird von einer Steigerung berichtet, die meisten Untersuchungen geben dazu aber keine Auskunft. Hinzu kommt, dass die grundlegende Untersuchung hierzu von ZACKOR (1972) bereits 30 Jahre alt ist, und somit fraglich ist, ob diese angesichts der inzwischen veränderten Motorisierung und des Fahrverhaltens noch gültig ist. Zu dieser Fragestellung gibt es wenig Aussagen, da sich die meisten Forschungsarbeiten auf die Untersuchung der Harmonisierungswirkungen konzentrierten, mit dem Ziel, die Abnahme der Unfallzahlen zu erklären.

Fast überhaupt keine Erkenntnisse liegen zur Frage der Stabilität des Verkehrsflusses an SBA vor. In verschiedenen Untersuchungen wird dieser Aspekt zwar erwähnt und ein festgestellter Rückgang von Stauzuständen mit einer Stabilisierung des Verkehrsflusses durch die SBA begründet. Es fehlt bislang aber der Nachweis mittels einer objektiven Methode, dass dieser Rückgang auf die Stabilisierung zurückzuführen ist.

Zur Beurteilung der Repräsentativität der Untersuchungen muss die Länge des Untersuchungszeitraums und die Anzahl der untersuchten Querschnitte betrachtet werden. Bei der Länge des Untersuchungszeitraums existieren große Unterschiede, die von einzelnen Tagen bis zu einem Jahr reichen. Bei den Untersuchungen mit nur wenigen einzelnen Tagen ist die statistische Aussagefähigkeit gering. Auch bei der Anzahl der untersuchten Querschnitte finden sich große Unterschiede, die von einem Querschnitt bis zu einer ganzen Strecke reichen.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass erheblicher Forschungsbedarf vorhanden ist bei den Fragestellungen nach den Auswirkungen auf die Kapazität und die Leistungsfähigkeit einer Strecke bzw. auf die Stabilität des Verkehrsflusses. Für den Bereich der Harmonisierungswirkungen liegen gute Erkenntnisse vor, so dass dies nur im Hinblick auf die Erklärungsgrundlage für entdeckte Effekte im Verkehrsfluss weiter erforscht wird.

Aus den bisherigen Forschungsarbeiten muss die Erfahrung berücksichtigt werden, dass erhebliche Schwierigkeiten bestehen, aus den zahlreichen Einflüssen auf den Verkehrsablauf die spezifischen Wirkungen der SBA abzugrenzen. Bei den Vorher-Nachher-Vergleichen stellte sich das Problem, dass die Randbedingungen über den Untersuchungszeitraum nicht hinreichend konstant waren. Bei den Untersuchungen, die Messdaten nur für den Zeitraum nach der Installation der SBA zur Verfügung hatten, stellte sich das Problem, dass kein Referenzfall für einen Vergleich zur Verfügung stand.

## 4 UNTERSUCHUNGSMETHODIK UND DATENGRUNDLAGE

### 4.1 Untersuchungsziel

Zur Beurteilung von Investitionen stehen verschiedene standardisierte Verfahren zur Verfügung, die Nutzen und Kosten einer Maßnahme ermitteln und bewerten (Kosten-Nutzen-, Kosten-Wirksamkeits- oder Nutzwertanalyse, Kostensummen-, Nutzen-Kosten-Differenz- oder Rentabilitätskriterium). Im Rahmen dieser Untersuchung soll die Bewertung in Form einer Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt werden, d.h. der Nutzen einer Maßnahme wird mit den zu erwartenden Kosten ins Verhältnis gesetzt. Als *Kosten* werden die Investitionskosten und die laufenden Kosten einer Maßnahme, in diesem Fall also der Bau und Betrieb einer SBA, bezeichnet. Alle weiteren Wirkungen der Maßnahme werden als *Nutzen* bezeichnet. Dieser Nutzen kann positiv (Gewinne) und negativ (Verluste) auftreten.

Während die Investitionskosten für Bau und Betrieb mit einfachen Methoden genau ermittelt werden können, sind zur Ermittlung des Nutzens komplexe Betrachtungen notwendig. Um einen Vergleich und eine Dringlichkeitsreihung von Maßnahmen zu ermöglichen, wird im Bereich des Straßenverkehrs in Deutschland ein einheitliches Bewertungsschema verwendet, die EMPFEHLUNG FÜR WIRTSCHAFTLICHKEITSUNTERSUCHUNGEN (EWS), Stand 1997.

Gemäß EWS stellen die wesentlichen Nutzenkomponenten bei Investitionsentscheidungen Veränderungen in folgenden Bereichen dar:

- 1) Betriebs- und Zeitkosten der Verkehrsteilnehmer
- 2) Lärm-, Schadstoff- und Klimabelastungen
- 3) Unfallgeschehen

Zur Ermittlung dieser Nutzenkomponenten bietet die EWS ein Mengengerüst (quantitative Vorgaben zur Ermittlung der Mengen) und ein Wertegerüst (Vorgaben zur Bewertung der ermittelten Veränderungen) an. Beide Gerüste werden im Rahmen dieser Forschungsarbeit verwendet, da sie in Deutschland die am häufigsten verwendeten Grundlagen zu Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen im Straßenbau darstellen.

Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Untersuchung der ersten beiden Nutzenkomponenten, wobei der Schwerpunkt auf der Ermittlung der Zeitkosten der Verkehrsteilnehmer liegt, da hier die größten Effekte vermutet werden. Das Unfallgeschehen soll nicht Gegenstand der Untersuchungen sein, hierzu liegen ausreichend gesicherte Erkenntnisse vor.

## 4.2 Untersuchungsmethodik

Im Hinblick auf das Forschungsziel werden die Veränderungen des Verkehrsflusses untersucht, die sich aus der Errichtung einer SBA ergeben und die sich im Hinblick auf die Nutzenkomponenten auswirken. Die Untersuchungsmethodik muss in der Lage sein, diese Effekte zu erfassen und zu quantifizieren.

Gemäß den Erfahrungen aus früheren Untersuchungen können SBA den Verkehrsfluss in den Bereichen Kapazität und Leistungsfähigkeit der Strecke und Harmonisierung und Stabilisierung des Verkehrsflusses beeinflussen (siehe Literaturlauswertung in Kapitel 3.2.2 und 3.2.3).

Basierend auf diesen Erkenntnissen werden folgende Bereiche untersucht:

- Kapazität und Leistungsfähigkeit einer Strecke

Schon kleine Steigerungen der Kapazität oder Leistungsfähigkeit einer Strecke würden einen deutlichen Nutzen darstellen, da Stauzustände reduziert und damit erhebliche Zeitverluste für die Verkehrsteilnehmer und erhöhte Emissionen der Fahrzeuge vermieden werden können.

Zur Untersuchung von Kapazitäts- bzw. Leistungsfähigkeitssteigerungen stehen standardmäßig angewandte Methoden zur Verfügung. Die Kapazität kann durch die maximale Verkehrsstärke oder durch modelltechnische Abbildungen und die Leistungsfähigkeit durch die Bestimmung von q-v-Funktionen ermittelt werden. Für eine detaillierte Ermittlung der Wirkungen kann dies für unterschiedliche Zeitintervalle, Schaltzustände, Verkehrs- und Umfeldbedingungen geschehen.

- Harmonisierung des Verkehrsflusses

Ein harmonischerer Verkehrsfluss würde für die Verkehrsteilnehmer auch bei gleichbleibender Reisezeit eine Verbesserung im Sinne eines angenehmeren Verkehrsablaufs bedeuten. Diese subjektive Komponente wird in dem EWS-Bewertungsschema nicht berücksichtigt und dann daher nicht in einen monetären Nutzen überführt werden. Die Untersuchung von Harmonisierungswirkungen soll im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden, um Erklärungsgrundlagen für evtl. festgestellte höhere Kapazitäten oder Leistungsfähigkeiten zu erhalten.

Für die Untersuchung von Harmonisierungswirkungen gibt es keine standardmäßig verwendeten Methoden. Die Harmonisierung kann mittels Betrachtung der zeitlichen Schwankungen im Verkehrsfluss (z.B. Standardabweichung der Geschwindigkeiten) oder mittels räumlicher Betrachtung (z.B. Fahrstreifenauslastung) erfolgen. Dies kann ebenfalls für unterschiedliche Zeitintervalle, Schaltzustände, Verkehrs- und Umfeldbedingungen geschehen.

- Stabilisierung des Verkehrsflusses

Aussagen zur Stabilität eines Verkehrsflusses wurden in bisherigen Forschungsergebnissen mehr durch subjektive Beurteilungen gegeben als durch Verwendung objektiver Kenngrößen. Im Rahmen dieser Untersuchung wird basierend auf frühere Forschungsarbeiten eine Methode zur Bestimmung der Stabilität des Verkehrsflusses durch Ermittlung von Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten entwickelt.

Die genaue Ausgestaltung der jeweiligen Untersuchungsmethodik ist in den Kapiteln 5 bis 8 näher beschrieben.

An dieser Stelle eine kurze Übersicht über die wichtigsten Untersuchungsmethoden:

Betrachter Aspekt	Methodik	Betrachtung von ...
Kapazität	max. Verkehrsstärken	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1-, 5-, 15- und 60-Minuten-Intervalle</li> <li>• verschiedenen Schaltzuständen</li> <li>• Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung</li> </ul>
Leistungsfähigkeit	Modellierung des Verkehrsflusses (q-v-Funktionen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1-, 5-, 15- und 60-Minuten-Intervalle</li> <li>• lineare bzw. quadratische Funktion im stabilen und nichtlinearer Zeitlückenansatz im instabilem Bereich</li> </ul>
Harmonisierung	zeitliche Betrachtung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrstreifenauslastung</li> <li>• Geschwindigkeitsdifferenzen</li> <li>• Verteilung des Lkw-Verkehrs</li> </ul>
	räumliche Betrachtung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geschwindigkeitsdifferenzen</li> <li>• Standardabweichungen</li> </ul>
Stabilisierung	Zusammenbruchswahrscheinlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ermittlung der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit</li> </ul>

**Tabelle 4-1: Übersicht über die verwendete Untersuchungsmethoden zur Analyse der Auswirkungen von SBA auf den Verkehrsfluss**

### 4.3 Entwurf des Mess- und Auswertekonzepts

Die empirische Methode zur Bestimmung der Auswirkungen von SBA auf den Verkehrsfluss besteht in der Betrachtung von *Mit-Ohne-Vergleichen*. Diese stellen eine geeignete Untersuchungsmethode dar, wenn sich zwischen den beiden untersuchten Bereichen nur der Einflussfaktor ändert, der von dem untersuchten Objekt (also der SBA) verursacht wird, und alle anderen Einflussfaktoren konstant bleiben.

An dieser Stelle sei an die drei Kategorien der Einflüsse auf den Verkehrsablauf erinnert (Kapitel 3.1.3): Wegbedingungen, Umfeldbedingungen und Verkehrsbedingungen. Die Realisierung konstanter Randbedingungen in all diesen Bereichen ist in der Praxis nicht möglich. Hinzu kommen die stochastischen Eigenschaften des Verkehrsflusses, die bewirken, dass sich der Verkehrsfluss auch bei identischen Randbedingungen unterschiedlich verhalten kann. Dieser Problematik kann mit der Untersuchung genügend großer Datenmengen (statistische Absicherung) begegnet werden. Der Frage nach der Konstanz der Randbedingungen kommt im Hinblick auf die Interpretation der Auswertung von Messergebnissen eine große Bedeutung zu. Um diese Konstanz im Rahmen eines Mit-Ohne-Vergleichs zu erhalten, gibt es folgende Methoden:

- „idealer“ Mit-Ohne-Vergleich

Hierzu werden Messdaten verglichen, die an dem gleichen Querschnitt (Konstanz der Wegbedingung) und innerhalb eines engen Zeitraums erfasst wurden (Konstanz von Umfeld- und Verkehrsbedingungen). Dies ist nur mit einem im voraus definierten und vom Betreiber der SBA realisierten Untersuchungsprogramm realisierbar, bei dem z.B. im Tages- oder Stundenrhythmus oder nach einem Zufallsmuster verschiedene Schaltzustände unabhängig vom Verkehrsfluss angezeigt werden. Die Durchführung eines derartigen Messprogramms könnte Probleme bei der Akzeptanz durch die Verkehrsteilnehmer verursachen und erscheint daher unrealistisch.

- „unechter“ Mit-Ohne-Vergleich

In einigen Untersuchungen (ZACKOR 1972, BODE und HALLER 1983, KÜHNE 1997) werden Fundamentaldiagramme oder q-v-Funktionen für verschiedene Schaltzustände (Geschwindigkeitsbegrenzungen) einer SBA angegeben. Diese sind allerdings während des Automatikbetriebs der Anlage erfasst worden, d.h. in Abhängigkeit des Verkehrszustands hat die SBA die Schaltzustände ausgewählt. Diese Vergleichsmethodik unterliegt dem Problem, dass nicht gesagt werden kann, ob der Schaltzustand den Verkehrszustand erzeugt hat, oder ob umgekehrt der Schaltzustand aufgrund des Verkehrszustands von dem Steueralgorithmus ausgewählt wurde. Anders gesagt: die Konstanz der Verkehrsbedingungen ist bei diesen Vergleichen nicht gegeben. Als weiteres Problem liegen die Messwerte oberhalb bestimmter Verkehrsstärken nicht mehr im unbeeinflussten Zustand vor.

- Vorher-Nachher-Vergleich

Ein Sonderfall des Mit-Ohne-Vergleichs stellt der *Vorher-Nachher-Vergleich* dar. Hierbei werden Daten vor Inbetriebnahme der SBA mit den Daten nach der Inbetriebnahme verglichen. Diese Untersuchungen können nur dann durchgeführt werden, wenn die Vorher-Daten archiviert werden. Dies traf bislang nur in den wenigen Fällen zu, bei denen schon im Vorfeld der Inbetriebnahme der SBA ein Forschungsprogramm feststand. Mit dieser Methodik konnten erfolgreich Effekte festgestellt und beurteilt werden (HOFFMANN-LEICHTER 1997; STÖCKER und TRUPAT 2001). Allerdings ergaben sich in beiden Untersuchungen erhebliche Probleme durch Veränderung der Wegbedingungen (Baustelle), Verkehrsbedingungen (Verkehrszunahme) und Umfeldbedingungen (Winter/Sommer). Durch den langen Zeitraum der Gesamtbeobachtung ist es schwierig, die Konstanz von Weg-, Umfeld- und Verkehrsbedingungen einzuhalten.

- Mit-Ohne-Vergleich (verschiedene Querschnitte)

Eine weitere Möglichkeit, einen Vergleich zu bilden, besteht in der Erfassung von Daten an verschiedenen Querschnitten, von denen ein Teil mit einer SBA ausgestattet ist und ein Teil nicht. Damit ist allerdings eine Konstanz von allen Einflussfaktoren der Weg-, Umfeld- und Verkehrsbedingungen nicht mehr gegeben. Eine Gleichartigkeit der Umfeldbedingungen kann erreicht werden, wenn zur gleichen Zeit Daten an örtlich sehr nahe liegenden Strecken gewonnen werden (z.B. eine Strecke, an der eine Richtungsfahrbahnen mit einer SBA ausgestattet ist, die andere aber nicht). Durch gezieltes Auswählen aus einer Vielzahl von Querschnitten kann auch eine gewisse Gleichartigkeit der Wegbedingungen und Verkehrsbedingungen erreicht werden.

### **Auswahl der Untersuchungsmethodik**

Alle vier verschiedenen Vergleichsmethoden besitzen spezifische Vor- und Nachteile im Hinblick auf die Schwierigkeit der Datenbeschaffung und die Aussagefähigkeit der Daten. Schon im Vorfeld des hier bearbeiteten Forschungsprojekts stand fest, dass die bestmögliche Vergleichsmethode, der „ideale Mit-Ohne-Vergleich“, aufgrund des großen Aufwands und der Schwierigkeiten bei der Durchführung der Versuchsreihe im Rahmen dieses Forschungsprojekts nicht gewählt werden konnte. Daher wurde die Beschaffung von Daten in Form eines „Vorher-Nachher-Vergleichs“ angestrebt, was allerdings wegen Problemen der Datenverfügbarkeit nicht gelang. Ersatzweise wurden daher Daten in Form des „Mit-Ohne-Vergleichs verschiedener Querschnitte“ und des „unechten Mit-Ohne-Vergleichs“ gewonnen. Die Vergleichsmöglichkeiten sind in Kapitel 4.6 näher beschrieben.

## 4.4 Datenerfassung und Datenaufbereitung

### 4.4.1 Auswahl von Strecken und Zeiträumen

Um repräsentative Ergebnisse zu erhalten, wurden Daten von möglichst vielen und von der Charakteristik unterschiedlichen Streckenbeeinflussungsanlagen beschafft. Es sollten zumindest die Fälle

- 2- bzw. 3-streifige Fahrbahn und
- Lage im Ballungsraum oder an der Verbindungsstrecke

abgedeckt werden. Da im Rahmen des Betriebs von SBA Mess- und Umfelddaten laufend erfasst werden, konnte auf eigene Messungen verzichtet werden. Stattdessen wurden die im laufenden Betrieb erfassten und archivierten Daten beschafft. Damit gelang das Sammeln einer wesentlich größeren Datenmenge, als mit der Durchführung eines eigenen Messprogramms möglich gewesen wäre.

Die Beschaffung der Daten unterlag zum Teil großen Schwierigkeiten. Ältere Anlagen (z.B. die SBA A8 Hohenstadt-Riedheim bei Ulm) zeichnen die Daten mit einem veralteten Großrechnersystem auf und eine Konvertierung in gängige Rechnerformate ist nur mit unverhältnismäßigem Aufwand möglich. Bei anderen Anlagen müssen - bedingt durch eine geringe Kapazität des Speichermediums - die Daten in einem täglichen Rhythmus vor Ort abgefragt werden, was den Erfassungszeitraum einschränkt. Am komfortabelsten stellen sich die modernen SBA der Verkehrsrechnerzentrale Südbayern dar, deren Daten an einer Zentrale erfasst und auf CD-ROM einheitlich abgespeichert werden können. Dadurch kann mit vertretbarem Aufwand eine erhebliche Menge an Verkehrsdaten beschafft werden.

Die Auswahl der Strecken geschah unabhängig von den Schwierigkeiten der Datenbeschaffung nach den Kriterien der repräsentativen Abdeckung der Streckentypen und nach der Datenverfügbarkeit. Insgesamt konnten Daten von acht SBA und einer Referenzstrecke beschafft werden (Tabelle 4-2).

Die Aufzeichnung der Verkehrsdaten an SBA erfolgt in Minutenintervallen (Kapitel 2.3.2). Gemäß TLS werden die mittleren Geschwindigkeiten und Verkehrsstärken für Pkw und Lkw sowie die drei weiteren Kenngrößen mittlerer Belegungsgrad, mittlere Zeitlücke zwischen den Fahrzeugen und die Standardabweichung der Geschwindigkeiten je Fahrstreifen aufgezeichnet. Weiterhin werden die Anzeigedaten der Wechselverkehrszeichen (der *Schaltzustand*) und zum Teil Umfelddaten aufgezeichnet. Größere SBA besitzen über 100 Mess- und 50 Anzeigequerschnitte. Daraus wird ersichtlich, dass schon in relativ kurzen Zeiträumen enorme Datenmengen entstehen (an der SBA A9 z.B. pro Tag über 100 Megabyte). Diese großen Datenmengen führen zu einer Begrenzung der abgerufenen und abgespeicherten Daten auf einen Zeitraum von einigen Tagen bis wenigen Wochen.



	SBA	Fst.	Lage <sup>1)</sup>	Topografie	Typ <sup>2)</sup>
A4	Leutratal	2	B	hügelig	mit SBA
A8	Grabenstätt - Grenze	2	V	hügelig	mit SBA
A9	München - Holledau	3	B/V	eben	mit & ohne SBA <sup>3)</sup>
A44	Dortmund - Soest	2	B	eben	mit & ohne SBA
A61	Erfstal – Meckenheim <sup>4)</sup>	2	B	teilw. hügelig	mit SBA
A94	Steinh. - Parsdorf	2-3 <sup>5)</sup>	B	eben	mit SBA
A99/A8	Brunnthal - Bad Aibling	3	B/V	teilw. hügelig	mit & ohne SBA
A8/A99	Eschenrieder Spange	2/3	B	eben	mit & ohne SBA
A99/A8	Erweit. Münch. Ring	3	B	eben	mit SBA
A8	Ulm - München	2	B/V	teilw. hügelig	ohne SBA
<p>1) V = Verbindungsstrecke, B = Ballungsraum</p> <p>2) „mit SBA“: alle Messquerschnitte in Bereichen mit SBA          „mit &amp; ohne SBA“: teilweise Messquerschnitte in Bereichen mit und ohne SBA          „ohne SBA“: alle Messquerschnitte in Bereichen ohne SBA (Referenzdaten)</p> <p>3) ohne SBA- Querschnitte teilweise mit verkürztem Zeitraum (9 statt 14 Tage)</p> <p>4) die Daten dieser Strecke stellten sich beim Aufbereiten als unbrauchbar (defekt) dar</p> <p>5) 2-3 Fst: temporäre Standstreifenfreigabe</p>					

**Tabelle 4-2: Übersicht über die betrachteten Strecken (eine ausführlichere Beschreibung der Strecken mit Lageplan siehe Anhang)**

Allerdings führte nicht die begrenzte Leistungsfähigkeit heutiger Rechner zu einer Limitierung der aufbereiteten und untersuchten Datenmenge, sondern die Notwendigkeit, das Datenmaterial (im Extremfall manuell, Kapitel 4.4.2) auf Plausibilität zu prüfen und zu interpretieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurden im Regelfall Daten über einen 14-Tages-Zeitraum im Sommer 2000 beschafft und aufbereitet. Dieser Zeitraum stellte sich als Kompromiss zwischen statistischer Aussagefähigkeit (20.160 Minutenintervalle) und Handhabbarkeit dar. Der Sommerzeitraum ist ein günstiger Untersuchungszeitraum im Hinblick auf die Umfeldbedingung, da der Verkehrsfluss überwiegend bei den Bedingungen „hell und trocken“ untersucht werden kann. Er hat als weiteren Vorteil die starke Verkehrsbelastung von Fernverkehrsstrecken durch Urlauberverkehr. Der Hauptnachteil ist das Fehlen von Verkehrsspitzen im reinen werktäglichen Berufsverkehr, bei dem bekanntermaßen kurzzeitig die höchsten maximalen Verkehrsstärken erreicht werden.

Eine Beschreibung der einzelnen Strecken im Hinblick auf topografische und verkehrliche Verhältnisse sowie detaillierte Angaben zur Lage der Messquerschnitte finden sich im Anhang. Im folgenden wird zur Bezeichnung der Querschnitte häufig ein Kürzel verwendet, das sich aus der Fahrtrichtung und der Nummer des Querschnitts ergibt, die die SBA intern für ihren Betrieb verwendet. So steht das Kürzel

„A9 - 316 Nbg“ für den Querschnitt auf der A9 in Fahrtrichtung Nürnberg, der innerhalb der Systemarchitektur der SBA mit der Nummer 316 bezeichnet wird. Diese Kürzel werden bei der Bezeichnung der Querschnitte in den Lageplänen des Anhangs verwendet.

#### 4.4.2 Erstellung der Datenbank und Plausibilitätskontrolle der Daten

Die beschafften Daten lagen meistens im ASCII-Format vor und mussten in ein für die Auswertung geeignetes Format umformatiert werden. Dies erfolgte unter Verwendung der Datenbank MS-Access. Im nächsten Schritt wurden aus den fahstreifenbezogenen Daten die Kenngrößen für die Richtungsfahrbahn mit Hilfe des harmonischen (reisezeittreuen) Mittelwerts berechnet (in Abhängigkeit der Fahrestreifenanzahl als Mittelwertbildung über zwei bzw. drei Fahrestreifen). Schließlich wurde über die Fundamentalbeziehung aus der gemessenen Verkehrsstärke und Geschwindigkeit die Verkehrsdichte berechnet.

Nach Durchführung dieser Bearbeitungsschritte ergaben sich Datenbanken mit folgender Struktur und Inhalt:

Variable	Erläuterung
<b>gemessene Originaldaten (pro Fahrestreifen)</b>	
Datum, Uhrzeit	Zeitstempel des Messintervalls
$Q_{Kfz}$ (li., mi. re.)	Anzahl Kfz pro Minute
$Q_{Lkw}$ (li., mi. re.)	Anzahl Lkw pro Minute (>3,5 t)
$V_{Pkw}$ (li., mi. re.)	mittlere Pkw-Geschwindigkeit
$V_{Lkw}$ (li., mi. re.)	mittlere Lkw-Geschwindigkeit
Lücke, Belegung, Standardabw.	Messwerte gemäß TLS
<b>berechnete Kenngrößen (pro Fahrestreifen)</b>	
$V_{Kfz}$	mittlere Kfz-Geschwindigkeit
$k_{Kfz}$	mittlere Kfz-Dichte
<b>berechnete Kenngrößen (Mittelwerte für die Richtungsfahrbahn)</b>	
$Q_{Kfz}$	Anzahl Kfz pro Minute
$Q_{Lkw}$	Anzahl Lkw pro Minute (>3,5 t)
$V_{Pkw}$	mittlere Pkw-Geschwindigkeit
$V_{Kfz}$	mittlere Kfz-Geschwindigkeit
$k_{Kfz}$	mittlere Kfz-Dichte

**Tabelle 4-3: Struktur und Inhalt der erstellten Datenbanken für die Verkehrsdaten**

Pro Messquerschnitt liegt für die Verkehrsdaten typischerweise ein derartig aufgebauter Datensatz mit 20.160 Zeilen (14 Tage \* 24 h \* 60 min) vor.

Während der Aufbereitung wurden grobe Unstimmigkeiten oder Lücken in den Messwerten automatisch ausgefiltert (z.B. unrealistische Geschwindigkeiten und

Verkehrsstärken). Häufig fehlten einzelne Minutenintervalle. Dieses Problem entsteht durch die gelegentliche Überlastung der Datenübertragungssysteme während des Betrieb an manchen SBA.

Die Aufbereitung der Schaltzustände und –gründe gestaltete sich erheblich schwieriger, da die Anzeigen im Sekundenrhythmus wechseln können. Die SBA zeichnen zur Verringerung der Datenmenge die Schaltzustände nicht für jede Sekunde auf, sondern nur bei jedem Wechsel. Um eine Verknüpfung der Verkehrsdaten mit den Schaltzuständen zu bekommen, mussten die Schaltzustände den Minutenintervallen zugeordnet werden. Für diese Zuordnung wurde ein Algorithmus programmiert, der bei mehreren Schaltintervallen pro Minutenintervall den am längsten andauernden Schaltzustand dem Minutenintervall zuweist. Streng genommen ergibt sich hierbei eine gewisse Verfälschung, da im Laufe eines derartigen Minutenintervalls ein Mischzustand vorliegt. Aufsummiert über den gesamten Datenbestand treten solche Fälle aber sehr selten auf und erzeugen deshalb keine Verfälschung der Untersuchungen.

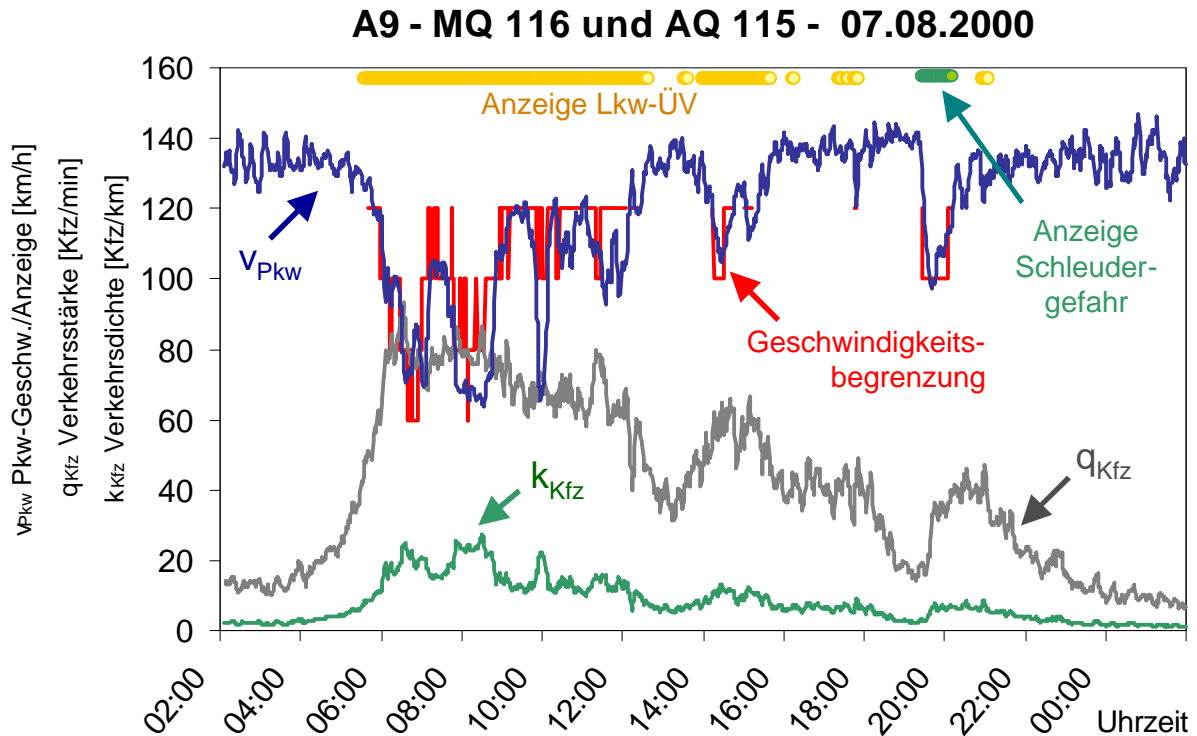
In Analogie zu den Verkehrsdaten ergibt sich für die Datenbank mit den Schaltdaten folgende Struktur und Inhalte:

<b>Anzeigedaten der Wechselverkehrszeichen</b>	
Datum, Uhrzeit	Zeitstempel des Messintervalls
A_Signal	Anzeige des WVZ Typ A (Geschwindigkeitsbegr. T120, T100, T80 und T60)
B_Signal	Anzeige des WVZ Typ B (verkehrliche Gebote wie Lkw-Überholverbot, Schleudergerfahr, Gefahr, Staugefahr)
C_Signal	Anzeige des WVZ Typ C (Text-Zusatz, z.B. „STAU“, „NEBEL“ und „UNFALL“)
<b>Umfelddaten und Schaltgrund</b>	
A_Schaltgrund B_Schaltgrund C_Schaltgrund	Ursache für Schaltung, z.B. Harmonisierungsprogramm, Nebelwarnung oder Trichterschaltung
A_Situation B_Situation C_Situation	Angabe des Umfeldes, z.B. Sichtweite

**Tabelle 4-4: Struktur und Inhalt der erstellten Datenbanken für die Schaltzustände**

Datenausfälle bei der Aufzeichnung der Schaltzustandswechsel ziehen wesentlich schwerwiegendere Konsequenzen nach sich als beim Ausfall eines Minutenintervalls bei den Verkehrswerten, da allen folgenden Intervallen der letzte bekannte Schaltzustand zugeordnet wird. Hier könnte ein einzelner fehlender Wechsel eine

große Datenmenge verfälschen. Ein derartiger Fehler ist mit einem automatisch arbeitenden Algorithmus zur Fehlererkennung nicht erkennbar. Daher wurden alle aufbereiteten Schaltzustände mit den Verkehrsdaten verknüpft und in Form von Ganglinien für den gesamten Zeitraum anschaulich dargestellt und augenscheinlich auf Plausibilität geprüft.



**Abb. 4-1: Plausibilitätskontrolle der aufbereiteten Verkehrs- und Schaltzustandsdaten mittels Tagesganglinien**

Abb. 4-1 zeigt den Datensatz eines Anzeigequerschnitts im Vergleich mit den Messdaten eines 2 km stromabwärts liegenden Querschnitts an einer dreistreifigen Richtungsfahrbahn über die Länge eines Tages. Man erkennt, dass keine Datenlücken oder implausible Schalt- oder Verkehrsdaten vorliegen. Die mittels dieser direkten Betrachtung erkannten implausiblen Anzeigezustände an manchen Querschnitten wurden von den weiteren Auswertungen ausgeschlossen.

## **4.5 Auswertekonzept**

### **4.5.1 Auswahl geeigneter Querschnitte**

Die erfassten und aufbereiteten Daten konnten nicht in allen Aspekten ausgewertet werden. Dies liegt zum einen an systembedingten Grenzen, wie begrenzte Speicherkapazität und Rechenleistung der Auswertungscomputer. Zum anderen bereitet es erhebliche Schwierigkeiten, die große Anzahl von Einzelergebnissen zu interpretieren, die bei einer vollständig automatisierten Auswertung einer derartig umfangreichen Datenbasis erzeugt werden.

Eine möglichst vollständige Auswertung der erfassten Daten ist allerdings auch nicht notwendig, da sie nicht zwangsläufig zu weiteren Erkenntnissen führt. Dies ist z.B. bei dicht aufeinander folgenden Messquerschnitten der Fall, deren Randbedingungen sich nicht unterscheiden. Hier reicht die Auswertung eines repräsentativ ausgewählten Querschnitts aus. Ein weiterer Ausschlussgrund bei der Auswahl geeigneter Querschnitte ist die Frage, ob ein Querschnitt verkehrlich überlastet ist und damit überhaupt erst Aussagen zur Kapazität ermöglicht.

Damit ergibt sich eine Auswahlmethodik für geeignete Untersuchungsquerschnitte nach zwei Kriterien: Auswahl anhand des Lageplans und Auswahl anhand der Verkehrsverhältnisse mittels Erstellung eines q-v-Diagramms.

#### **Auswahl anhand des Lageplans**

Um in einer möglichst frühen Stufe die zu bearbeitende Datenmenge einzuschränken, wurde beim Einlesen der Rohdaten in die Datenbank eine Querschnittsauswahl anhand des Lageplans vorgenommen. Den Lageplänen im Anhang kann die Lage der Messstellen der jeweiligen Strecken entnommen werden. Insbesondere in baulich und verkehrlich gleichartigen Abschnitten wurde aus mehreren Messquerschnitten ein repräsentativer Querschnitt ausgewählt (z.B. ein zentral liegender oder ein von störenden Anschlussstellen möglichst weit entfernt liegender MQ). Weiterhin wurden Querschnitte mit schon im voraus vermuteter geringer Verkehrsbelastung ebenfalls weggelassen. Durch die Auswahl anhand des Lageplans ergibt sich eine Reduktion der ursprünglich 244 auf 86 Messquerschnitte.

#### **Auswahl mittels q-v- und Fundamentaldiagrammen**

Um die Verkehrsverhältnisse an einem Querschnitt zu beurteilen wurden q-v-Diagramme erstellt. Damit konnten verkehrlich nicht überlastete Querschnitte aussortiert werden, da sie keine Aussage zur Kapazität beitragen (Erläuterung der Vorgehensweise siehe Kapitel 5.1). Mittels dieser Auswahl ergab sich eine weitere Reduktion der Anzahl der Messquerschnitt von 86 auf 70 Messquerschnitte.

## 4.5.2 Abstufung der Untersuchung

### Schematisierte Untersuchungen für alle Querschnitte

Im Vorfeld der Untersuchungen wurde eine Reihe von Auswertungen definiert, die für alle Querschnitte durchgeführt wurden. Für diese schematischen Auswertungen wurde ein Auswertalgorithmus programmiert, der in Teilbereichen automatisierte Auswertungen an den 70 Messquerschnitten durchführt. Ziel dieser Auswertung ist zum einen die einfache Vergleichbarkeit der Verkehrsverhältnisse an unterschiedlichen Querschnitten, und zum anderen die Schaffung einer einheitlichen Datengrundlage für weitere Auswertungen.

Diese schematischen Untersuchungen beinhalten:

Auswertevorgang	Ziel
<b>Aggregation in längere Zeitintervalle</b>	
Die originär in 1-Minuten-Intervallen vorliegenden Daten werden in drei Stufen in größere Zeitintervalle aggregiert. Dabei ist es notwendig, die bei einigen Messquerschnitten auftretenden Lücken zu interpolieren. Oberhalb eines bestimmten Schwellwertes für die Anzahl der Lücken wird kein aggregierter Wert gebildet.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erstellung von q-v-Diagrammen für die verschiedenen Zeitintervalle 1-Min., 5-Min., 15-Min. und 60-Min.</li> <li>• Max. Verkehrsstärken für verschiedene Zeitintervalle</li> <li>• Grundlage für Leistungsfähigkeitsuntersuchungen (q-v-Funktionen) in verschiedenen Zeitintervallen</li> </ul>
<b>Einteilung in Verkehrsstärkeklassen</b>	
Die Geschwindigkeiten und Verkehrsstärken für einzelne Fahrstreifen werden in Abhängigkeit der Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn in Klassen gruppiert und gemittelt.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untersuchung von Fragestellungen insbesondere zur Harmonisierung des Verkehrsflusses (Fahrstreifenverteilung, Geschwindigkeitsniveau)</li> </ul>
<b>Gleitender Mittelwert</b>	
Bildung eines gleitenden Mittelwerts über 5 Minuten mit einem Versatz von einer Minute und Untersuchung mittels der Methode der „Zusammenbruchswahrscheinlichkeit“.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beantwortung zu Fragen der Stabilität des Verkehrsflusses</li> </ul>

**Abb. 4-2: Übersicht über die Auswertungsvorgänge und –ziele bei der schematisierten Untersuchung aller aufbereiteten Querschnitte**

Die schematisierte Untersuchung soll dazu dienen, eine Reihe von Fragestellungen einheitlich an einer Vielzahl von Querschnitten zu untersuchen. Aus Platzgründen sind in dieser Arbeit diese Einzelergebnisse nicht dargestellt.

## **Spezielle Untersuchungen an ausgewählten Querschnitten**

Neben den schematisierten Untersuchungen gibt es eine Fülle weiterer Untersuchungen zu speziellen Fragestellungen. Diese werden nur an ausgewählten, besonders repräsentativen Querschnitten durchgeführt. Fragestellungen hierzu sind unter anderem:

- Analyse der Wirkungsweise der SBA (z.B. Schaltzeiten)
- Verkehrsfluss in Abhängigkeit des Schaltzustands
- Parameterstudien zur Wahl der Randbedingungen bei der Untersuchung der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit

Diese Analysen dienen dazu, Erklärungsgrundlagen für beobachtete Auswirkungen von SBA auf den Verkehrsfluss zu bekommen.

## **4.6 Vergleichsmöglichkeiten im Rahmen der Datenbasis**

### **Vorher-Nachher-Vergleich**

Leider war es trotz erheblicher Anstrengungen nicht möglich, Daten in Form eines Vorher-Nachher-Vergleichs zu bekommen, da in zwei Fällen der Inbetriebnahme einer SBA während der Laufzeit des Forschungsprojekts die Aufzeichnung der Messdaten im Vorher-Zeitraum vor Inbetriebnahme der SBA fehlerhaft erfolgte. An einer weiteren SBA wurde versucht, gespeicherte ältere Messdaten aus dem Vorher-Zeitraum zu rearchivieren. Leider gelang dies nicht, da die Vorher-Daten in allen Fällen fehlerhaft aufgezeichnet waren.

### **Mit-Ohne-Vergleich (verschiedene Querschnitte)**

Die zweite angestrebte Methode, der Mit-Ohne-Vergleich an verschiedenen Querschnitten, konnte erfolgreich realisiert werden. Eine Übersicht über alle aufbereiteten und ausgewerteten Querschnitte enthält Tabelle 4-5.

Die SBA A9 München – Holledau stellte sich als besonders gut geeigneter Fall heraus, da sowohl Daten von der beeinflussten Fahrbahn Richtung Süden als auch von der unbeeinflussten Fahrbahn Richtung Norden für den gleichen Zeitraum vorlagen. Damit sind die Umfeldbedingungen identisch, weiterhin sind die Wegbedingungen (eben, gerade) und die Verkehrsbedingungen (Verkehrsnachfrage, Lkw-Anteil etc.) ebenfalls gut vergleichbar. Da außerdem in beiden Richtungen enorme Verkehrsüberlastungen auftreten, können vergleichende Aussagen zur Kapazität getroffen werden. Die Vielzahl der erfassten und ausgewerteten Querschnitte erlauben signifikante Aussagen.

Etwas weniger günstig stellt sich die Situation bei der SBA A8 Brunnthal – Bad Aibling dar, da hier bei den unbeeinflussten Querschnitten der Einfluss temporärer, sta-

tischer Geschwindigkeitsbegrenzungen aufgrund von Bauzuständen vorhanden war. Damit ist ein Vergleich nur begrenzt möglich. Ein weiterer günstiger Fall wurde bei den Daten der A8W/A99 - Eschenrieder Spange erhofft, da dieser Bereich in räumlicher Nähe beeinflusste und unbeeinflusste dreistreifige MQ besitzt. Die Verkehrsverhältnisse stellten sich aber, bedingt durch die häufigen Querschnittswchsel, als untypisch dar (Verflechtungsvorgänge, Rückstaueffekte). Außerdem traten im Untersuchungszeitraum kaum Verkehrsüberlastungen auf.

Strecke		Kategorie	Anzahl MQ		Anzahl AQ	Zeitraum
			beeinflusst <sup>1)</sup>	unbeeinflusst <sup>1)</sup>		
A4	Leutratl	2	3	-	-	27.07.-09.08.00
A8	Grabenstätt - Grenze	2	7	-	7	27.07.-09.08.00
A9	München - Holledau	3	13	11	7	27.07.-09.08.00
A44	Dortmund – Soest <sup>2)</sup>	2	5	2	-	27.07.-09.08.00
A94	Steinh. - Parsdorf	2-3	2	-	1	27.07.-09.08.00
A99/A8	Brunnth. - Bad Aibl. <sup>3)</sup>	3	18	7	12	27.07.-09.08.00
A8/A99	Eschenrieder Spange	2/3	10	3	4	27.07.-09.08.00
A99/A8	Erweit. Münch. Ring	3	1	-	-	12.04.-25.04.01
A8	Ulm – München <sup>4)</sup>	2	x	4	x	18.05.-31.05.00

Erläuterung:

1) **beeinflusst:** Messquerschnitt, der stromabwärts eines Anzeigequerschnitts liegt, und damit einen Verkehrsfluss in Abh. des Schaltzustands aufweist  
**unbeeinflusst:** Messquerschnitt außerhalb des Einflussbereichs von Anzeigequerschnitten (die Zuordnung kann in Sonderfällen - z.B. für den ersten MQ einer SBA - problematisch sein)

2) Zeitraum für die Daten der unbeeinflussten Messquerschnitte: 04.06.-10.06.01

3) unbeeinflusste Querschnitte mit Geschwindigkeitsbegrenzung

4) Referenzquerschnitte, Querschnitte teilw. mit starrer Geschwindigkeitsbegr. und Lkw-ÜV

**Tabelle 4-5: Übersicht über die ausgewerteten Daten (weitere Angaben über die Strecken siehe Anhang)**

Insgesamt stehen zur Beurteilung der dreistreifigen Querschnitte sehr gute Daten für Vergleiche zur Verfügung. Bei den zweistreifigen Querschnitten sieht die Vergleichbarkeit schlechter aus. Bei der A4 Leutratl konnten keine Daten der gegenüberliegenden unbeeinflussten Fahrbahn gewonnen werden. Bei der A44 Dortmund - Soest gelang dies zwar, allerdings weisen beide Richtungen nur spärlich Verkehrsüberlastungen auf, so dass im Hinblick auf die Kapazität schwer Aussagen getroffen werden können. Die A8 Grabenstätt – Landesgrenze besitzt auf beiden Fahrbahnen eine SBA. Von der A94 Steinhausen – Parsdorf konnten nur an zwei Messquerschnitten mit SBA Daten gewonnen werden. Die SBA ist außerdem wegen der tem-



porären Standstreifenfreigabe ein Sonderfall. Bei der A8W/A99 – Eschenrieder Spange befinden sich zweistreifige Querschnitte nur im Überleitungsbereich mit den entsprechenden Sondereinflüssen auf den Verkehrsablauf. Schließlich wurde versucht, mit zusätzlich als Referenzdaten gewonnen Daten der A8 Ulm – München eine Vergleichsbasis zu bekommen. Dies erwies sich aber aufgrund besonderer Verkehrsbedingungen (extrem hohe Verkehrsbelastung durch starken Berufsverkehr), die kaum mit den Verkehrsbedingungen an den SBA-Strecken A4 Leutatal, A8 Grabenstätt – Landesgrenze oder A44 Dortmund – Soest vergleichbar sind, als außerordentlich schwierig. Diese drei Strecken sind größtenteils Fernverkehrsstrecken und wiesen – trotz des günstig gewählten Urlaubszeitraums – nicht so hohe Verkehrsnachfragen wie die A8 Ulm – München mit der morgendlichen Spitzenstunde im Berufsverkehr auf.

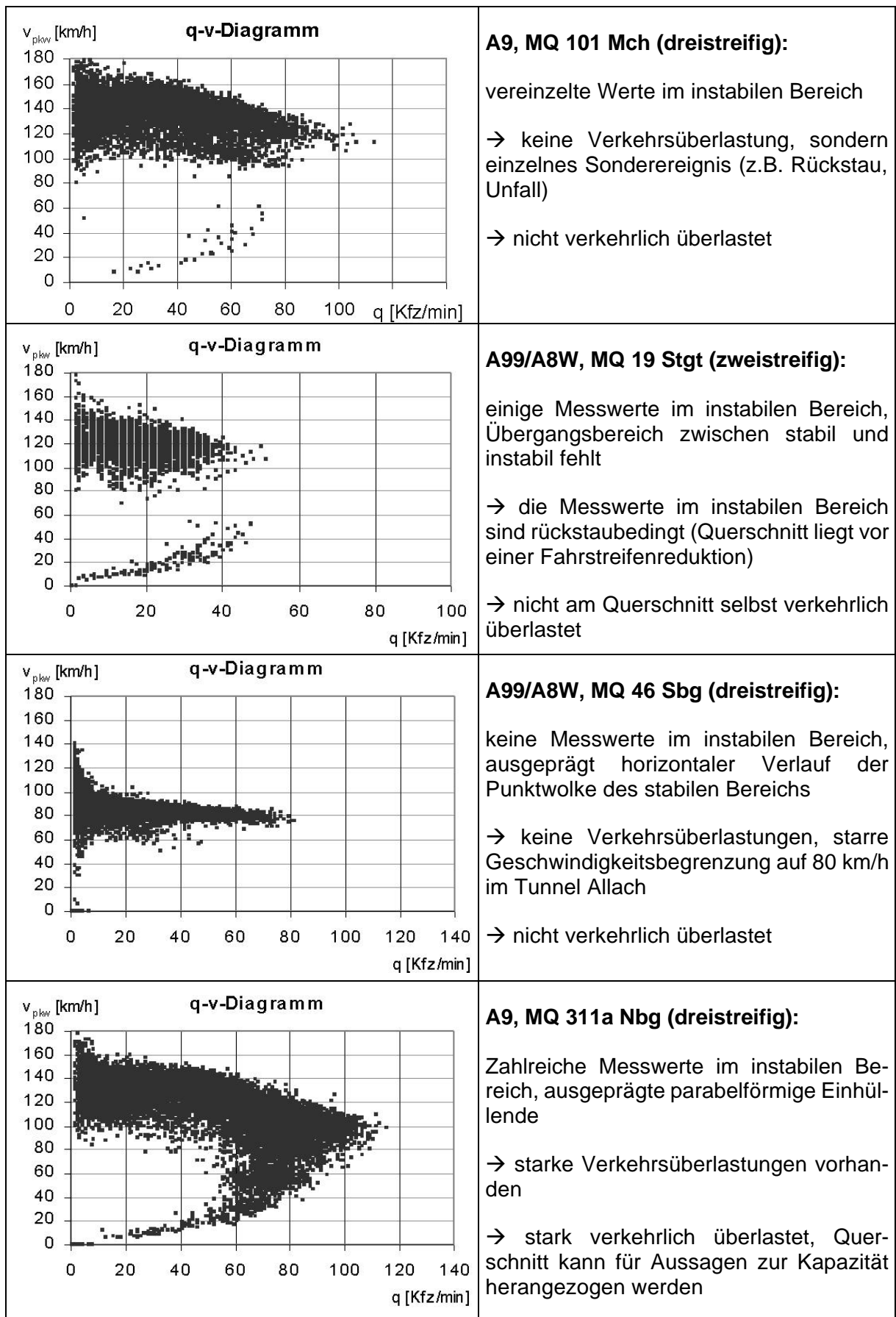
## 5 EMPIRISCHE MAXIMALE VERKEHRSTÄRKE

### 5.1 Grundlagen

Wie bereits in Kapitel 3.1.1 kurz erläutert, beschreibt der Begriff *Kapazität* nach der neuen FGSV-Definition die „größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom bei gegebenen Weg- und Verkehrsbedingungen an dem für ihn bestimmten Querschnitt erreichen kann“. Da nicht sicher ist, ob die höchste gemessene Verkehrsstärke auch die höchste mögliche Verkehrsstärke darstellt, kann die Kapazität einer Strecke nicht ohne weiteres bestimmt werden. Durch die Anwendung von Verkehrsflussmodellen kann versucht werden, aus den Messwerten den Wert für die Kapazität abzuleiten. Diese Modelle beschreiben unter Verwendung von Annahmen und Vereinfachungen ein idealisiertes Verhalten der Verkehrsteilnehmer (Kapitel 3.1.2). Aufgrund der unterschiedlichen Annahmen ergeben sich bei der Anwendung verschiedener Modelle auf die gleiche Datenbasis differierende Werte für die Kapazität (über 20% Abweichung). Die Aussagefähigkeit der ermittelten Werte ist damit stark eingeschränkt. In verschiedenen Untersuchungen zur Kapazität von Strecken wurde daher auf die Anwendung von Verkehrsflussmodellen zur Schätzung der Kapazität verzichtet und statt dessen der Wert für die maximale gemessene Verkehrsstärke als Annäherung an die Kapazität verwendet (vgl. LEMKE 2000 und PONZLET 1996). Dieser Wert wird als empirische maximale Verkehrsstärke bezeichnet (kurz: *emp.  $q_{max}$* ).

Basierend auf diesen Erfahrungen wird im Rahmen dieser Untersuchung die Kapazität nicht mit Hilfe von Verkehrsflussmodellen, sondern mittels Annäherung durch *emp.  $q_{max}$*  bestimmt. Eine wichtige Fragestellung ist nun, inwiefern *emp.  $q_{max}$*  die Kapazität eines Querschnitts annähern kann. Dazu muss die Bedingung erfüllt sein, dass an dem untersuchten Querschnitt Verkehrsüberlastungen auftreten, da andernfalls *emp.  $q_{max}$*  keine Annäherung an die Kapazität darstellt. Die Beurteilung der verkehrlichen Überlastung erfolgt am Besten durch die Beurteilung der Form der Punktwolke im *q-v*-Diagramm. Je nach Vorhandensein und Form des instabilen Bereichs kann auf das Auftreten von Verkehrsüberlastungen geschlossen werden. Der instabile Bereich darf nicht nur aus wenigen Messpunkten bestehen, sondern muss in Form einer Punktwolke mit parabelförmiger Einhüllender ausgebildet sein. Sind nur einzelne Messpunkte im instabilen Bereich zu sehen, so ist davon auszugehen, dass diese durch ein Sonderereignis wie z.B. eine Fahrbahnblockade durch einen Unfall entstanden sind (Abb. 5-1).

Für Aussagen zur Kapazität werden im folgenden nur Querschnitte herangezogen, die aufgrund dieser Betrachtungsweise als verkehrlich überlastet eingestuft werden. Da diese Untersuchung ausschließlich Richtungsfahrbahnen betrachtet, wird im folgenden der Begriff *Querschnitt* immer im Sinne eines Querschnitts einer Richtungsfahrbahn verwendet.



**Abb. 5-1: Beurteilung von Verkehrsüberlastungen verschiedener Querschnitte von Richtungsfahrbahnen mittels Betrachtung von q-v-Diagrammen (Darstellung aller Messwerte des 14-tägigen Untersuchungszeitraums im 1-min-Intervall)**

## 5.2 Maximale Verkehrsstärke im Stundenintervall

### 5.2.1 Betrachtung dreistreifiger Querschnitte

Im Rahmen der Untersuchung konnten Daten von Messquerschnitten an dreistreifigen Richtungsfahrbahnen der Strecken

- A9 München – Holledau (21 MQ)
- A99/A8 Ost Brunnthäl – Bad Aibling (23 MQ)
- A99/A8West Eschenrieder Spange (4 MQ)
- A94 Steinhausen – Parsdorf (2 MQ)

gewonnen werden.

Alle Querschnitte der A99/A8W der Eschenrieder Spange stellten sich bei der Betrachtung der q-v-Diagramme als verkehrlich nicht überlastet heraus (instabile Verkehrszustände nur durch Rückstaueffekte verursacht). Diese Querschnitte werden im folgenden für Kapazitätsuntersuchungen nicht weiter verwendet. Die zwei Messquerschnitte der A94 Steinhausen – Parsdorf unterliegen Verkehrsüberlastungen, stellen aber aufgrund der temporären Standstreifenfreigabe und damit des zwischen zwei und drei Fahrstreifen wechselnden Querschnitts einen Sonderfall dar. Dieser wird in Kapitel 5.5 separat betrachtet.

An den Strecken A9 München – Holledau und A99/A8 Ost Brunnthäl – Bad Aibling sind zahlreiche Querschnitte verkehrlich überlastet. Bei der A9 sind darunter einige Querschnitte, die durch eine SBA beeinflusst sind, und einige nicht-beeinflusste Querschnitte auf der Fahrbahn Richtung Nürnberg. Hier ergibt sich die Möglichkeit eines Mit-Ohne-Vergleichs der Kapazität an verschiedenen Querschnitten. Bei der A99/A8 Ost gibt es im Bereich der A8 Ost zahlreiche verkehrlich überlastete, beeinflusste Querschnitte. Weitere nicht-beeinflusste Querschnitte gibt es an dieser Strecke nicht, da hier beide Richtungsfahrbahnen mit einer SBA ausgestattet sind. Im Vorlauf zur A8 Ost gibt es auf der A99 Münchner Ring einige nicht durch eine SBA beeinflusste, verkehrlich überlastete Querschnitte. Allerdings müssen Vergleiche mit diesen Querschnitten kritisch betrachtet werden, da in diesem Bereich der Verkehrsablauf während des Zeitraums der Datenerfassung durch temporäre, statische Geschwindigkeitsbegrenzungen aufgrund von Tagesbaustellen (Montagearbeiten zur Erweiterung der SBA) beeinflusst war.

Eine detaillierte Beschreibung der Strecken sowie die Lage von Mess- und Anzeiquerschnitten können dem Anhang entnommen werden.

In der folgenden Tabelle 5-1 sind die Ergebnisse der Auswertung für emp.  $q_{\max}$  im 1-h-Intervall zusammen mit weiteren Kenngrößen für den Verkehrsfluss und zur Streckencharakteristik angegeben.

	MQ	Betrieb*)	q <sub>max</sub> **) [Kfz/h]	q <sub>mittel</sub> ***) [Kfz/Tag]	Lkw-Anteil [%]	Längs. [%]	überlastet
A9 Ri. München	101 Mch	mit	(3.780)	43.990	16,4	-1,0	nein
	105 Mch	mit	4.380	54.000	15,3	2,8	ja
	113 Mch	mit	4.860	56.600	14,9	0,1	ja
	115 Mch	mit	4.860	56.700	14,8	0,5	ja
	116 Mch	mit	4.860	57.500	14,6	0,3	ja
	201 Mch	mit	4.740	55.600	14,6	-1,7	ja
	207 Mch	mit	4.920	69.300	12,5	0,2	ja
	208 Mch	mit	4.920	69.500	12,4	0,4	ja
	210 Mch	mit	5.160	73.000	12,2	0,2	ja
A9 Ri. Nürnberg	311 Nbg	mit	5.340	69.500	12,9	-0,3	ja
	311a Nbg	mit	5.340	70.600	13,0	-0,3	ja
	311C Nbg	ohne	5.040	58.900	14,9	-2,7	ja
	316 Nbg	ohne	5.160	58.000	14,7	-0,2	ja
	316B Nbg	ohne	5.100	56.600	16,0	2,8	ja
	316C Nbg	ohne	(5.100)	57.000	15,3	-0,5	nein
	316D Nbg	ohne	(4.980)	54.700	15,5	-1,9	nein
	105 Nbg	ohne	(4.980)	54.600	15,7	-2,4	nein
	105B Nbg	ohne	(5.040)	54.700	15,4	0,0	nein
	101 Nbg	ohne	(3.960)	46.100	16,6	0,8	nein
	101B Nbg	ohne	(3.960)	46.300	16,3	-2,4	nein
	101C Nbg	ohne	(3.960)	46.200	16,2	-1,2	nein
A8 Ost Ri. Stuttgart	B10 Stgt	mit	4.440	49.200	17,0	2,7	ja
	B11 Stgt	mit	4.380	49.100	16,6	1,2	ja
	B12 Stgt	mit	4.440	49.000	18,5	6,3	ja
	B18 Stgt	mit	4.320	47.700	16,5	0,7	ja
	B23 Stgt	mit	5.160	59.500	14,2	-2,6	ja
	B24 Stgt	mit	5.160	59.500	14,1	-0,8	ja
	B25 Stgt	mit	5.040	59.000	14,1	-0,8	ja
	B26 Stgt	mit	5.100	59.700	14,2	-0,9	ja
	B27 Stgt	mit	4.980	57.900	14,5	-1,2	ja
	B28 Stgt	mit	5.160	63.300	14,1	-1,2	ja
A99 M.-Ring	Q7 Stgt	temp.	4.920	55.800	10,8	0,4	ja
	Q5 Stgt	temp.	5.040	57.600	10,5	-0,3	ja
	Q3 Stgt	temp.	5.460	61.900	10,4	-0,8	ja
	Q1 Stgt	temp.	5.400	64.000	11,3	0,6	ja
	Q1 Sbg	temp.	5.400	69.200	11,0	-0,7	ja
	Q5 Sbg	temp.	4.560	57.700	10,3	0,3	ja
	Q7 Sbg	temp.	4.440	55.000	10,4	-0,4	ja
A8 Ri. Sbg.	Q33 Sbg	ohne	4.920	62.100	8,8	0,3	ja
	Q41 Sbg	ohne	4.980	62.100	8,7	-1,9	nein
	Q51 Sbg	ohne	(4.260)	54.000	9,6	-0,8	nein
	Q61 Sbg	ohne	(3.840)	50.200	9,8	-0,9	nein
	Q87 Sbg	ohne	(4.140)	51.900	9,9	-4,0	nein
	Q93 Sbg	ohne	(3.840)	48.000	10,1	-0,7	nein
*) Betrieb:		mit SBA: Stromaufwärts befindet sich mindestens ein AQ ohne SBA: Stromaufwärts befindet sich kein AQ temp.: Temporäre, statische Geschw.begr. im Baustellenbereich der A99					
**) q <sub>max</sub>		Werte in Klammern: diese Werte stellen aufgrund fehlender Verkehrsüberlastung keine Annäherung an die Kapazität dar [Kfz/h]					
***) q <sub>mittel</sub>		durchschn. tägliche Verkehrsbelastung im Messzeitraum [Kfz/Tag]					

**Tabelle 5-1: Emp. q<sub>max</sub> [Kfz/h] und q<sub>mittel</sub> [Kfz/Tag] dreistreifiger Querschnitte der Strecken A9 München–Hollledau und A99/A8 Brunntal–Bad Aibling**

Als Kenngrößen sind die wichtigsten Verkehrsbedingungen (durchschnittliche Verkehrsbelastung eines Querschnitts einer Richtungsfahrbahn während des Messzeitraums, im folgenden mit  $q_{\text{mittel}}$  bezeichnet; Lkw-Anteil; Beurteilung der verkehrlichen Überlastung anhand des q-v-Diagramms) und die wichtigste Wegbedingung (Längsneigung) aufgeführt. Die Umfeldbedingungen können für alle Querschnitte als gleichartig angenommen werden.

### **Einfluss der Randbedingungen**

Bei der Betrachtung der Längsneigungen der untersuchten Querschnitte (Tabelle 5-1) wird ersichtlich, dass an beiden Strecken der Einfluss der Längsneigung fast überall keine Rolle spielt. Nach HBS (1998) üben Längsneigungen  $< 2 \%$  keinen merkbaren Einfluss auf die Kfz-Geschwindigkeiten aus. Die meisten Querschnitte haben eine geringere oder nur minimal höhere Längsneigung. Eine erhebliche Längsneigung tritt nur am Beginn der SBA der A8 Brunthal – Bad Aibling auf. An dieser Stelle stellt der „Irschenberg“ mit einer Längsneigung von fast  $7 \%$  ein Hindernis für den Verkehr dar. Weiterhin ist an dieser Stelle kein Standstreifen und eine gewisse Kurvigkeit vorhanden. Diese Besonderheit bei der Wegbedingung muss bei Vergleichen mit anderen Querschnitten berücksichtigt werden. Für die meisten Querschnitte stellen sich die Wegbedingungen als sehr ähnlich dar.

Bei der Betrachtung von Tabelle 5-1 fallen die deutlichen Unterschiede von emp.  $q_{\text{max}}$ , auch auf derselben Richtungsfahrbahn, auf. Da die Weg- und Umfeldbedingungen konstant sind, kommt als Erklärung nur eine Änderung bei der Verkehrsbedingung in Frage. Bei den Verkehrsbedingungen lassen sich Einflüsse des Fahrerkollektivs und des Fahrzeugkollektivs unterscheiden. Die Unterschiede im Fahrzeugkollektiv stellen sich bei der Betrachtung der Lkw-Anteile als gering dar, vor allem bei Querschnitten derselben Richtungsfahrbahn. Die Lkw-Anteile liegen in den meisten Bereichen bei ca.  $15 \%$ , im Bereich A99 Münchner Ring und A8 Ost Fahrtrichtung Salzburg liegen sie mit ca.  $10 \%$  niedriger. Mit zunehmender mittlerer Verkehrsbelastung  $q_{\text{mittel}}$  nimmt in der Regel der Lkw-Anteil ab. Dies liegt daran, dass die absolute Lkw-Verkehrsstärke im Laufe des Tages und über die Strecke hinweg nahezu konstant ist, während die Pkw-Verkehrsstärke stark zunimmt. Dies ist ein bekanntes Phänomen auf Autobahnen (z.B. PONZLET 1996). Insgesamt sind die Querschnitte im Hinblick auf den Lkw-Anteil gut vergleichbar.

Aussagen zum Fahrerkollektiv sind schwierig zu treffen, da hierzu keine gemessenen Größen vorliegen. Eine gewisse Ähnlichkeit des Fahrerkollektivs kann aufgrund der räumlichen Nähe vermutet werden. So ist anzunehmen, dass der im Untersuchungszeitraum an den Wochenenden in beiden Richtungen starke Urlauberverkehr an allen Querschnitten der A8 und A9 in gleichem Maße auftritt. Unterschiede zwischen den Querschnitten könnten in der Stärke des werktäglichen Berufsverkehrs liegen.

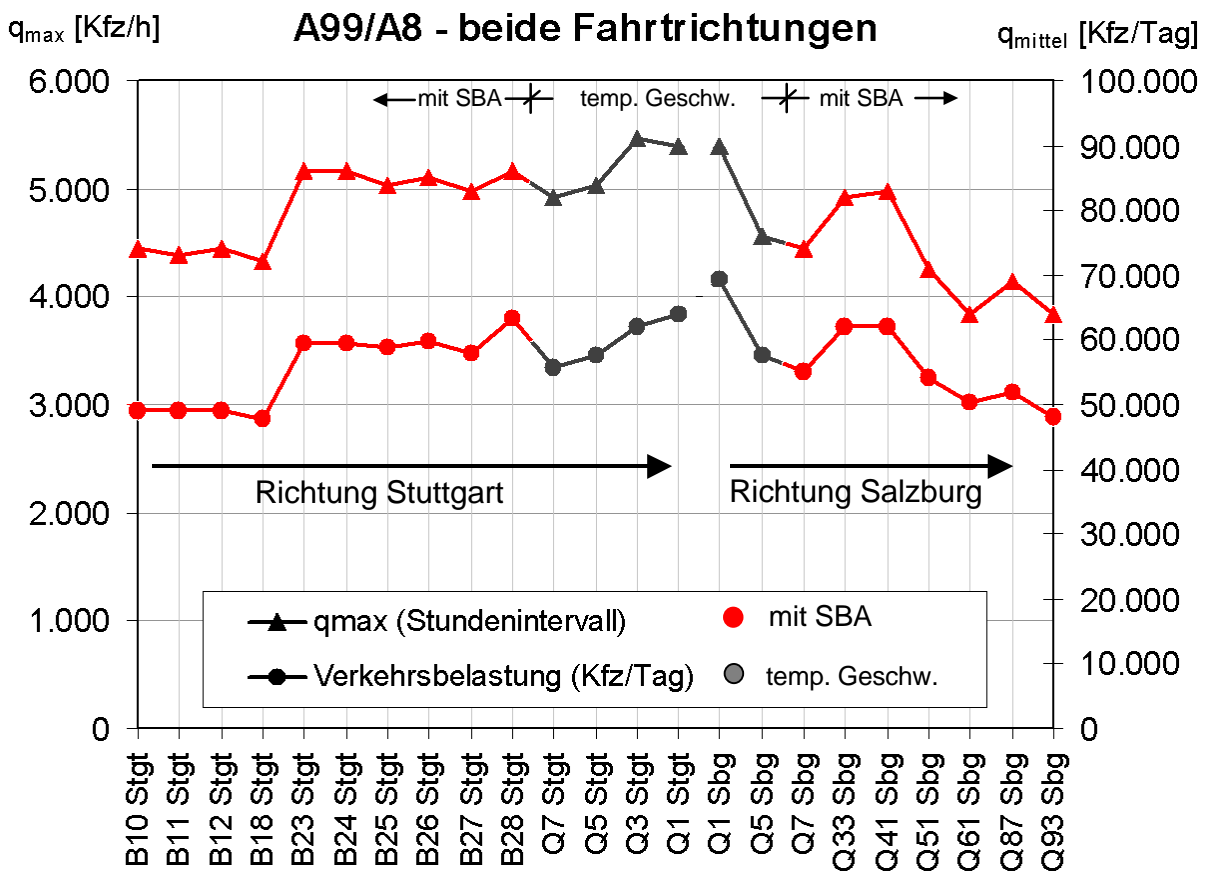
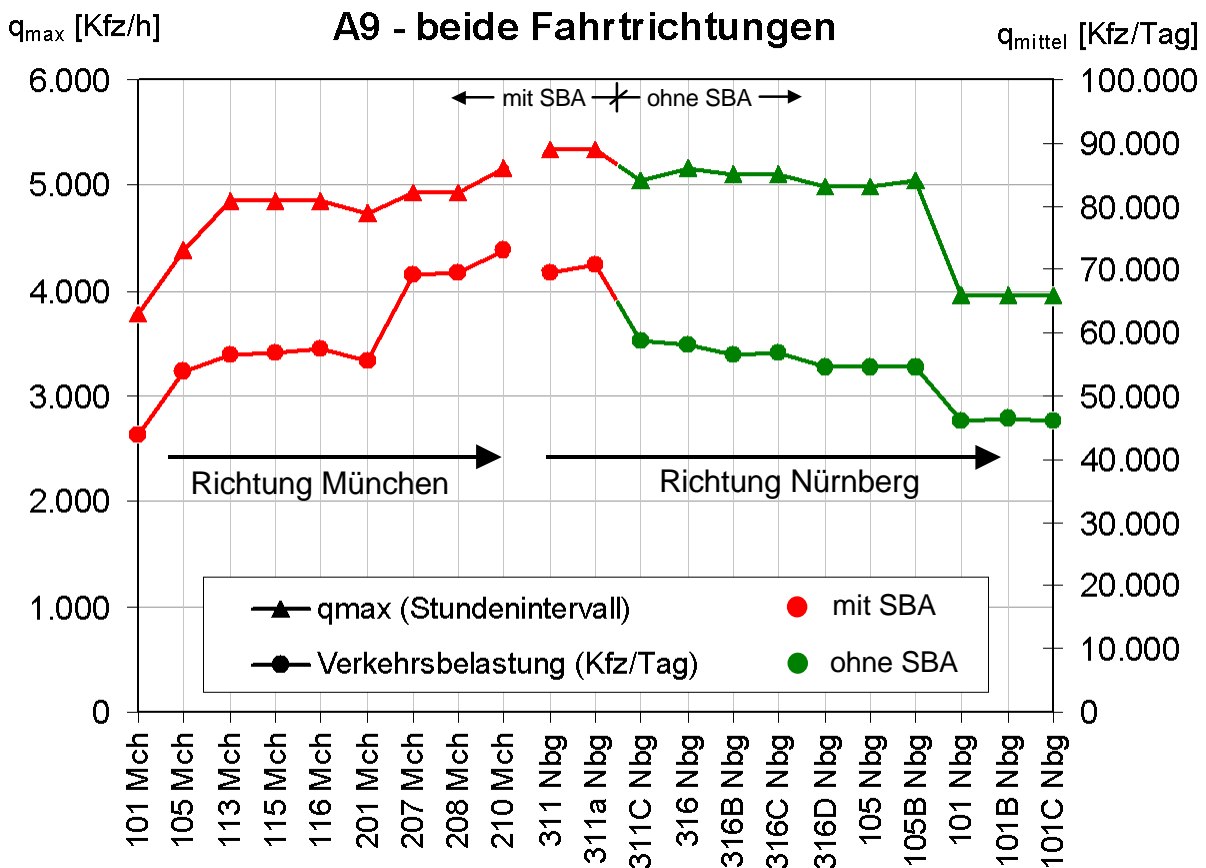
### **Einfluss der Verkehrsbelastung $q_{\text{mittel}}$**

Eine Betrachtung von Tabelle 5-1 legt es nahe, den Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Verkehrsbelastung  $q_{\text{mittel}}$  und der maximalen Verkehrsstärke emp.  $q_{\text{max}}$  näher zu analysieren. Dies ist in den zwei Diagrammen von Abb. 5-2 als Vergleich dieser beiden Werte im Verlauf der A9 und A8 Ost und in Abb. 5-3 als Abhängigkeit zwischen emp.  $q_{\text{max}}$  und  $q_{\text{mittel}}$  für alle Querschnitte der beiden Strecken dargestellt.

Abb. 5-2 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen maximaler Verkehrsstärke und durchschnittlicher Verkehrsbelastung. An beiden Strecken wird die Verkehrsbelastung der Querschnitte auf der Richtungsfahrbahn nach München mit zunehmender Nähe zum Ballungsraum größer. Auf der entgegengesetzten Richtungsfahrbahn nach Nürnberg bzw. nach Salzburg nimmt sie mit zunehmender Entfernung vom Ballungsraum ab. Damit einher geht ein Ansteigen bzw. ein Absinken der maximalen Verkehrsstärke. Diese Abhängigkeit ist bei verkehrlich nicht überlasteten Querschnitten unmittelbar verständlich, da hier die Kapazitätsgrenze nicht erreicht ist, und eine höhere Verkehrsbelastung über den Tag zu einer höheren maximalen stündlichen Verkehrsstärke führt. Diese Abhängigkeit erinnert an den Zusammenhang zwischen Verkehrsbelastung (DTV-Wert) und Spitzenstunde, der als sogenannter *k-Faktor* (Umrechnungsfaktor von Jahreszählwerten auf stündliche Verkehrsstärken in Stundengruppen) zur wirtschaftlichen Dimensionierung von Straßenverkehrsanlagen in der EWS verwendet wird und für die Bemessungszwecke der EWS ausführlich untersucht wurde. Die in der EWS für diese Fälle angegebenen Werte von  $k = 0,08$  bis  $0,10$  (d.h. die Spitzenstunde hat eine Verkehrsstärke von  $0,08$  bis  $0,10 \cdot \text{DTV}$ ) kann mit den Messdaten bestätigt werden.

Bemerkenswert ist, dass auch bei den anhand der Betrachtung der q-v-Diagramme als verkehrlich überlastet beurteilten Querschnitte emp.  $q_{\text{max}}$  von der Verkehrsbelastung abhängt. Unter der Annahme, dass bei den verkehrlich überlasteten Querschnitten emp.  $q_{\text{max}}$  eine Annäherung an die Kapazität darstellt, bedeutet dies, dass die Kapazität unter anderem von der Verkehrsbelastung abhängt.

Dieser Zusammenhang ist in verschiedener Weise erklärbar. Ein Grund ist der stochastische Charakter des Verkehrsflusses. Da an höher belasteten Querschnitten Zeiträume mit einem starken Verkehrsfluss häufiger auftreten, ist die Anzahl der Stundenintervalle, die eine Verkehrsstärke in der Nähe der Kapazitätsgrenze aufweisen, höher. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Stundenintervall mit besonders hoher Verkehrsstärke auftritt, steigt daher an.



**Abb. 5-2:** Empirische, maximale Verkehrsstärke  $q_{max}$  und durchschnittliche Verkehrsbelastung  $q_{mittel}$  während des Untersuchungszeitraums für alle untersuchten Querschnitte von dreistreifigen Richtungsfahrbahnen der Strecken A9 München–Holltedau und A99/A8 Brunntal–Bad Aibling



Es ist zu vermuten, dass bei steigender Verkehrsbelastung und mit zunehmender Nähe des Ballungsraums die Verkehrsteilnehmer ein angepassteres, defensiveres Verhalten zeigen. Eine angepasste Fahrweise bewirkt eine Erhöhung der Kapazität z.B. auf Grund eines gleichmäßigeren Abstandsverhaltens oder einer Abnahme von Überholvorgängen. In gewissem Maße ist also eine Selbstorganisation des Verkehrsflusses vorhanden.

Diese Feststellung lässt für die weitere Untersuchung eine wichtige Schlussfolgerung zu: ein Vergleich der maximalen Verkehrsstärken verschiedener Querschnitte ist nur bei gleicher Verkehrsbelastung zulässig. Die Betrachtung allein von q-v-Diagrammen und deren Beurteilung im Hinblick auf die verkehrliche Überlastung reicht nicht aus, um verschiedene Querschnitte im Hinblick auf die Kapazität zu vergleichen. Dies muss bei der Erstellung eines aussagefähigen Vergleichs zwischen Mit-SBA-Querschnitten und Ohne-SBA-Querschnitten berücksichtigt werden.

In Abb. 5-3 ist dieser Vergleich für die maximalen Verkehrsstärken für die unterschiedlichen Betriebszustände „Mit-SBA“, „Ohne-SBA“ bzw. „temporäre statische Geschwindigkeitsbegrenzung“ in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung dargestellt. Zur besseren Erkennbarkeit sind die Messwerte von Querschnitten der gleichen Richtungsfahrbahn in Gruppen eingeteilt und markiert.

In dieser Darstellung erkennt man, inwieweit die einzelnen Richtungsfahrbahnen charakteristische Merkmale besitzen. So sind die maximalen Verkehrsstärken auf der Richtungsfahrbahn der A8 Ost nach Stuttgart höher als die der Richtungsfahrbahn nach Salzburg. Dies hängt zum Teil damit zusammen, dass die einige Querschnitt dieser Strecke (Q41 bis Q93) verkehrlich nicht überlastet sind. Die Strecke A9 München – Holledau lässt sich in drei Bereiche einteilen: die Richtungsfahrbahn nach München bis AK Neufahrn (mit SBA), die Richtungsfahrbahn nach Nürnberg ab AK Neufahrn (ohne SBA) und der Bereich beider Richtungsfahrbahnen zwischen AK Neufahrn und AK München-Nord (mit SBA). Es zeigt sich, dass die beiden Richtungsfahrbahnen bis (bzw. ab) AK Neufahrn verkehrlich ähnlich stark belastet sind, aber die Querschnitte der unbeeinflussten Strecke geringfügig höhere maximale Verkehrsstärken erreichen. Die Querschnitte im Bereich zwischen AK Neufahrn und AK München-Nord erreichen die höchsten Verkehrsbelastungen und die höchsten maximalen stündlichen Verkehrsstärken im Rahmen dieses Vergleichs. Gesondert davon sind die Querschnitte der A99 Münchner Ring zu betrachten. Sie erreichen im Bereich des AK München-Ost (Q1 Stgt. und Q1 Sbg) die höchsten maximalen Verkehrsstärken, die im Rahmen dieser Untersuchung gemessen wurden.

**emp.  $q_{max}$  in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung  $q_{mittel}$  (1-h-Intervall)**

A9 München - Holledau und A99/A8 Ost Brunnthal - Bad Aibling

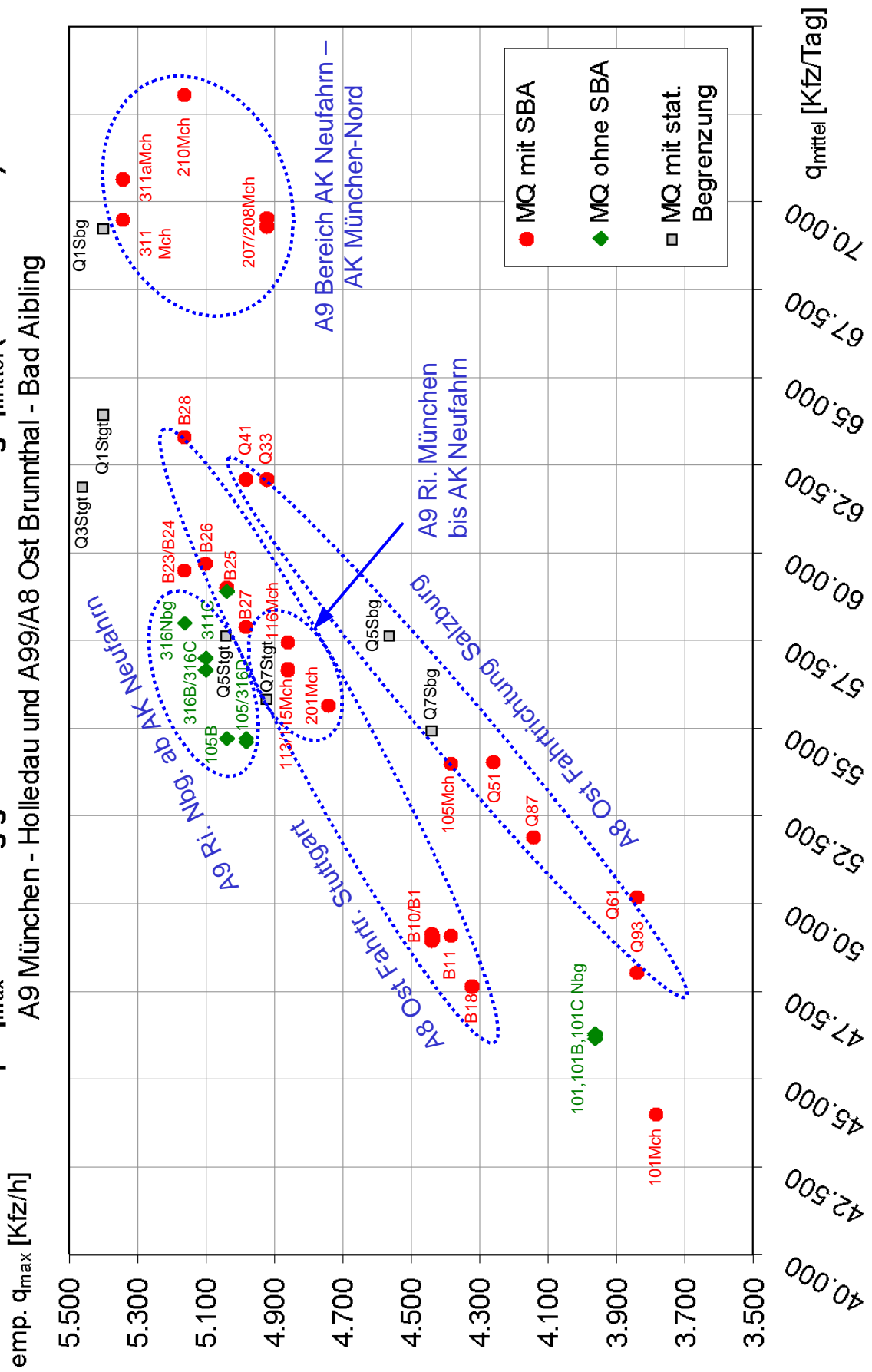


Abb. 5-3: Empirische, maximale Verkehrsstärke in Abhängigkeit der durchschnittlichen Verkehrsbelastung während des Untersuchungszeitraums (dreistreifige Querschnitte)

Insgesamt betrachtet sind die maximalen Verkehrsstärken im Vergleich zu den in anderen Untersuchungen gemessenen Maximalwerten eher gering. Das HBS gibt maximale Verkehrsstärken bei dreistreifigen Querschnitten im Regelfall bis 5.600 Kfz/h, in Einzelfällen bis zu 6.600 Kfz/h an, weist dabei aber darauf hin, dass im Sommerzeitraum aufgrund des anderen Fahrerkollektivs im Ferienverkehr geringere maximale Verkehrsstärken erreicht werden. Angesichts des Messzeitraums Ende Juli / Anfang August ist dies hier der Fall, was einen Vergleich mit bestehenden Untersuchungen erschwert. Innerhalb der Datenbasis ist ein Vergleich zulässig, da alle Daten aus dem gleichen Zeitraum stammen.

### **Einfluss weiterer Faktoren auf den Vergleich der „Mit-SBA“ mit den „Ohne-SBA“-Querschnitten**

Das Einbeziehen der Verkehrsbelastung als weiterer Einflussfaktor kann nicht alle Unterschiede bei den maximalen Verkehrsstärken erklären. So hat bei vergleichbarer Verkehrsbelastung z.B. MQ B28 eine um 3,6 % höhere maximale Verkehrsstärke als MQ Q33, oder MQ 311 Mch eine um 8,5 % höhere maximale Verkehrsstärke als MQ 207 bzw. 208 Mch. Weitere, nicht erfasste (evtl. gar nicht erfassbare) Einflussfaktoren auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmer müssen eine Rolle spielen.

Als mögliche weitere Einflüsse auf die Kapazität kommen in Frage:

- nicht messbare Unterschiede bei den Wegbedingungen (z.B. Übersichtlichkeit und Komplexität der Streckenführung, Einflüsse von Zu- und Abfahrten d.h. Verflechtungsvorgänge)
- Unterschiede im Fahrerkollektiv trotz der räumlichen Nähe der Strecken (z.B. möglicher höherer Berufsverkehrsanteil auf der A99 Münchner Ring)
- Unterschiede in der Fahrweise über den Tag hinweg (z.B. verändertes Fahrverhalten zwischen Morgen- und Abendspitze), dies könnte Unterschiede bewirken im Fahrverhalten zum Ballungsraum hin bzw. vom Ballungsraum weg
- zufällige Einflüsse, da der Messzeitraum für Untersuchungen zur maximalen Verkehrsstärke im 1-h-Intervall kurz ist (14 Tage mit 336 Intervallen)

Diese unbekanntes und kaum quantifizierbaren Einflüsse bewirken, dass Vergleiche der maximalen Verkehrsstärke verschiedener Querschnitte auch bei Berücksichtigung aller gemessenen Kenngrößen kritisch betrachtet werden müssen. Die nicht erfassbaren Einflussfaktoren üben einen Beitrag in der Größenordnung von mehreren Prozent aus (diese Schwierigkeiten ergaben sich auch bei früheren Untersuchungen, Kapitel 3.1.3). Die untersuchte Größe (d.h. der Einfluss der SBA) kann nicht genauer als diese Unbestimmtheit ermittelt werden. Die Methodik des Mit-Ohne-Vergleichs verschiedener Querschnitte erlaubt keine genaueren Aussagen. Eine

höhere Genauigkeit wäre nur bei der Anwendung einer anderen Vergleichsmethodik möglich, die allerdings mit dem vorliegenden Datensatz nicht darstellbar ist (Kapitel 4.2).

### Vergleich zwischen Querschnitten mit SBA und ohne SBA

Daten unbeeinflusster Querschnitte liegen nur an der Richtungsfahrbahn der A9 nach Nürnberg vor. Davon sind die Querschnitte 316C Nbg bis 101C Nbg verkehrlich nicht überlastet. Es verbleiben die drei Querschnitte 311C Nbg, 316 Nbg und 316B Nbg, die sich im Bereich einer Verkehrsbelastung von knapp 56.600 bis 58.900 Kfz/Tag befinden. Für einen Vergleich sind dazu am geeignetsten die Mit-SBA-Querschnitte der A9 mit 55.600 bis 57.500 Kfz/Tag und einige Querschnitte der A8 Ost mit 57.900 bis 59.000 Kfz/Tag.

Aus dieser Überlegung ergeben sich drei Gruppen von Querschnitten, deren Werte für emp.  $q_{\max}$  und für  $q_{\text{mittel}}$  gemittelt werden (Tabelle 5-2):

Betriebszustand	Strecke	Querschnitte	Mittelwerte von	
			emp. $q_{\max}$ [Kfz/h]	$q_{\text{mittel}}$ [Kfz/Tag]
ohne SBA	A9 Ri. Nbg	311C, 316, 316B Nbg	5.100	57.833
mit SBA	A9 Ri. Mch	113, 115, 116 und 201 Mch	4.830	56.600
mit SBA	A8 Ri. Stgt.	B23, 24, 25, 26, 27 Ri. Stgt	5.088	59.120

**Tabelle 5-2: Mittlere emp. maximale Verkehrsstärke emp.  $q_{\max}$  und mittlere Verkehrsbelastung  $q_{\text{mittel}}$  der für einen Vergleich gruppierten Querschnitte**

Die maximalen Verkehrsstärken der Querschnitte der A9 Richtung Nürnberg sind vergleichbar mit denen der A8 Ost Richtung Stuttgart. Die Querschnitte der A9 Richtung München fallen dagegen etwas ab (-5,3 % im Vergleich zu den Querschnitten der A9 Richtung Nürnberg). Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Ursache dafür die örtlichen Besonderheiten bei den Weg- oder Verkehrsbedingungen sind, die bei dieser Untersuchung nicht erfasst werden konnten. Ähnlich nicht erklärbare Unterschiede in der maximalen Verkehrsstärke treten auch zwischen den beiden Richtungsfahrbahnen der A8 Ost Brunnthal – Bad Aibling auf.

#### → Fazit zur Untersuchung der dreistreifigen Strecken:

Es liegen keine Hinweise vor, dass SBA eine Steigerung der maximalen Verkehrsstärke im 1-h-Intervall bewirken können. Die festgestellten Unterschiede in der maximalen Verkehrsstärke von Mit-SBA- und Ohne-SBA-Querschnitten liegen unterhalb der Genauigkeit des Mit-Ohne-Vergleichs verschiedener Querschnitte. Unter Einbeziehung der Ergebnisse der Literaturrecherche (Kapitel 3.2.2) wird die Schlussfolgerung gezogen, dass SBA vermutlich keinen, auf jeden Fall aber sehr geringen Einfluss auf die Kapazität einer Strecke ausüben.

## 5.2.2 Betrachtung zweistreifiger Querschnitte

Im Rahmen der Untersuchung konnten Daten von zweistreifigen Querschnitten an den Strecken

- A8 Grabenstätt – Landesgrenze (4 MQ)
- A99/A8W Eschenrieder Spange (2 MQ)
- A44 Dortmund – Soest (5 MQ)
- A4 Leutratatal (3 MQ)
- A94 Steinhausen – Parsdorf (2 MQ)
- Referenzstrecke A8 Ulm – München (4 MQ)

gewonnen werden.

Die Querschnitte der A99/A8W Eschenrieder Spange und der A94 Steinhausen – Parsdorf scheiden aus den oben beschriebenen Gründen der fehlenden Verkehrsüberlastungen und der Problematik der temporären Standstreifenfreigabe für Kapazitätsuntersuchungen aus.

Von den verbleibenden Strecken stellten sich nach der Aufbereitung der Messdaten die Querschnitte der Strecken A44 Dortmund – Soest und A4 Leutratatal entgegen den Erwartungen als verkehrlich nicht überlastet heraus. Dies äußerte sich bei der A44 als gänzlich fehlendes Auftreten eines instabilen Bereichs im q-v-Diagramm. Bei der A4 dürfte dies auch mit der schwierigen Topografie („Schorbarer Berg“) zusammenhängen.

Von den Querschnitten der A8 Grabenstätt – Landesgrenze besitzen zwei Querschnitte ausschließlich freien Verkehr, bei den zwei anderen Querschnitten treten einige Messwerte im instabilen Bereich auf. Dies könnte auf geringfügige Verkehrsüberlastungen zurückzuführen sein. Insgesamt wurden in diesem Bereich der A8 aufgrund ihres Charakters als Urlauberroute in diesem Zeitraum wesentlich mehr Verkehrsüberlastungen erwartet.

Bei der Referenzstrecke A8 Ulm – München ergab sich nur an einem Querschnitt ein deutlicher instabiler Bereich und damit eine Verkehrsüberlastung. Dies ist an dem mit statischer Geschwindigkeitsbeschränkung versehenen Querschnitt Sulzemoos auf der Fahrtrichtung München der Fall.

Eine detaillierte Beschreibung der Strecken, die Lage von Mess- und Anzeigequerschnitten sowie q-v-Diagramme für einige ausgewählte Querschnitte können Anhang entnommen werden.

In Tabelle 5-3 sind die Ergebnisse der Auswertungen für die maximalen stündlichen Verkehrsstärken (emp.  $q_{\max}$ ) zusammen mit weiteren Kenngrößen für den Verkehrsfluss und zur Strecke angegeben.

	MQ	Betrieb *)	q <sub>max</sub> **) [Kfz/h]	q <sub>mittel</sub> ***) [Kfz/Tag]	Lkw-Anteil [%]	Längsn. [%]	überlastet
A8 Grab. - La.grenze	235Sbg	mit SBA	2.460	30.227	13,4	1,6	teilw.
	237Sbg	mit SBA	(2.460)	30.197	13,2	1,1	nein
	239Sbg	mit SBA	(2.460)	30.495	12,8	0,6	nein
	239Mch	mit SBA	2.700	27.973	14,5	-1,3	teilw.
A8 Ulm - München	Sulz. Mch	120	3.840	39.691	13,7	-1,5	ja
	Sulz. Stgt	ohne SBA	(3.600)	39.231	14,0	1,0	nein
	Adelz. Stgt	ohne SBA	(3.240)	34.781	15,1	-0,2	nein
	Augsb. Stgt	120, ÜV Lkw	(3.240)	34.940	15,5	0,7	nein
A44 Dort- mund - Soest	14 Dtm	mit SBA	(3.180)	29.139	16,3	eben	nein
	15 Dtm	mit SBA	(3.180)	28.847	18,5	eben	nein
	16 Dtm	mit SBA	(3.240)	28.895	18,0	eben	nein
	17 Dtm	mit SBA	(3.240)	29.047	19,5	eben	nein
	1421 Dtm	mit SBA	(3.360)	34.110	17,2	eben	nein
A4 Leutrat	MQ 01	mit SBA	(2.220)	24.917	16,7	eben	nein
	MQ 06	mit SBA	(2.160)	22.611	23,0	2,5	nein
	MQ 11	mit SBA	(2.640)	28.792	16,2	5,0	nein
*) Betrieb: mit SBA: Stromaufwärts befindet sich mindestens ein AQ ohne SBA: Stromaufwärts befindet sich kein AQ „120“: statische Geschwindigkeitsbeschränkung auf 120 km/h „120 ÜV Lkw“: statische Geschwindigkeitsbeschränkung auf 120 km/h und statisches Lkw-Überholverbot (beides 6 – 20 Uhr) **) q <sub>max</sub> eingeklammerte Werte stellen aufgrund fehlender Verkehrsüberlastung keine Annäherung an die Kapazität dar [Kfz/h] ***) q <sub>mittel</sub> mittlere, tägliche Verkehrsbelastung im Untersuchungszeitraum [Kfz/Tag]							

**Tabelle 5-3: Emp. q<sub>max</sub> und q<sub>mittel</sub> auf den zweistreifigen Querschnitten der Strecken A4 Leutrat, A44 Dortmund – Soest, A8 Ulm – München und A8 Grabenstätt – Landesgrenze**

Analog zu der Tabelle für die dreistreifigen Querschnitte sind wieder die wichtigsten Verkehrsbedingungen und als wichtigste Wegbedingung die Längsneigung angegeben. Im Gegensatz zu den dreistreifigen Querschnitten kann nicht ohne weiteres von einer Gleichartigkeit der Umfeldbedingungen ausgegangen werden, da die Strecken räumlich weit entfernt liegen und der Messzeitraum der A8 Ulm – München von dem Messzeitraum der drei anderen Strecken abweicht.

## **Einfluss der Randbedingungen**

Der Einfluss der Umfeldbedingungen ist trotz der räumlichen Entfernung und der unterschiedlichen Messzeiträume sehr gering. Der abweichende Messzeitraum der A8 Ulm – München befindet sich im Mai und damit in einer Zeit, in der die Witterungsbedingungen für den Verkehrsfluss mit denen des Sommers vergleichbar sind. Die Witterungseinflüsse auf den Verkehrsablauf sind in beiden Zeiträumen gering.

Eine Betrachtung der Wegbedingungen ergibt bei den Längsneigungen eine weitgehende Vergleichbarkeit, da fast alle Querschnitte in der Ebene liegen. Einzig der bereits erwähnte „Schorbarer Berg“ verursacht zu berücksichtigende Längsneigungen bei der A4 Leutratatal.

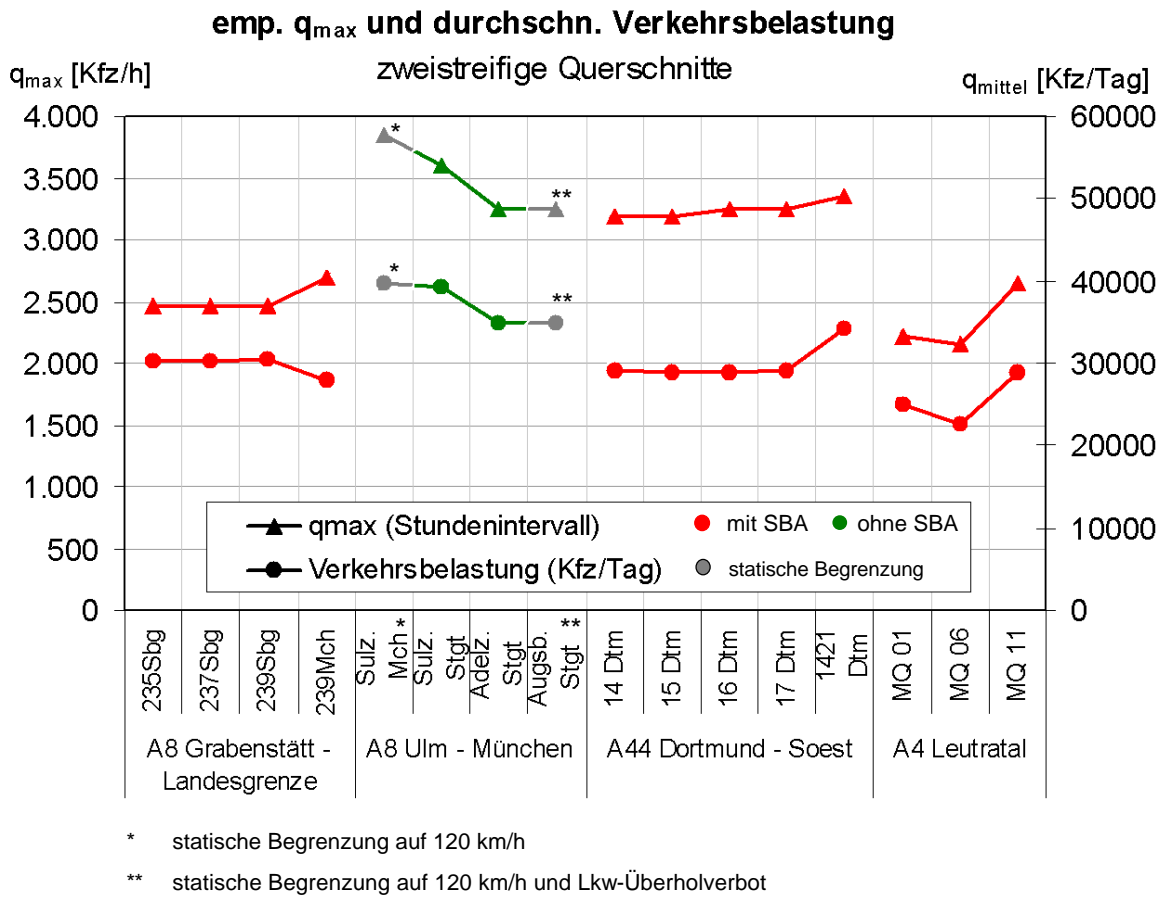
Die Betrachtung konzentriert sich somit auf den Einfluss der Verkehrsbedingungen. Hier stellt sich für das Fahrzeugkollektiv der Sachverhalt so dar, dass für die beiden Strecken der A8 vergleichbare Lkw-Anteile von ca. 15 %, für die beiden anderen Strecken höhere Lkw-Anteile von ca. 20 % vorliegen. Ein entscheidender Einfluss auf den Verkehrsfluss wird darin nicht gesehen.

Die Aussagen zum Fahrerkollektiv können analog zum vorigen Kapitel nicht aufgrund gemessener Kenngrößen, sondern nur aufgrund der Lage der Strecke und des Messzeitraums getroffen werden. Als ausgesprochene Urlauberroute ist die A8 Grabenstätt-Landesgrenze nur durch Urlauberverkehr stark belastet. Dies lässt sich auch an dem (hier nicht dargestellten) Fehlen von Morgen- und Abendspitzen ableiten. Bei der A44 und der A4 kann keine eindeutige Zuordnung getroffen werden; es dürften beide Verkehre auftreten. Die A8 Ulm – München besitzt insbesondere an dem Querschnitt Sulzemoos ein ausgesprochenes Berufspendler-Fahrerkollektiv. Dies ist zum einen aus der räumlichen Nähe zu München und zum anderen aus dem Auftreten deutlicher Morgen- bzw. Nachmittagsspitzen erkennbar.

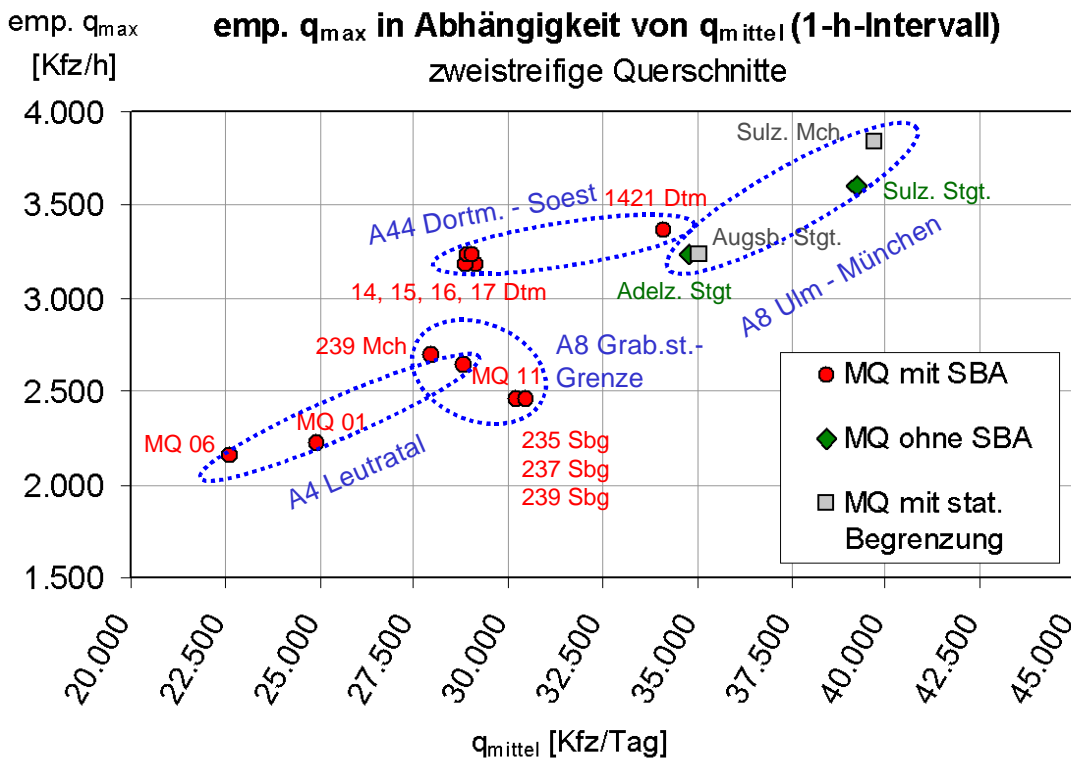
## **Einfluss der Verkehrsbelastung $q_{\text{mittel}}$**

Auch bei der Betrachtung der zweistreifigen Querschnitte erkennt man einen starken Einfluss der Verkehrsbelastung auf die max. Verkehrsstärke. Im Gegensatz zu den dreistreifigen Querschnitten zeigen sich die meisten Querschnitte bei der Betrachtung des q-v-Diagramms allerdings als verkehrlich nicht überlastet, so dass emp.  $q_{\text{max}}$  weniger die Kapazitätsgrenze, sondern die Verkehrsstärke in der Spitzenstunden wiedergibt.

In den folgenden beiden Diagrammen der Abb. 5-4 und der Abb. 5-5 ist emp.  $q_{\text{max}}$  in Abhängigkeit der Strecke bzw. emp.  $q_{\text{max}}$  in Abhängigkeit der durchschnittlichen Verkehrsbelastung  $q_{\text{mittel}}$  aufgetragen.



**Abb. 5-4:** Emp. maximale Verkehrsstärke  $q_{max}$  und durchschnittliche Verkehrsbelastung  $q_{mittel}$  im Untersuchungszeitraum (zweistreifige Querschnitte)



**Abb. 5-5:** Emp. maximale Verkehrsstärke  $q_{max}$  in Abhängigkeit der durchschnittlichen Verkehrsbelastung  $q_{mittel}$  während des Untersuchungszeitraums (zweistreifige Querschnitte)



Wie bereits bei den dreistreifigen Querschnitten ergibt sich eine deutliche Abhängigkeit von emp.  $q_{\max}$  von  $q_{\text{mittel}}$ . Die vier Querschnitte der A8 Ulm – München haben die mit Abstand größte Verkehrsbelastung und auch die höchste max. Verkehrsstärke. Diese liegen in Bereichen, wie sie das HBS als max. Verkehrsstärken für zweistreifige Querschnitte im Ballungsgebiet für Lkw-Anteile von 10-15% angibt. Als einziger Querschnitt mit SBA besitzt der MQ 1421 Dtm auf der A44 eine vergleichbare Verkehrsbelastung zu den unbeeinflussten Querschnitten Adelzhausen Richtung Stuttgart und Augsburg Richtung Stuttgart. Die Querschnitte der A8 Grabenstätt – Landesgrenze liegen bei den max. Verkehrsstärken bei vergleichbarer Verkehrsbelastung deutlich unter den Werten der A44 Dortmund – Soest. Sie liegen auch unter den Angaben des HBS. Wie bereits beschrieben, sind die Querschnitte der A8 Grabenstätt – Landesgrenze aber auch nur gering verkehrlich überlastet, so dass emp.  $q_{\max}$  vermutlich nicht die Kapazität darstellt. Noch deutlich niedriger stellen sich die Maximalwerte der A4 Leutratel dar. Dies ist auf die in den q-v-Diagrammen sichtbaren Rückstauwirkungen aufgrund der hohen Längsneigung der Strecke begründet. Die maximale Verkehrsstärke spiegelt also auch hier nicht die Kapazität wider.

Betrachtet man die Verkehrsbelastung, so verbleibt als einzig möglicher Mit-Ohne-Vergleich mit ähnlichen Verkehrsbedingungen der MQ 1421 Dtm der A44 mit den MQ Adelzhausen Richtung Stuttgart und Augsburg Richtung Stuttgart der A8.

Betriebszustand	Strecke	Querschnitte	Mittelwert von	
			emp. $q_{\max}$ [Kfz/h]	$q_{\text{mittel}}$ [Kfz/Tag]
ohne SBA	A8 Ulm – Mch	Adelz. Ri. Stgt und Augsburg Ri. Stgt.	3.240	34.860
mit SBA	A44 Ri. Dortmund.	1421 Ri. Dtm	3.360	34.110

**Tabelle 5-4: Emp.  $q_{\max}$  und  $q_{\text{mittel}}$  auf den zweistreifigen Querschnitten der Strecken A8 Ulm – München und A44 Dortmund - Soest**

Der Vergleich ergibt eine um knapp 4 % höhere maximale Verkehrsstärke des Mit-SBA-Querschnitts im Vergleich zu dem Mittelwert der beiden unbeeinflussten Querschnitte. Angesichts der geringen Datenbasis (nur drei Querschnitte im Vergleich) und den im vorigen Kapitel ausführlich dargelegten weiteren nicht messbaren Einflussfaktoren liegt dieser Faktor unterhalb der Aussagegenauigkeit des Vergleichs.

**→ Fazit zur Untersuchung der zweistreifigen Strecken:**

Bei den zweistreifigen Strecken wird die gleiche Schlussfolgerung wie bei den dreistreifigen Strecken gezogen: Es gibt keine Hinweise auf eine Kapazitätssteigerung durch SBA (im 1-h-Intervall). Diese Aussage gilt im Rahmen der Untersuchungs-genauigkeit von wenigen Prozent.

## 5.3 Maximale Verkehrsstärke in kürzeren zeitlichen Bezugsintervallen

### 5.3.1 Grundlagen

Die Ausführungen zur Kapazität im vorigen Kapitel 5.2 wurden für das zeitliche Bezugsintervall von einer Stunde durchgeführt. Diese Intervall wurde ausführlich betrachtet, da es die übliche verwendete Größe bei der Untersuchung des Verkehrsflusses auf Autobahnen darstellt. Ein weiterer Vorteil des Stundenintervalls ist, dass der lange Zeitraum eine gute statistische Absicherung gegen zufällige Schwankungen im Verkehrsfluss bietet (siehe Kapitel 3.1.2 – Einfluss des zeitlichen Bezugsintervalls).

Um mögliche Effekte von SBA in kürzeren Zeitintervallen zu entdecken, werden in der vorliegenden Forschungsarbeit auch kürzere zeitliche Bezugsintervalle untersucht. Damit soll die Fragestellung untersucht werden, ob SBA eine Kapazitätssteigerung in kürzeren Zeiträumen ermöglichen und damit kurzzeitig höhere Verkehrsspitzen besser bewältigt werden können. Dies könnte sich in einer Steigerung der kurzzeitigen Kapazität ausdrücken. Wie in Kapitel 3.1.2 bereits erwähnt, soll insbesondere das 5-Minuten-Intervall betrachtet werden, da dieses einen guten Kompromiss zwischen statistischer Aussagefähigkeit und hoher zeitlicher Auflösung darstellt.

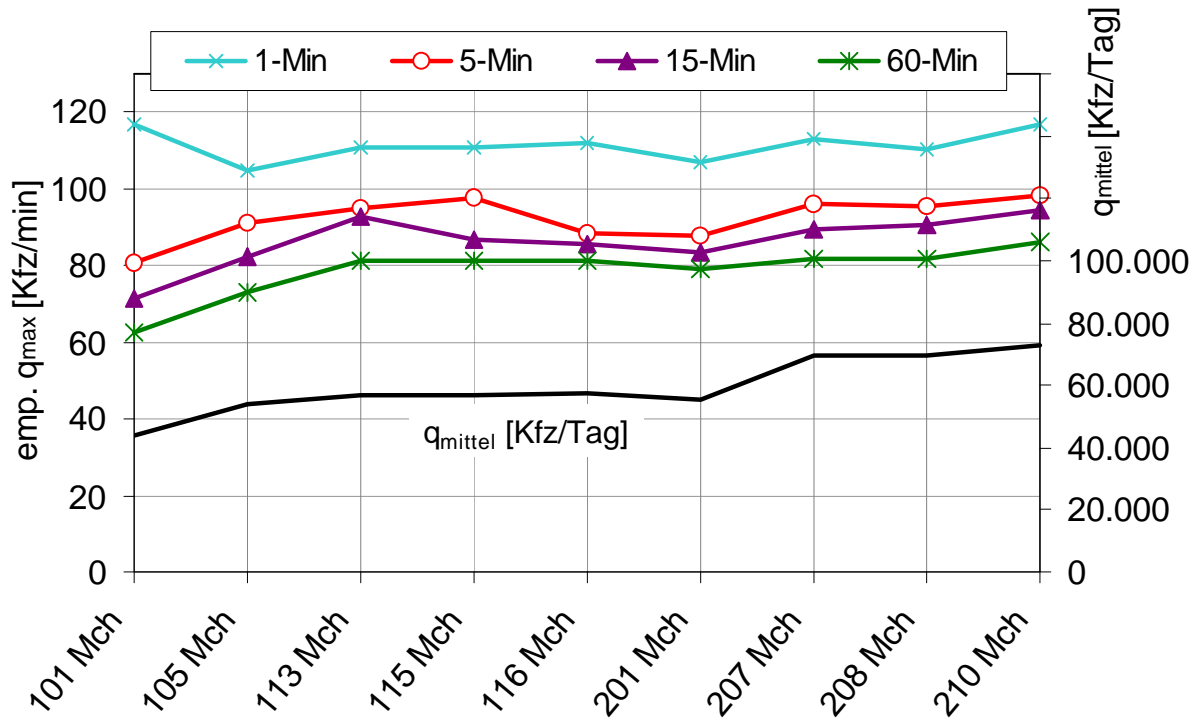
Aus den Ausführungen des vorigen Kapitels ist bekannt, dass sich die Verkehrsverhältnisse zwischen den verschiedenen Querschnitten deutlich unterscheiden. Es sollen daher neben einem Vergleich verschiedener Querschnitte auch Betrachtungen zu den Faktoren zwischen den verschiedenen Bezugsintervallen durchgeführt werden, um Besonderheiten an einzelnen Querschnitten zu erkennen.

### 5.3.2 Betrachtung dreistreifiger Querschnitte

Analog zu Abb. 5-2 werden zuerst Diagramme zur maximalen Verkehrsstärke im Verlauf der Strecken erstellt. In diesen Diagrammen sind die Maximalwerte für die vier Bezugsintervalle im Vergleich zur Verkehrsbelastung dargestellt. Diese sind für beide Richtungsfahrbahnen der A9 in Abb. 5-6 und für die beiden Richtungsfahrbahnen der A99/A8 Ost in der Abb. 5-7 dargestellt. Zur einfacheren Vergleichbarkeit ist bei allen Zeitintervallen die Verkehrsstärke in Kfz/min angegeben.

Man erkennt, wie analog zu der bereits bekannten Abhängigkeit des Stundenintervalls von der Verkehrsbelastung auch die Werte für die 5-Minuten und 15-Minuten-Intervalle eine Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung aufweisen. Die Werte für das 1-Minuten-Intervall setzen sich von diesem Verhalten aber deutlich ab. Dies ist besonders an den Querschnitten der A9 zu erkennen, bei denen die maximale Verkehrsstärken des 1-Minuten-Intervalls kaum von der Verkehrsbelastung abhängen.

### max. Verkehrsstärken A9 Richtung München



### max. Verkehrsstärken A9 Richtung Nürnberg

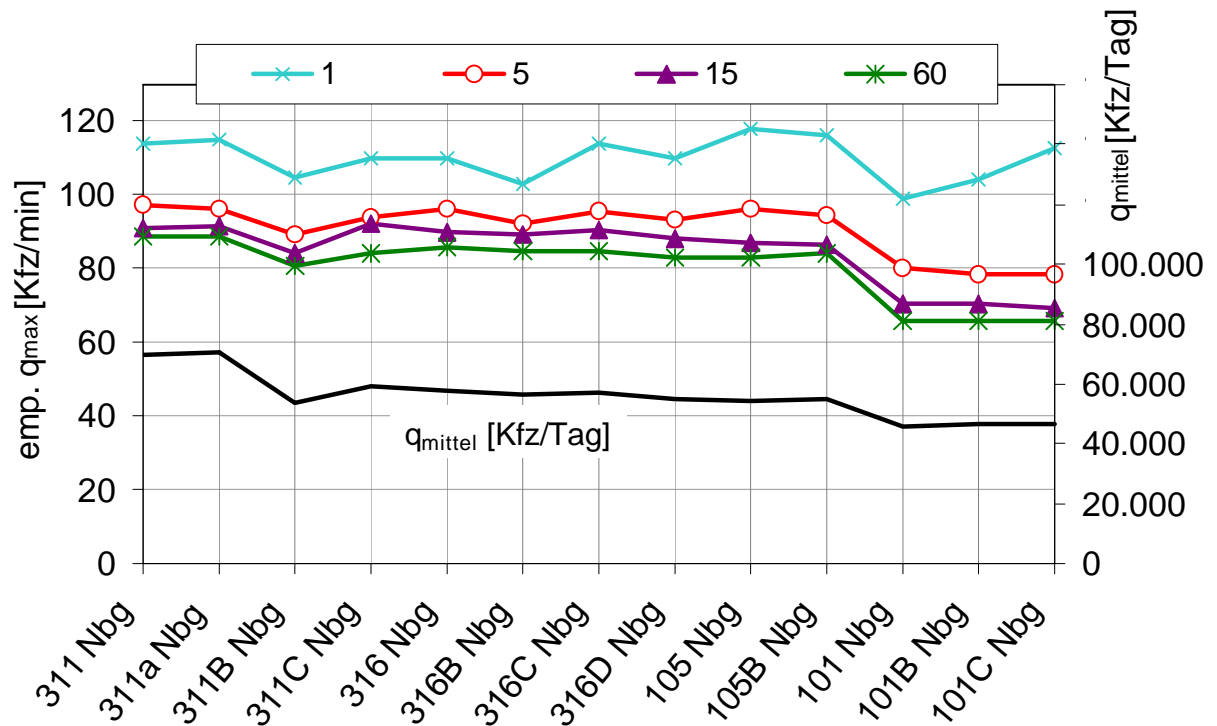


Abb. 5-6: Max. Verkehrsstärken im 1-min-, 5-min-, 15-min- und 60-min-Intervall sowie mittlere tägliche Verkehrsbelastung  $q_{\text{mittel}}$  (dreistreifige Querschnitte der A9 München – Holledau)

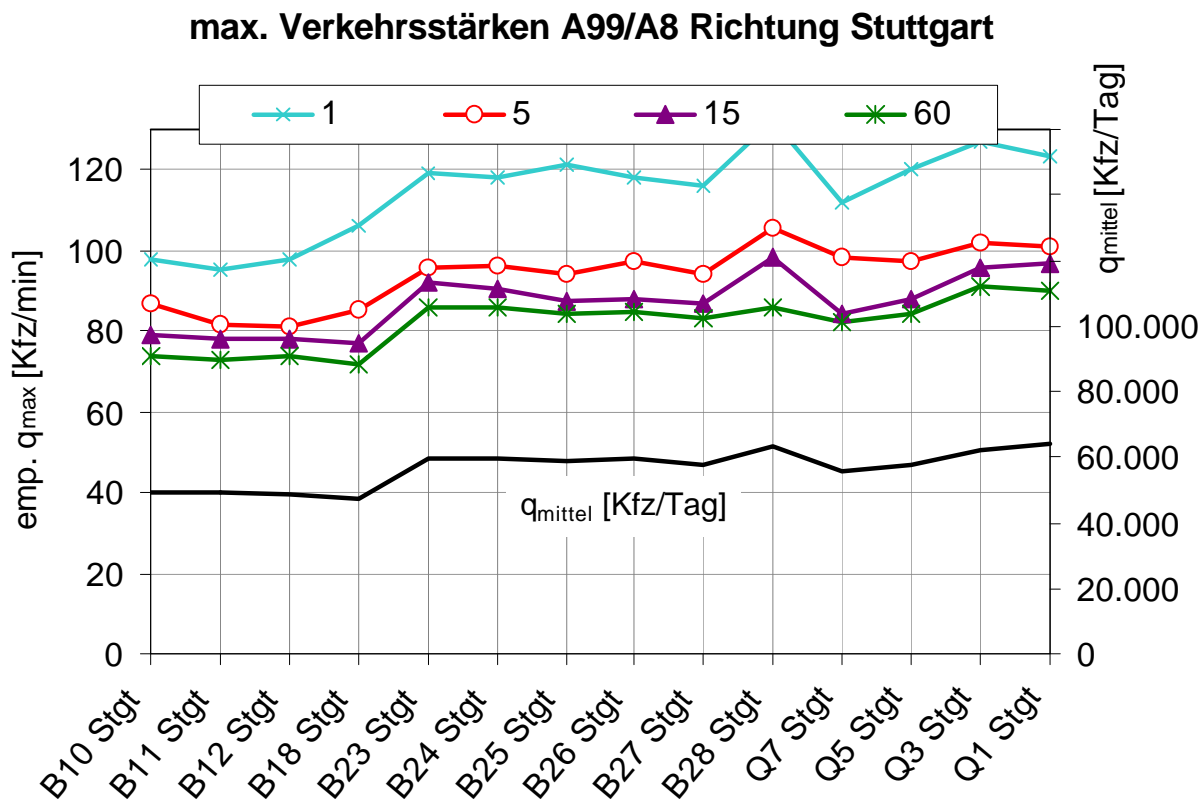
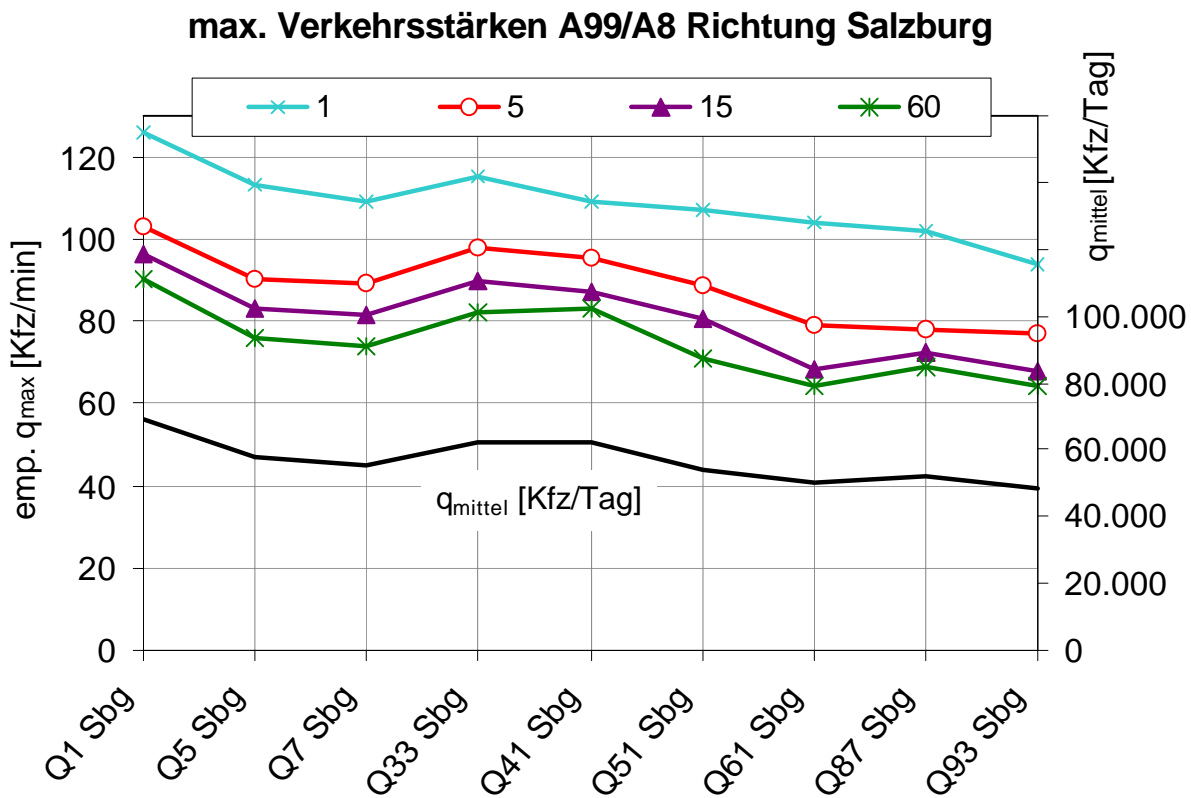


Abb. 5-7: Max. Verkehrsstärken im 1-min-, 5-min-, 15-min- und 60-min-Intervall sowie mittlere tägliche Verkehrsbelastung  $q_{\text{mittel}}$  (dreistreifige Querschnitte der A99/A8 Ost Brunnthal – Bad Aibling)

Nur bei einigen verkehrlich nicht überlasteten Querschnitten der A99/A8 Ost sinken die Werte für das 1-Minuten-Intervall auch mit der Verkehrsbelastung und den Werten für das Stundenintervall ab. Insgesamt gibt es aber nur geringe Unterschiede bei den max. Verkehrsstärken der verschiedenen Querschnitte. Dies bedeutet, dass der Maximalwert für das 1-Minuten-Intervall aus den starken Schwankungen im Verkehrsfluss (Pulks) entsteht und daher keine Aussagen zur Kapazität zulässt. Umgekehrt kann auch die Schlussfolgerung gezogen werden, dass der Maximalwert für das 1-Minuten-Intervall einen bei verkehrlich überlasteten Querschnitten kaum von den Verkehrsbedingungen abhängigen Wert darstellt.

Die Verläufe für das 5-Minuten- und 15-Minuten-Intervall stellen sich bei Betrachtung der vier Diagramme sehr ähnlich zu dem Verlauf des 60-Minuten-Intervalls dar. Es ist davon auszugehen, dass diese beiden Zeitintervalle Aussagen zur Kapazität ermöglichen.

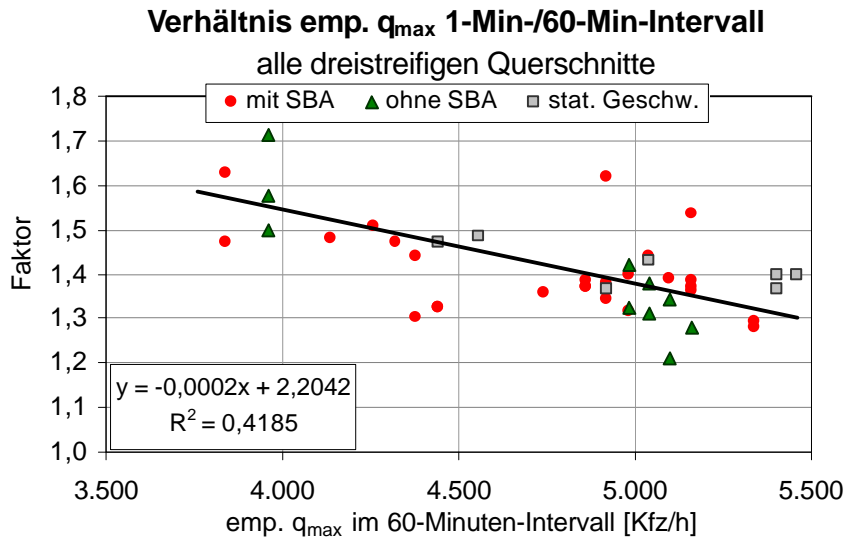
Ein Vergleich der Maximalwerte für das 5-Minuten- und das 15-Minuten-Intervall erfolgt für die in Kapitel 5.2.1 anhand der Gleichartigkeit von Umfeld-, Weg- und Verkehrsbedingung ausgewählten Mit-SBA- bzw. Ohne-SBA-Querschnitte:

Betriebszustand	Strecke	Querschnitte	Mittelwert von emp. $q_{\max}$ [Kfz/min]	
			5-Min-Int.	15-Min-Int.
ohne SBA	A9 Ri. Nbg	311C, 316, 316B Nbg	94,1	90,7
mit SBA	A9 Ri. Mch	113, 115, 116 und 201 Mch	92,1	87,1
mit SBA	A8 Ri. Stgt.	B23, 24, 25, 26, 27 Ri. Stgt	95,4	89,1

**Tabelle 5-5: mittlere emp. maximale Verkehrsstärke  $q_{\max}$  der für einen Vergleich gruppierten Querschnitte in den Bezugsintervallen 5-Min. und 15-Min.**

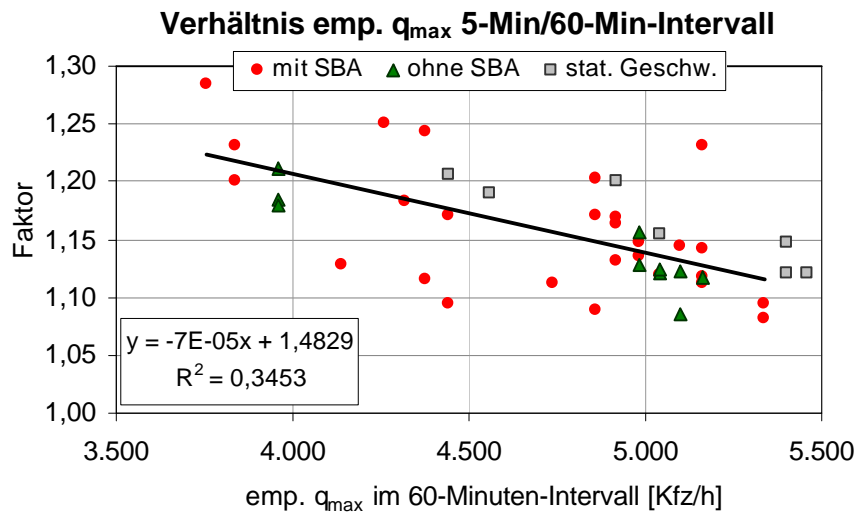
Das Ergebnis ist vergleichbar zu den in Kapitel 5.2.1 betrachteten Stundenintervallen: die Maximalwerte der beeinflussten Querschnitte der A8 Ri. Stuttgart sind zu den der unbeeinflussten Querschnitte der A9 Ri. Nürnberg sehr ähnlich. Die beeinflussten Querschnitte der A9 Ri. München fallen im Vergleich zu den unbeeinflussten Querschnitten etwas ab (-2,1 % im 5-Minuten-Intervall, -4 % im 15-Minuten-Intervall). Der Sachverhalt stellt sich also genauso wie bei der Betrachtung der Stundenintervalle dar. Insgesamt sind die Unterschiede im Hinblick auf die Untersuchungsgenauigkeit zu klein und nicht eindeutig genug, um eine Wirkung der SBA erkennen zu können.

Eine weitere Betrachtung gilt dem Verhältnis der Maximalwerte der kürzeren Intervalle zu dem Maximalwert des Stundenintervalls. Dazu wird ein Faktor gebildet, in dem die maximale Verkehrsstärke des kürzeren Zeitintervalls durch die maximale Verkehrsstärke des Stundenintervalls dividiert wird. Dieser Faktor ist in Abhängigkeit des maximalen Stundenintervalls aufgetragen (Abb. 5-8).



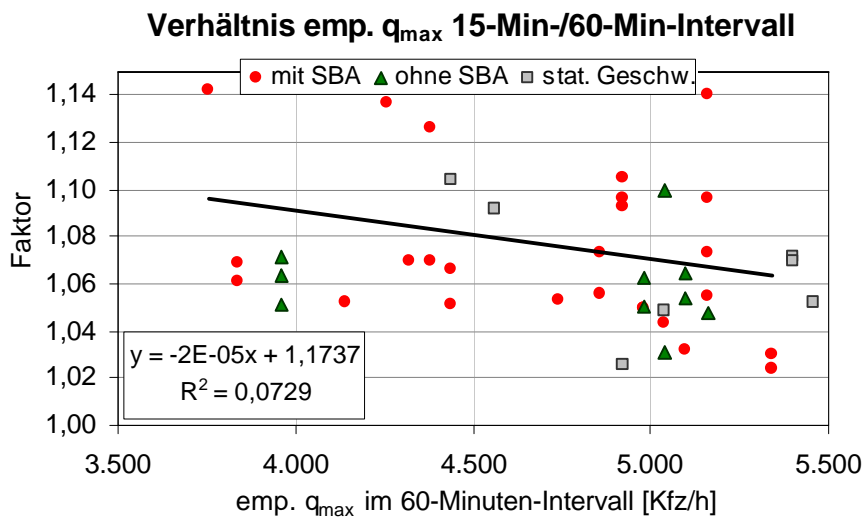
Faktor:

$$f_{1 \leftrightarrow 60} = \frac{\text{emp. } q_{\max, 1\text{min}}}{\text{emp. } q_{\max, 60\text{min}}}$$



Faktor:

$$f_{5 \leftrightarrow 60} = \frac{\text{emp. } q_{\max, 5\text{min}}}{\text{emp. } q_{\max, 60\text{min}}}$$



Faktor:

$$f_{15 \leftrightarrow 60} = \frac{\text{emp. } q_{\max, 15\text{min}}}{\text{emp. } q_{\max, 60\text{min}}}$$

**Abb. 5-8:** Verhältnis der max. Verkehrsstärke kürzerer Zeitintervalle (1-min-, 5-min-, und 15-min-Intervall) zu dem standardmäßig verwendeten 60-min-Intervall (Ergebnisse aller dreistreifigen Querschnitte)

Die drei Diagramme von Abb. 5-8 zeigen die Faktoren  $f_{1\ 60}$ ,  $f_{5\ 60}$  und  $f_{15\ 60}$  entsprechend der Betrachtung des 1-min-, 5-min- und 15-min-Intervalls. In allen Diagrammen ist zu erkennen, wie der Faktor mit zunehmender maximaler Verkehrsstärke im Stundenintervall abnimmt. Bei den maximalen Verkehrsstärken nehmen die Unterschiede bei den Bezugsintervallen also mit zunehmender Verkehrsbelastung ab.

Im einzelnen zeigen sich folgende Merkmale:

- 1-Minuten-Intervall:

Dieses Intervall zeigt die größte Abhängigkeit des Umrechnungsfaktors  $f_{1\ 60}$  von der maximalen Verkehrsstärke im Stundenintervall. Im Bereich sehr hoher Verkehrsstärken liegt dieser zwischen 1,3 und 1,4. Im Vergleich der beeinflussten mit den nicht-beeinflussten Querschnitten zeigt sich, dass die meisten Wertepaare der nicht-beeinflussten Querschnitten geringfügig unterhalb der Regressionsgeraden liegen, also einen etwas geringeren Spitzenwert für die max. Verkehrsstärke im 1-Minuten-Intervall aufweisen.

- 5-Minuten-Intervall

Die Abhängigkeit des Faktors  $f_{5\ 60}$  von der max. Verkehrsstärke im Stundenintervall ist geringer, bei hohen Verkehrsstärken liegt der Faktor  $f_{5\ 60}$  zwischen 1,10 und 1,15. Einige nicht-beeinflusste Querschnitte liegen wieder unterhalb der Regressionsgeraden, besitzen also einen geringeren Spitzenwert.

- 15-Minuten-Intervall

Die Regressionsgerade verläuft horizontaler als bei den beiden anderen Zeitintervallen und somit ist die Abhängigkeit von der maximalen Verkehrsstärke im Stundenintervall geringer. Die einzelnen Werte für die Faktoren streuen deutlich zwischen 1,02 und 1,10. Wie bei den anderen beiden Zeitintervallen liegen auch hier die meisten Werte für die nicht-beeinflussten Querschnitte unterhalb der Regressionsgeraden.

→ **Fazit zur Untersuchung kürzerer Zeitintervallen (dreistreifige Querschnitte):**

Es ergibt sich bei Betrachtung der drei kürzeren zeitlichen Bezugsintervalle keine aus der Streuung zwischen den einzelnen Querschnitten herausragenden Unterschiede bei einem Vergleich der beeinflussten mit den nicht-beeinflussten Querschnitten. Ebenso wurden bei Betrachtung der Absolutwerte für emp.  $q_{\max}$  in kürzeren Zeitintervallen (1-min-, 5-min- und 15-min-Intervall) keine höheren Werte bei den Mit-SBA-Querschnitten festgestellt. Insgesamt gibt es keine Hinweise darauf, dass SBA auch bei Betrachtung von kürzeren Zeitintervallen die Kapazität einer Strecke erhöhen.

### 5.3.3 Betrachtung zweistreifiger Querschnitte

Die Untersuchung der Kapazitäten der zweistreifigen Querschnitte stellt sich aufgrund der Vielzahl der verkehrlich nicht überlasteten Querschnitte nicht so günstig wie bei den dreistreifigen Querschnitten dar (Kapitel 5.2.2). Die Aussagefähigkeit der Datenbasis ist also bei den zweistreifigen Querschnitten geringer und die Untersuchung der Kapazität wird nicht so ausführlich durchgeführt wie bei den dreistreifigen Querschnitten.

Abb. 5-9 zeigt die max. Verkehrsstärken in den zeitlichen Bezugsintervallen 1, 5, 15 und 60 Minuten und die mittlere tägliche Verkehrsbelastung für alle zwei-streifigen Querschnitte. Man erkennt wieder einen deutlichen Zusammenhang des 5-Minuten- und des 15-Minuten-Intervalls mit dem Stundenintervall und einen etwas geringeren Zusammenhang beim 1-Minuten-Intervall. Ein Ausreißer stellt der MQ 06 der A4 Leutratel dar, an dem sich die Stundenkapazität von der Kapazität in den kürzeren Intervallen deutlich unterscheidet. Ein Vergleich der zwei unbeeinflussten Querschnitte der A8 Ulm – München mit dem im Hinblick auf die Verkehrsbelastung vergleichbaren beeinflussten Querschnitt der A44 Dortmund – Soest ergibt folgendes Bild:

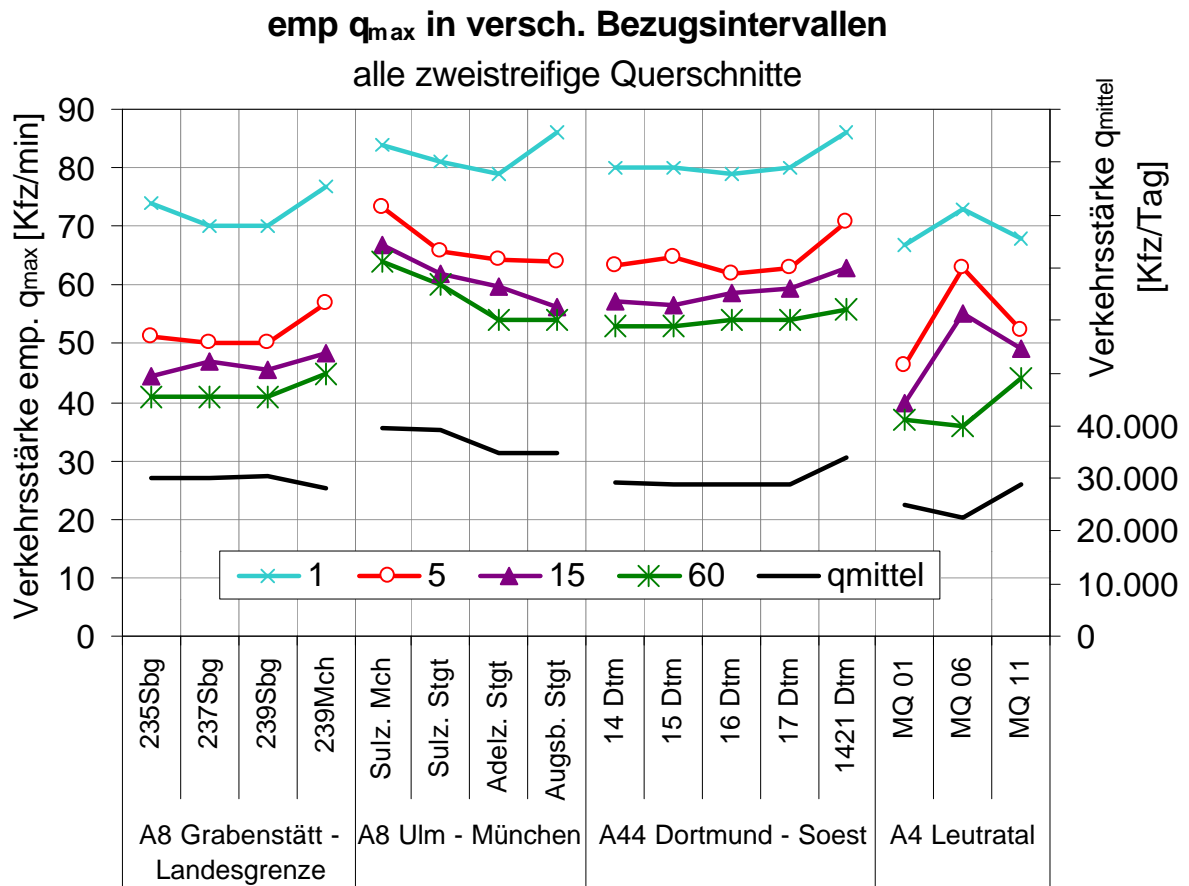
Betriebszustand	Strecke	Querschnitte	Mittelwert von emp. $q_{\max}$ [Kfz/min]	
			5-Min-Int.	15-Min-Int.
ohne SBA	A8 Ulm – M.	Adelz. bzw. Augsburg Ri. Stgt.	64,2	58
mit SBA	A44 Ri. Dtm.	1421 Ri. Dortmund	70,8	63,1

**Tabelle 5-6: mittlere emp. maximale Verkehrsstärke der für einen Vergleich gruppierten Querschnitte in den Bezugsintervallen 5-Min. und 15-Min.**

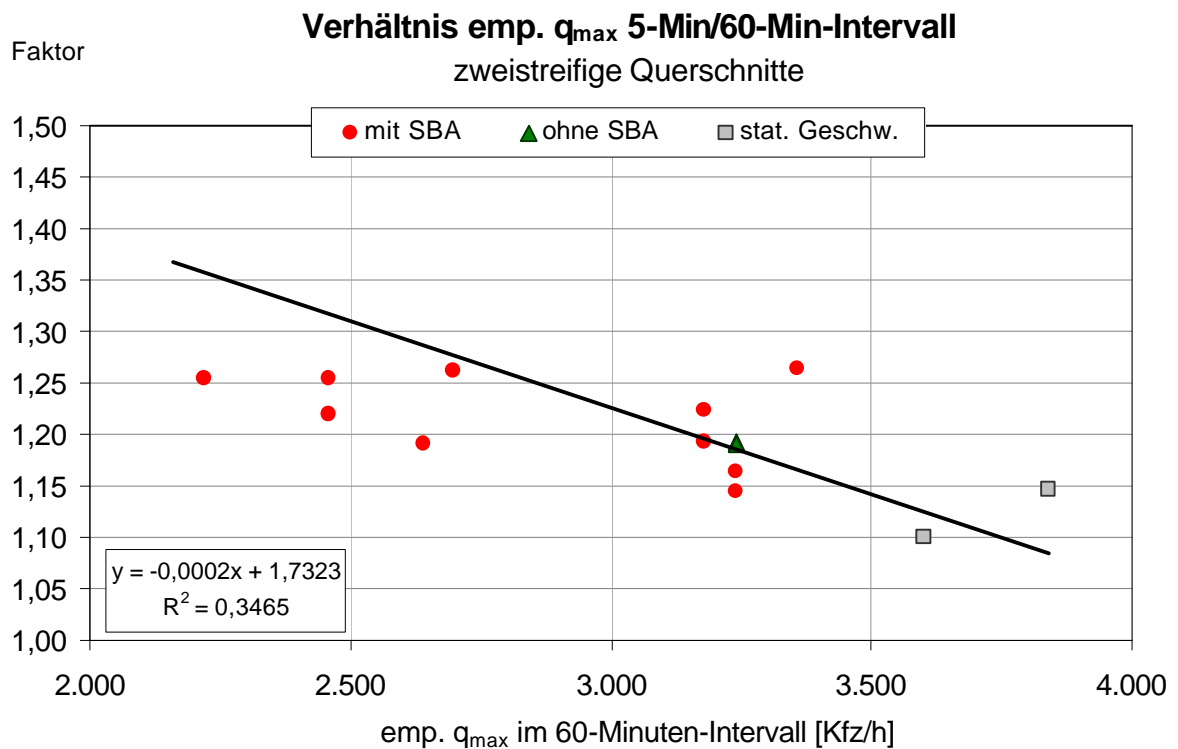
Ein Vergleich der Werte ergibt eine um 10,3 % höhere Kapazität im 5-Minuten-Intervall und eine um 8,8 % höhere Kapazität im 15-Minuten-Intervall des Mit-SBA-Querschnitts im Verhältnis zum Mittelwert der beiden Ohne-SBA-Querschnitte. Im Vergleich dazu lag der Wert für das Stundenintervall um knapp 4 % höher beim Mit-SBA-Querschnitt. In diesem Fall liegen die Kapazitäten in kürzeren Intervallen merkbar höher als beim Stundenintervall, was evtl. auf einen Effekt der SBA zurückzuführen sein könnte. Da dieses Ergebnis aber auf nur einem Querschnitt basiert, könnten auch örtliche Besonderheiten der Grund sein.

Abb. 5-10 stellt die Faktoren für den 5-Minuten-Wert in Bezug auf den 60-Minuten-Wert in Abhängigkeit des Stundenintervalls dar. Es zeigen sich deutliche Parallelen zu dem Verlauf der Regressionsgeraden bei den dreistreifigen Querschnitten: bei den verkehrlich überlasteten Querschnitten liegen die Faktoren zwischen 1,1 und 1,2.





**Abb. 5-9:** Max. Verkehrsstärken in den zeitlichen Bezugsintervallen 1, 5, 15 und 60 Minuten und mittlere tägliche Verkehrsbelastung (alle zweistreifigen Querschnitte)



**Abb. 5-10:** Verhältnis der max. Verkehrsstärke in dem zeitlichen Bezugsintervall 5 Minuten zu dem standardmäßig verwendeten Zeitintervall 60 Minuten (alle zweistreifigen Querschnitte)

## 5.4 Maximale Verkehrsstärke in Abhängigkeit des Schaltzustands

### 5.4.1 Grundlagen

Der Vergleich der maximalen Verkehrsstärken, die bei unterschiedlichen Schaltzuständen aufgetreten sind, ergibt gemäß den in Kapitel 4.2 beschriebenen Methoden einen *unechten Mit-Ohne-Vergleich*. Dies bedeutet, dass zwar die Weg- und Umfeldbedingungen identisch sind, aber eine systematische Verzerrung hinsichtlich der Verkehrsbedingungen eintritt. Dies liegt daran, dass die SBA in Abhängigkeit des Verkehrszustands die verkehrlichen Anordnungen erlässt und schließlich auf den Verkehr einwirkt. Es ist also bei der Betrachtung von Messwerten nicht klar, ob der Verkehrszustand durch den Schaltzustand verursacht wurde oder der Schaltzustand durch den Verkehrszustand.

Trotzdem liegt ein derartiger Vergleich auf der Hand und wurde in verschiedenen früheren Untersuchungen durchgeführt. Zahlreiche bisherige Erkenntnisse zu den Wirkungen von temporären Geschwindigkeitsbegrenzungen basieren hierauf (Kapitel 3.2.2).

Zur Untersuchung des Verkehrsflusses in Abhängigkeit des Schaltzustands ist es notwendig, die Daten der Messgrößen mit den Daten der aufgezeichneten Schaltzustände zu verknüpfen. Dabei ist ein zeitliches und ein räumliches Problem zu lösen. Das zeitliche Problem entsteht durch die sekundengenaue Schaltung der Anzeigen und die minütlichen Messungen des Verkehrsflusses. Wie bereits in Kapitel 4.4.2 erläutert, wurde dies gelöst, indem die Schaltzustände in Minutenintervallen zusammengefasst wurden. Bei (selten vorkommenden) mehreren Schaltungen pro Minute wurde der überwiegende Schaltzustand dem Minutenintervall zugewiesen. Das räumliche Problem besteht darin, dass Mess- und Anzeigequerschnitt bei SBA häufig aus wirtschaftlichen Gründen an die gleiche Stelle gelegt werden. Da der Abstand zwischen den AQ aber in der Regel 1,5 bis 2 km beträgt, ist der dem AQ nächstfolgende MQ recht weit entfernt. Bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h beträgt die Fahrzeit ca. eine Minute, was zu einem (absichtlichen oder unabsichtlichen) Vergessen der verkehrsrechtlichen Anordnungen führen könnte. Auf jeden Fall dürfte der Befolgungsgrad sich 2 km hinter einem Anzeigequerschnitt geringer darstellen. Eine Verknüpfung mit dem am AQ liegenden MQ erzeugt das Problem, dass nicht damit gerechnet werden kann, dass der Verkehrsteilnehmer sofort mit Durchfahren des AQ seine Fahrweise den Anzeigen angepasst hat. Beide Verknüpfungsmethoden haben also Vor- und Nachteile. Mittels der vergleichenden Untersuchung verschiedener Verknüpfungen konnte aber festgestellt werden, dass die sich ergebenden Unterschiede gering sind, da sich in der Regel der Schaltzustand über mehrere AQ hinweg nicht verändert und die Verkehrsteilnehmer dementsprechend ein gleichmäßige Fahrweise aufweisen.

### 5.4.2 Exemplarische Betrachtung eines dreistreifigen Querschnitts an der A9

Die Verknüpfung der Verkehrsdaten des MQ 116 der A9 Fahrtrichtung München mit den Anzeigen der Wechselverkehrszeichen des darüber liegenden AQ 116 ergibt in der Form des q-v-Diagramms die acht Diagramme der Abb. 5-11. In dieser Abbildung zeigen ein Diagramm die Verhältnisse für keine Geschwindigkeitsbeschränkung („frei“), vier Diagramme die Verhältnisse für die Anordnungen des Typ-A-WVZ (also Begrenzungen T60, T80, T100 und T120) und drei Diagramme die Verhältnisse für die Anordnung „Lkw-Überholverbot“ bzw. den Hinweis „Stau“ des Typ-B-WVZ oder „Staugefahr“ des Typ-C-WVZ. Die Diagramme entstehen aus Messwerten von 1-Minuten-Intervallen.

Man erkennt bei den Geschwindigkeitsbegrenzungen sowohl deutliche Überschreitungen bei den niedrigen Beschränkungen T60 und T80 als auch deutliche Unterschreitungen bei den hohen Beschränkungen T100 und 120. Die Punktwolke für den Schaltzustand „Lkw-ÜV“ umfasst einen weiten Bereich niedriger bis hoher Verkehrsstärken und mittlerer bis hoher Geschwindigkeiten. Im sehr niedrigen Geschwindigkeitsbereich (< 50 km/h) tritt keine Anzeige von Lkw-ÜV auf, da dann das Typ-B-WVZ mit der Anzeige „Stau“ belegt ist. Ein ähnlicher Effekt tritt bei der Anzeige „Schleudergefahr“ ein, die bei hohen Verkehrsstärken überwiegend nicht angezeigt werden kann, da dann das Typ-B-WVZ mit „Lkw-ÜV“ belegt ist.

Insgesamt fallen bei den Diagrammen der Abb. 5-11 vor allem die weiten Streubereiche der Messwerte und die Überlappungen der verschiedenen Schaltzustände ins Auge. Der Grund ist zum einen der stark schwankende und von Zufälligkeiten geprägte Verkehrsfluss im zeitlichen Bezugsintervall von 1 Minute. Ein weiterer Grund ist, dass keine festen Schwellwerte für die Schaltung von Anzeigen vorliegen, da der Steueralgorithmus die Grenzwerte unter Verwendung eines Prognosemodells mit einer geschwindigkeitsabhängigen Einbeziehung des Lkw-Anteils festlegt (Kapitel 2.3.3).

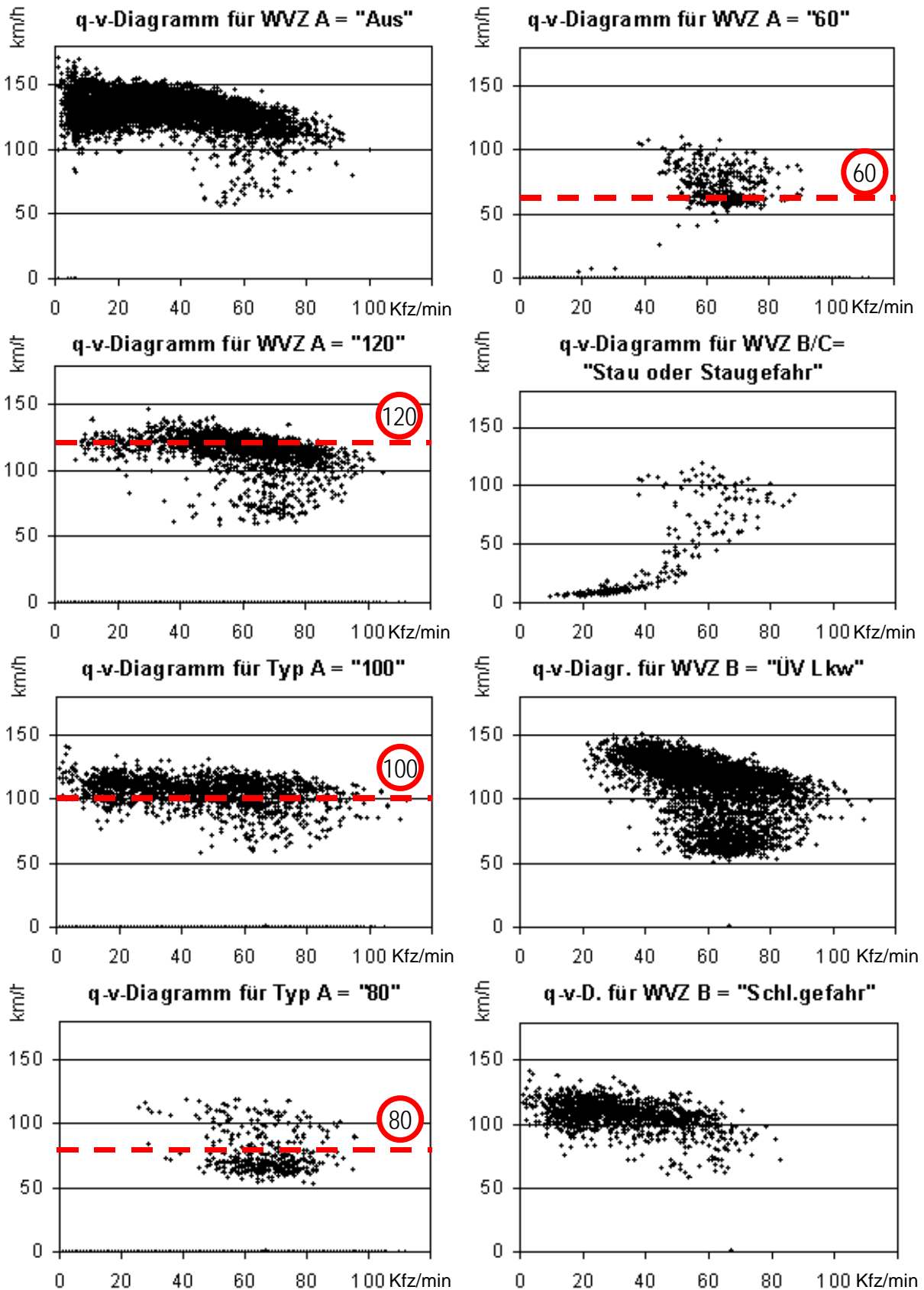


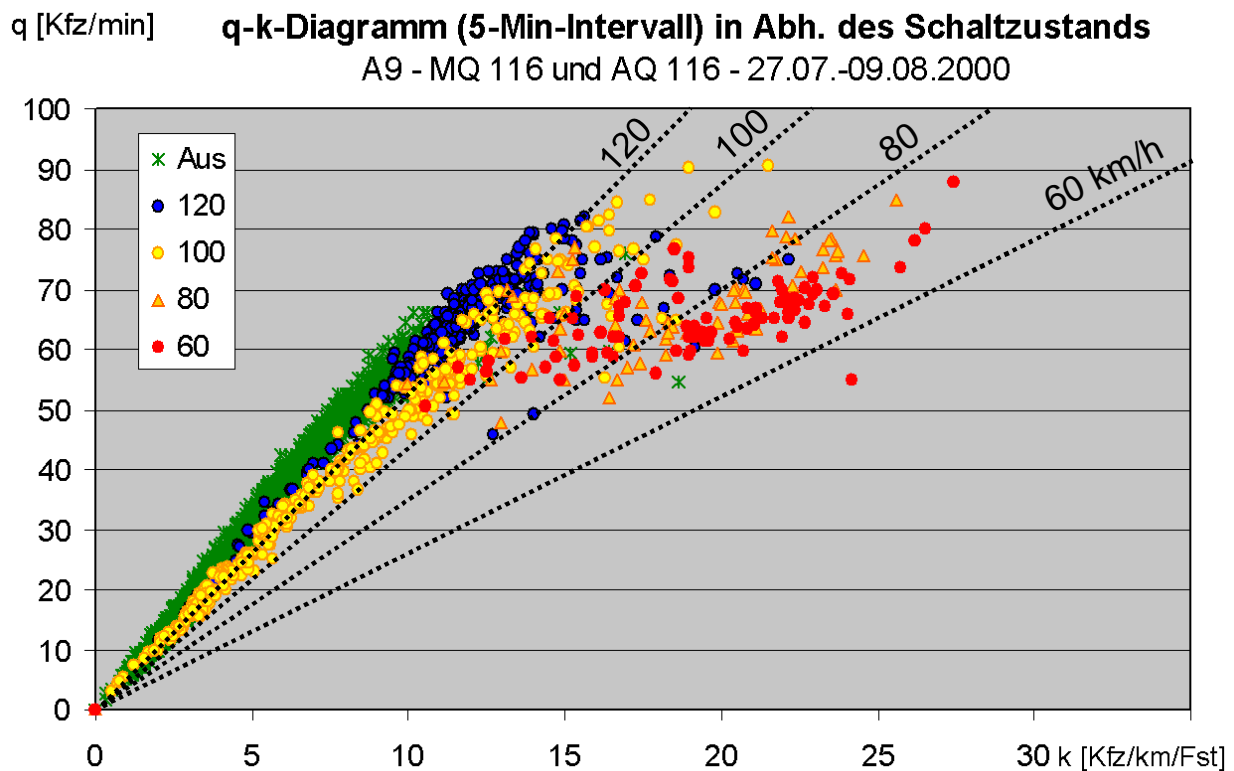
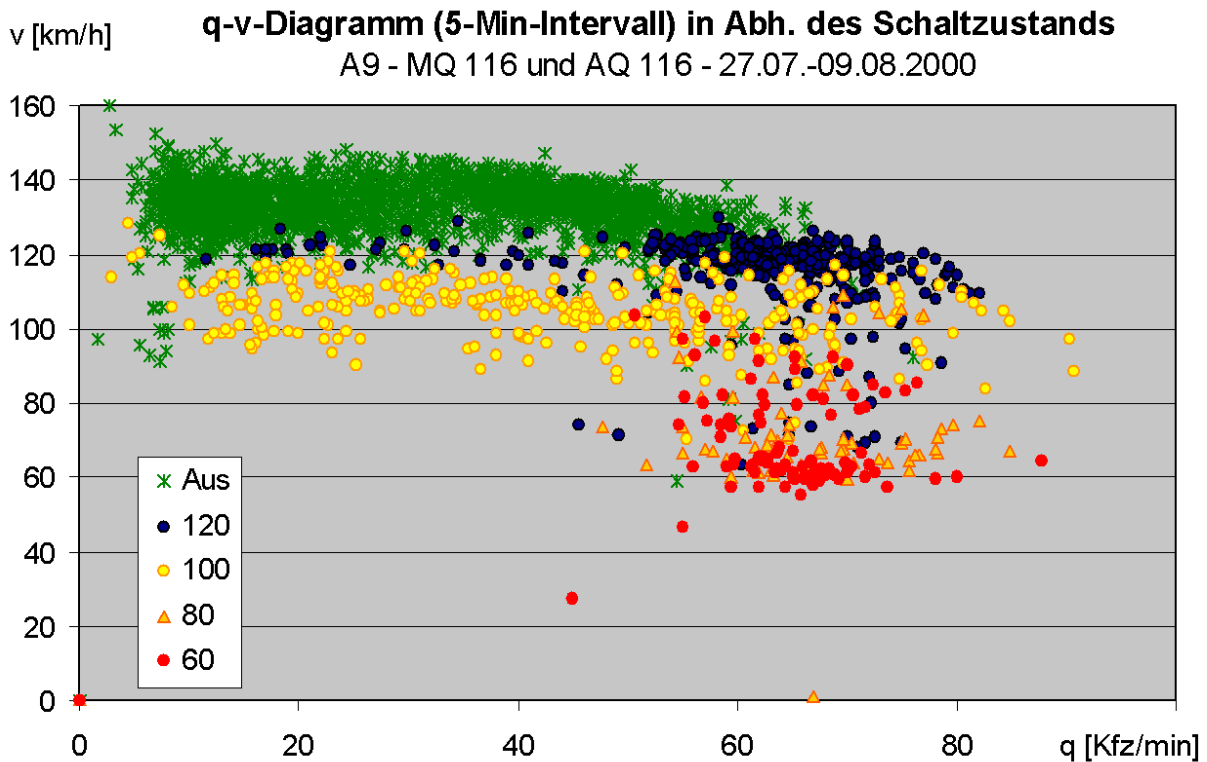
Abb. 5-11: q-v-Diagramme getrennt nach Schaltzustand für den dreistreifigen MQ 116 der A9 in Bezug auf den AQ 116, Betrachtung im zeitlichen Bezugsintervall von 1 Minute

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde daher ein weiteres q-v- und q-k-Diagramm erstellt (Abb. 5-12), das den im 5-Minuten-Intervall aggregierten Verkehrsfluss in Abhängigkeit der geschalteten Geschwindigkeitsbegrenzungen zeigt. Dazu mussten allerdings die Intervalle weggelassen werden, die wegen eines Umschaltvorgangs innerhalb des 5-Minuten-Intervalls nicht eindeutig einem Schaltzustand zugeordnet werden konnten. Als Kriterium wurde verwendet, dass innerhalb der fünf Minuten der betrachtete Schaltzustand mindestens vier Minuten angezeigt werden musste.

Abb. 5-12 zeigt, wie der Schaltzustand „frei“ - abgesehen von wenigen Ausreißern – im Geschwindigkeitsbereich oberhalb 120 km/h und für Verkehrsstärken bis zu 70 Kfz/min auftritt. Die bei niedrigeren Verkehrsstärken (< 50 Kfz/min) angezeigten T120 und T100 entstehen aus umfeldbedingten Geschwindigkeitsbeschränkungen (starker Regen, Schleudergefahr). Die niedrigen Beschränkungen auf T60 und T80 finden sich nur in Bereichen sehr hoher Verkehrsstärken (> 60 Kfz/min). Für beide Beschränkungen sind einige Messwerte mit einer deutlichen Überschreitung der angezeigten Geschwindigkeit durch die Verkehrsteilnehmer erkennbar. Bei einer Toleranzgrenze von 10 km/h sind es allerdings nur noch wenige Messpunkte, bei denen eine deutliche Geschwindigkeitsüberschreitung und damit ein offensichtliches Akzeptanzproblem der Anzeigen auftritt. Bei den Beschränkungen T100 und T120 ist auch der umgekehrte Fall zu erkennen, dass das Geschwindigkeitsniveau der Verkehrsteilnehmer deutlich unter der maximal erlaubten Geschwindigkeit liegt. Bei diesen Messwerten hat die SBA nicht rechtzeitig auf Veränderungen im Verkehrsfluss reagiert und für kurze Zeit eine unangepasst hohe Geschwindigkeitsbegrenzung angezeigt. Dies ist auch die Erklärung für die einzelnen Schaltzustände „frei“ bei hohen Verkehrsstärken.

Bei der Beurteilung der max. Verkehrsstärken in Abhängigkeit des Schaltzustands stellt sich nun das Problem dar, aus den überlappenden Punktwolken Aussagen zu treffen. Dies wäre mit statistischen Methoden zur Bildung von Clustern lösbar (z.B. ellipsenförmige Bereichseinteilung wie in HOFFMANN-LEICHTER 1997). Eine etwas andere Vorgehensweise wurde in der Untersuchung von STEINHOFF et. al. (2002) vorgenommen, bei der verzögerte Schaltungen oder Fehlschaltungen von SBA genutzt wurden, um Messdaten des unbeeinflussten Verkehrs an Mit-SBA-Querschnitten zu bekommen. Da in dieser Untersuchung die Messzeiträume wesentlich länger waren, konnten dadurch ausreichend Mit-Ohne-Vergleichsdaten gewonnen werden.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird von der weiteren Analyse von Mit-Ohne-Vergleichen abgesehen, da das Hauptproblem der wechselseitigen Beeinflussung von Verkehrs- und Schaltzustand prinzipiell nicht gelöst werden kann. Die sich ergebenden Aussagen zur Kapazität in Abhängigkeit des Schaltzustands unterliegen erheblichen Verzerrungen.



**Abb. 5-12:** q-v- und q-k-Diagramm für den Verkehrszustand in Abhängigkeit des Schaltzustands des Typ-A-WVZ, Darstellung für den MQ 116 in Bezug auf den AQ 116 im zeitlichen Bezugsintervall von 5 Minuten

## 5.5 Temporäre Standstreifenfreigabe (A94)

Die Dimensionierung von Straßen auf kurzzeitige Spitzenbelastungen führt zu unwirtschaftlichen und unnötig flächenintensiven Bauwerken. Diese Spitzenbelastungen können z.B. Samstag mit Urlauberverkehr, Großveranstaltungen wie Messen oder auch kurzzeitiger morgendliche Berufsverkehr sein. Eine sehr effiziente Methode zur Bewältigung von Spitzenbelastungen der Verkehrsnachfrage bietet sich auf Autobahnen durch die zeitweilige Nutzung des Standstreifens an. Einer möglichen Verminderung der Verkehrssicherheit kann mit technischen Einrichtungen zur Überwachung des Verkehrsflusses begegnet werden. Ein derartiges System lässt sich sehr gut in eine Streckenbeeinflussungsanlage integrieren, da zum einen vorhandene Mess-, Anzeige- und Steuerungseinrichtungen mitverwendet werden können und zum anderen das Fehlen des Standstreifens sicherheitstechnisch durch die Schaltung einer Geschwindigkeitsbegrenzung und durch die mögliche Warnung vor einem liegengebliebenen Fahrzeug aufgefangen werden kann.

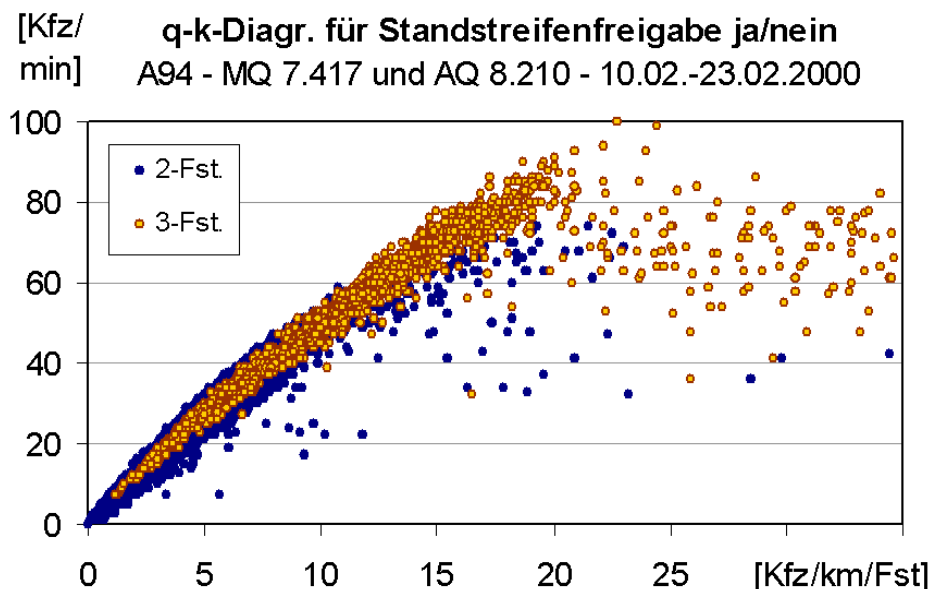
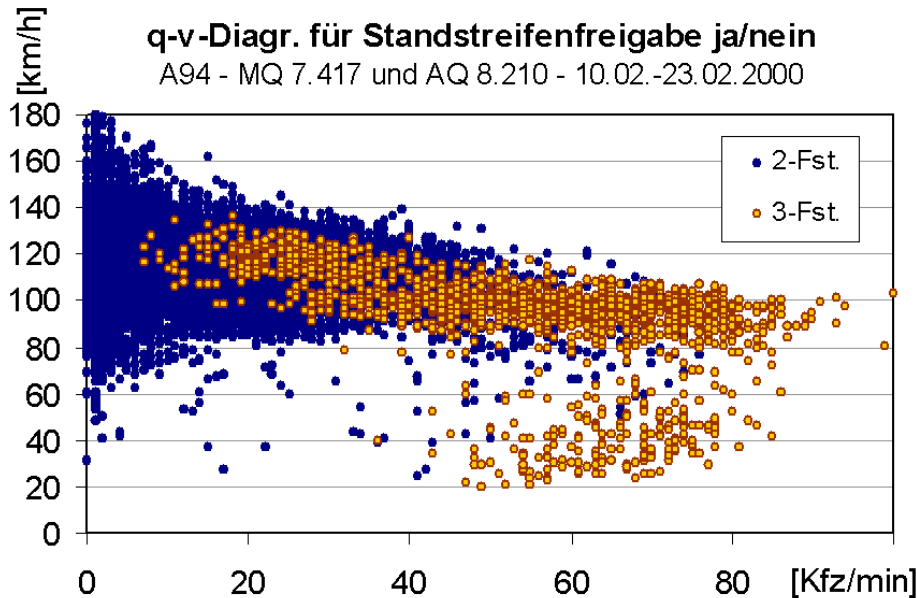
Im Ballungsraum München existieren zwei Strecken, A94 - Messe Riem und A99 AK München-Nord bis AK München-Ost, auf denen – vorerst im Rahmen von Pilotprojekten – Streckenbeeinflussungsanlagen mit temporärer Standstreifenfreigabe errichtet wurden (AUTOBAHNDIREKTION SÜDBAYERN 2001). Da diese Anlagen auch Einrichtungen zur dynamischen Wechselwegweisung enthalten, werden sie mit Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA) bezeichnet.

Die Freigabe des Standstreifens erfolgt bei diesen Anlagen halbautomatisch. Dies bedeutet, dass der Steueralgorithmus aus den verkehrlichen Kenngrößen  $q$ ,  $k$ , und  $v$  die Notwendigkeit der Standstreifenfreigabe ermittelt, die Freigabe aber nur manuell durch einen Operator erfolgt, der mittels Videoüberwachung die Befahrbarkeit des Standstreifens prüft. Bei Abnahme der Verkehrsbelastung wird die Freigabe des Standstreifens zurückgenommen.

Im Rahmen dieser Untersuchung stand ein 14-tägiger Datensatz zweier Mess- und Anzeigequerschnitte der A94 im Bereich der neuen Messe Riem zur Verfügung. Die beiden Querschnitte wurden ausgewählt, da man sich in diesem Bereich Verkehrsüberlastungen und damit Aussagen zur Kapazität vorhanden sind. Allerdings befinden sich an dieser Stelle komplexe örtliche Randbedingungen, da eine dynamische Wechselwegweisung installiert ist und außerdem wenige hundert Meter hinter dem Messquerschnitt MQ 7.417 eine Fahrstreifenabstraktion durch Ausfädelung eines Fahrstreifens erfolgt.

Abb. 5-13 veranschaulicht das Verkehrsgeschehen und ermöglicht einen Vergleich zwischen der Situation mit bzw. ohne Standstreifenfreigabe. Im  $q$ - $v$ - und im  $q$ - $k$ -Diagramm ist eine deutliche Überlappung der Punktwolken der zwei Bereiche zu sehen. Dies liegt daran, dass die Standstreifenfreigabe nicht strikt nach Verkehrs-

stärke oder Verkehrsdichte, sondern auch in Erwartung von hohen Verkehrsbelastungen geschaltet wird. Die Punktwolke für den dreistreifigen Bereich ist horizontaler und weniger gestreut ausgeprägt, da sie weniger Phasen des freien Verkehrsflusses umfasst. Sie reicht in Bereiche höherer Verkehrsstärken als die Punktwolke für den zweistreifigen Zustand, da oberhalb einer gewissen Verkehrsstärke immer die Standstreifenfreigabe erfolgt. Die maximale Verkehrsdichte ist pro Fahrstreifen betrachtet auf dem stabilen Ast des q-k-Diagramms für beide Bereiche gleich.



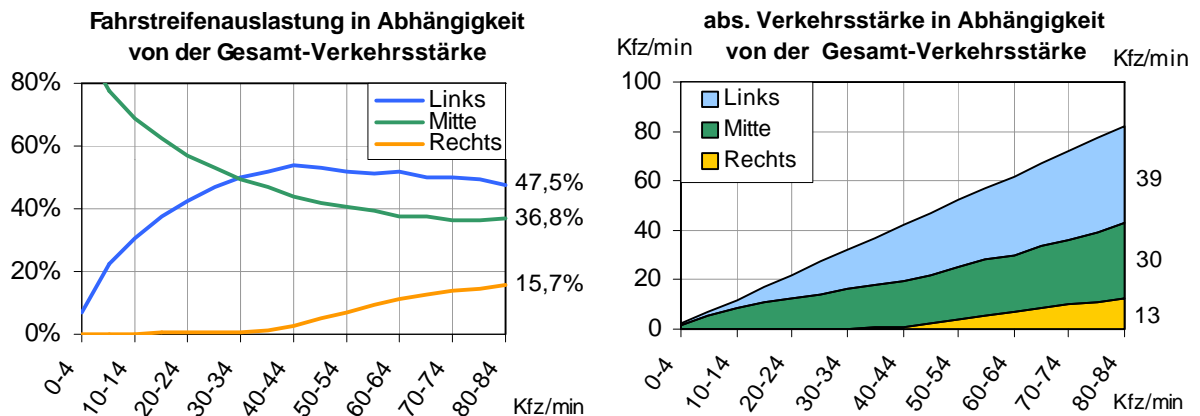
**Abb. 5-13:** Verkehrsfluss in Abhängigkeit des gesperrten (2-Fst.) oder freigegebenen Standstreifens (3-Fst.) am MQ 7.717 in Bezug zum Schaltzustand des AQ 8.210

Vergleicht man die maximale Verkehrsstärken der zwei Zustände, so ergibt sich eine Steigerung der maximalen Verkehrsstärke von zwei- auf dreistreifig von 68 auf 85 Kfz/min, also um ca. 25 % (Betrachtung des 99,9%-Quantilwertes, um den Einfluss einzelner Ausreißer-Messwerte auszufiltern). Die Steigerung ist also wesent-



lich kleiner, als man sie bei einer Freigabe eines zusätzlichen Fahrstreifens vermuten werden könnte (idealerweise 50 % mehr Kapazität).

Der Grund liegt nicht in einer unzureichenden Anlagenkonzeption, sondern in den besonderen örtlichen Verhältnissen. Abb. 5-14 zeigt die relative Verteilung des Verkehrs und die absolute Verkehrsbelastung auf den Fahrstreifen in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung (Erläuterung zur Methodik der Einteilung in Verkehrsstärke-Klassen in Kapitel 7.2).



**Abb. 5-14: Relative und absolute Fahrstreifenbelastung des MQ 7.417 der A94 Steinhausen – Parsdorf in Abhängigkeit der Gesamt-Verkehrsstärke am Querschnitt**

In beiden Diagrammen ist zu sehen, dass die Freigabe des Standstreifens erst ab einer Verkehrsstärke von ca. 40 Kfz/min erfolgt. Bei niedrigeren Verkehrsstärken befindet sich also auf dem rechten Fahrstreifen (dem Standstreifen) kein Verkehr. Mit zunehmender Verkehrsstärke nimmt der zeitliche Anteil der Freigabe zu, bei hohen Verkehrsstärken ist der Standstreifen immer freigegeben. Trotzdem erreicht der rechte Fahrstreifen einen Maximalanteil am Gesamtverkehr von nur knapp 16 %, ist also im Vergleich zu den anderen Fahrstreifen wesentlich weniger ausgelastet. Dies zeigt sich auch bei Betrachtung der maximalen, absoluten Verkehrsstärke auf dem freigegebenen Standstreifen von 13 Kfz/min, also ein Wert weit unter maximal möglichen Verkehrsstärken.

Der Grund hierfür liegt nicht in anlagenspezifischen Bereichen, sondern in der örtlichen Gegebenheit mit der Fahrstreifensubtraktion kurz hinter dem Messquerschnitt. Detailanalysen von Ganglinien der Verkehrsstärke und Geschwindigkeit (nicht abgebildet) zeigen, dass der durchfahrende Verkehr auf dem linken und mittleren Fahrstreifen bleibt, und nur der Abbiegeverkehr auf den rechten, freigegebenen Fahrstreifen wechselt. Dies zeigt sich z.B. daran, dass häufig auf den linken beiden Fahrstreifen Verkehrsüberlastungen mit niedriger Geschwindigkeit messbar sind, während auf dem rechten Fahrstreifen noch freie Fahrt vorherrscht.

Eine Interpretation der empirischen maximalen Verkehrsstärken (Abb. 5-15) muss diese besonderen Umstände berücksichtigen:

	1-min	5-min	15-min	60-min	1-h	$q_{\text{mittel}}$ [Kfz/Tag]	Lkw-Anteil
$q_{\text{max}}$ [Kfz/min]	100	81,6	75,9	68	4.098	27.929	5,4%

**Abb. 5-15: emp.  $q_{\text{max}}$  und  $q_{\text{mittel}}$  für den MQ 7.417 der A94 Steinhausen-Parsdorf**

Die Ergebnisse für die max. Verkehrsstärken liegen zwischen den Ergebnissen für zwei- und dreistreifige Querschnitte. Sie liegen z.B. nicht wesentlich über den gemessenen Maximalwerten der Querschnitte der A8 Ulm-München.

Zieht man in die Betrachtung die Verkehrsbelastung während des Untersuchungszeitraums ein und vergleicht nun mit ähnlichen Querschnitten (Abb. 5-5), so zeigt sich eine sehr deutliche Steigerung der max. Verkehrsstärke im Vergleich zu zwei-streifigen Querschnitten. Im zeitlichen Bezugsintervall von einer Stunde ergibt eine maximale Verkehrsstärke von ca. 4.100 Kfz/h im Vergleich zu einem Wert von ca. 2.700 Kfz/h der Regressionsgeraden von Abb. 5-5 und damit eine Steigerung um ca. 50 %.

**→ Fazit zur temporären Standstreifenfreigabe:**

Die Aufnahme der temporären Standstreifenfreigabe in den Funktionskatalog von SBA wird als eine sehr erfolgreiche Maßnahme zur Erhöhung der Kapazität beurteilt. Bei Vorliegen geeigneter Rahmenbedingung ist davon auszugehen, dass die Kapazität einer dementsprechend ausgerüsteten Strecke um einen Fahrstreifen steigt. Der resultierende volkswirtschaftliche Nutzen wird in Kapitel 9.4.4 berechnet.

## 6 LEISTUNGSFÄHIGKEIT

### 6.1 Grundlagen

Im Gegensatz zu Kapazitätsuntersuchungen, bei denen nur Verkehrsstärken betrachtet werden, wird bei Leistungsfähigkeitsuntersuchungen das Verhältnis von Geschwindigkeit und Verkehrsstärke analysiert (siehe Definition in Kapitel 3.1.1). Ein weiterer Unterschied ist, dass nicht ein einzelner Maximalwert, sondern die Entwicklung des Geschwindigkeitsniveaus in Abhängigkeit der Verkehrsstärke über den gesamten Wertebereich betrachtet wird. Dieser Zusammenhang wird als *q-v-Funktion* bezeichnet. Die q-v-Funktion spielt eine wichtige Rolle im Bemessungsverfahren des HBS, bei dem in Abhängigkeit einer vorgegebenen mittleren Geschwindigkeit die maximale Verkehrsstärke ermittelt wird, bei der der Verkehrsfluss ein gegebenes Qualitätsmaß nicht unterschreitet (*Level-of-Service-Methode*).

Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit müssen Wege zur Beschreibung der wegen der Zufälligkeiten des Verkehrsflusses streuenden Punktwolke gefunden werden. Dazu werden die in Kapitel 3.1.2 bereits erwähnten Verkehrsflussmodelle verwendet.

### 6.2 Auswahl eines geeigneten Verkehrsflussmodells

Aufgrund der Einfachheit der Anwendung und der Zuverlässigkeit der Aussagen (Kapitel 3.1.2) werden im Rahmen dieser Forschungsarbeit das lineare und das quadratische Verkehrsflussmodell für den stabilen Verkehrsablauf und der nicht-lineare Zeitlückenansatz für den instabilen Verkehrsablauf angewandt. Die Trennung des stabilen vom instabilen Bereich erfolgt gemäß der im HBS (1998) angegebenen Grenze bei der Geschwindigkeit  $v=85$  km/h, die die Verkehrsqualitätsstufen A-D (stabiler Bereich) von den Bereichen E und F (instabiler Bereich) abtrennt. An dieser Grenze schlägt der Verkehrsfluss vom stabilen in den instabilen Bereich um. Analog zu den Kapazitätsbetrachtungen im vorigen Kapitel werden auch in diesem Kapitel nur Querschnitte untersucht, die mittels der Methode von Kapitel 5.1 als verkehrlich überlastet eingestuft wurden.

Die Durchführung der statistischen Analysen erfolgt mit der Software SPSS in der Version 10.

### Lineares Verkehrsflussmodell (stabiler Bereich)

Lineare q-v-Funktionen stellen das einfachste Modell zur Beschreibung des Verkehrsflusses dar. Da mit diesem Modell der empirische Verlauf der Punktwolke auf einfache Weise beschrieben werden kann, wird sie häufig verwendet. Ein funktionaler Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Verkehrsstärke spiegelt sich darin allerdings nicht wieder. Unterteilt man die lineare q-v-Funktion in mehrere Abschnitte, so erhöht dies die Genauigkeit der Beschreibung der Punktwolke. Abschnittsweise lineare q-v-Funktionen verwendet z.B. das HBS, basierend auf Untersuchungen von HEIDEMANN und HOTOP (1990).

Der Nachteil der abschnittswisen q-v-Funktionen besteht darin, dass Annahmen für die Unterteilung der Abschnitte getroffen werden müssen und die einzelnen q-v-Funktionen im jeweiligen Abschnitt auf einer geringeren Datenbasis beruhen, als bei einem einteiligen Modell. Bei einer Analyse des vorliegenden Datensatzes wurde festgestellt, dass insbesondere die q-v-Funktion des Abschnitts im Bereich der höchsten Verkehrsstärken auf wenig Werten basiert. Die vorliegenden Zeitreihen sind nicht umfassend genug, um mit genügender statistischer Absicherung in mehrere Punktwolken aufgeteilt zu werden. Ein einteiliges lineares Modell ist hier besser geeignet und wird deshalb verwendet.

Die q-v-Funktionen werden mittels Regressionsrechnung ermittelt:

lineares q-v-Modell: 
$$v_{lin}(q) = v_{frei} - c_1 * q$$

mit	$v_{lin}$ =	mittlere Geschwindigkeit der Pkw	[km/h]
	$q$ =	Verkehrsstärke im Zeitintervall	[Kfz/min] oder [Kfz/h]
	$v_{frei}$ =	Konstante der Regressionsrechnung	[km/h]
	$c_1$ =	Koeffizient der Regressionsrechnung	[-]

Ein Nachteil des linearen Modells besteht darin, dass es nicht sinnvoll das gesamte q-v-Diagramm beschreiben kann. Es gilt nur für den Bereich des stabilen Verkehrsflusses, bei dem die Geschwindigkeit des Verkehrs mit zunehmender Verkehrsstärke stetig abnimmt. Aus diesem Grund wird es nur für Messwerte oberhalb  $v=85$  km/h angewandt.

Bei der linearen Regression können die Vertrauensbereiche für die Konstante und den Koeffizient über den Standardfehler der Schätzung angegeben werden. Die Güte der Anpassung der Regressionsgerade an die Messwerte wird mit dem Bestimmtheitsmaß B bezeichnet.

### Quadratisches Verkehrsflussmodell (stabiler Bereich)

Die Idee, die Punktwolke im q-v-Diagramm mit einer quadratischen Funktion anzunähern, stammt schon von GREENSHIELDS (1935). Basierend auf Messungen des Verkehrsflusses postulierte er, dass der Verkehrsteilnehmer seine Geschwindigkeitswahl linear von der Verkehrsdichte abhängig macht. Aus diesem linearen k-v-Modell resultiert mittels Umformung das quadratische q-v-Modell. Geht man von diesem Verhalten der Verkehrsteilnehmer aus, so beschreiben das lineare k-v-Modell und das quadratische q-v-Modell kausale Zusammenhänge.

lineares k-v-Modell: 
$$v_{lin}(k) = v_{frei} - c_2 * k$$

mit	v =	mittl. Geschwindigkeit der Pkw	[km/h]
	k =	Verkehrsdichte (Gesamtfahrbahn)	[Kfz/km]
	v <sub>frei</sub> =	Konstante der Regressionsrechnung	[km/h]
	c <sub>2</sub> =	Koeffizient der Regressionsrechnung	[-]

Mittels der Beziehung  $q = v_{mom} * k$  kann dieses Modell in die q-v-Funktion überführt werden und ergibt dort eine Parabel zweiter Ordnung:

quadratisches q-v-Modell: 
$$v_{quadr}(q) = v_{frei} + a_1 q + a_2 q^2$$

$a_1, a_2, v_{frei}$  = Parameter des Modells

Das Modell kann als geschlossenes Einbereichs-Modell die gesamte Punktwolke des q-v-Diagramms beschreiben und sogar mit dem Scheitelpunkt der Parabel einen Wert für die Kapazität angeben. Frühere Untersuchungen zeigen jedoch, dass der instabile Bereich mit dem quadratischen Modell schlecht angepasst wird und außerdem der ermittelte Wert für die Kapazität die empirisch gemessenen Verkehrsstärken deutlich übersteigt und als unrealistisch angesehen werden muss (LEMKE 2000). Dies wurde bei der Anwendung an den vorliegenden Daten bestätigt. Im folgenden wird daher das quadratische Modell ebenfalls nur für den stabilen Bereich verwendet.

### Nicht-lineares Zeitlückenmodell (instabiler Bereich)

Neben der oben beschriebenen quadratischen Funktion sind zur Beschreibung des instabilen Bereichs die Potenzfunktion, die Exponentialfunktion oder der Zeitlücken-Ansatz denkbar. Nur dem Zeitlücken-Ansatz liegt ein kausaler Zusammenhang zu Grunde. Er basiert auf der Annahme, dass die Verkehrsteilnehmer im instabilen Bereich im relativen Bremsabstand mit einem annähernd konstanten zeitlichen Abstand von 1,8 – 2 s fahren (WU 2000, KERNER 2000). Daraus resultiert ein linearer Zusammenhang zwischen Brutto-Weglücke und Geschwindigkeit bzw. ein hyperbolischer Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und Geschwindigkeit:

Brutto-Weglücke in Abh. der Geschwindigkeit:  $L = l_0 + v * t_r$

Fundamentalbeziehung:

$$q = v_{mom} * k \quad k = \frac{1}{L}$$

Daraus folgend der Zeitlückenansatz:

$$v_{Zeitl}(q) = \frac{l_0 * q}{1 - t_r * q}$$

mit  $l_0$  = durchschn. Fahrzeuglänge bzw. mittlere [m]  
Wegstrecke, die ein Kfz. im Stau belegt

$L$  = Brutto-Weglücke [m]

$t_r$  = durchschn. Reaktionszeit [s]

$v_{Zeitl}$  = mittl. Geschwindigkeit der Pkw [km/h] bzw. [m/s]

$q$  = Verkehrsstärke aller Fahrzeuge [Kfz/min] bzw. [Kfz/h]

Setzt man als durchschnittliche belegte Weglänge im Stau  $l_0=6,5$  m an, so ergibt sich sich als Modellformel für den nicht-linearen Zeitlückenansatz (umgerechnet auf die vorliegenden Messeinheiten):

$$v[km/h] = \frac{0,39 * q[Kfz/min]}{1 - b * q}$$

Der Parameter  $b$  kann mittels nicht-linearer Regressionsanalyse ermittelt werden, wobei ausgehend von einer typischen Zeitlücke von 1,8s der Startwert  $b = 0,03$  Kfz/min/Fst angenommen wird.

### 6.3 Anwendung der Modelle in verschiedenen Zeitintervallen

Im folgenden wird an einem verkehrlich stark überlasteten dreistreifigen Ohne-SBA-Querschnitt (MQ 316, Richtungsfahrbahn der A9 nach Nürnberg) die Anwendung der Verkehrsflussmodelle in unterschiedlichen zeitlichen Bezugsintervallen untersucht. Dazu werden das lineare und das quadratische Verkehrsflussmodell des stabilen Bereichs sowie das nicht-lineare Zeitlückenmodell des instabilen Bereichs im 1-min, 5-min, 15-min und 60-min-Intervall angewandt.

Die Ergebnisse der Modelle sind in Abb. 6-1 exemplarisch für die Zeitintervalle 5 und 60 Minuten, zur Veranschaulichung in Zusammenhang mit dem  $q$ - $v$ -Diagramm, dargestellt. Die Ergebnisse für alle Zeitintervalle sind in Abb. 6-2 grafisch dargestellt und in Tabelle 6-1 als Zahlenwerte angegeben.

#### Betrachtung des stabilen Bereichs

Man erkennt bei Betrachtung der Kurven in Abb. 6-1 und des Bestimmtheitsmaßes in Tabelle 6-1, dass im Bereich des stabilen Verkehrs die quadratische Funktion die Punktwolke besser annähert als die lineare Funktion. Besonders bei der Betrachtung des 60-min-Intervalls zeigt sich eine sehr gute Annäherung durch die quadratische Regression ( $B=0,614$ ). Im Unterschied zu der linearen Funktion, bei der die

Geschwindigkeit mit zunehmender Verkehrsstärke stetig abfällt, zeigt sich bei der quadratischen Funktion bei niedrigen Verkehrsstärken zuerst ein leichtes Ansteigen der Geschwindigkeit, bevor die Kurve dann stärker abfällt und im Fall der 60-min-Intervalle bei emp.  $q_{\max}$  das gleiche Geschwindigkeitsniveau besitzt wie die lineare Funktion. Dieses leichte Ansteigen entsteht vermutlich, weil die sehr niedrigen Verkehrsstärken ausschließlich in den Nachtzeiträumen von 3 – 5 Uhr vorkommen, und in diesem Zeitraum die Verkehrsteilnehmer etwas langsamer fahren. Die quadratische Funktion kann im Vergleich zur linearen Funktion den Zusammenhang etwas genauer beschreiben.

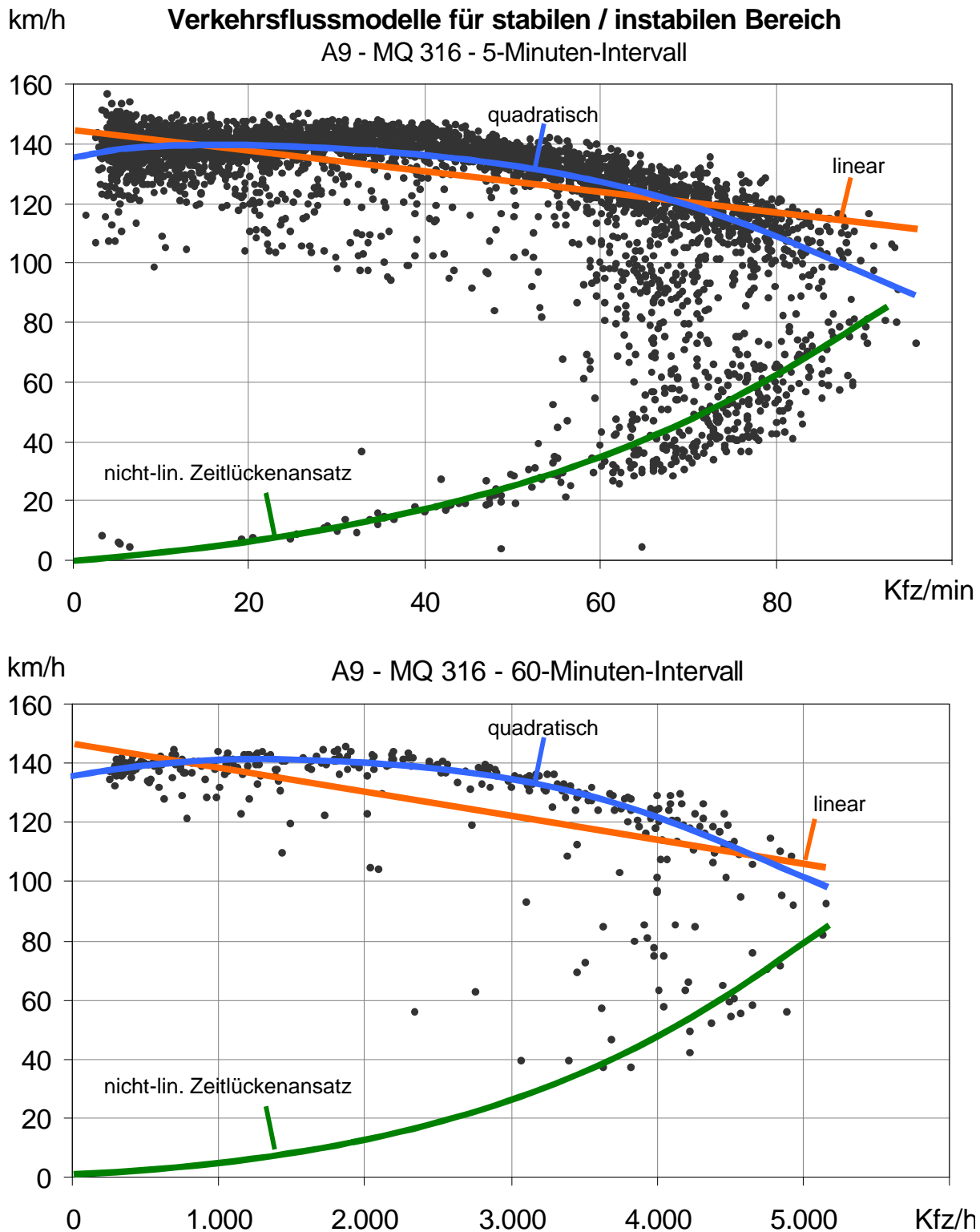
In Abb. 6-2 und Tabelle 6-1 ist zu erkennen, wie die linearen Funktionen beinahe identisch für die vier zeitlichen Bezugsintervalle sind, während sich bei den quadratischen Funktionen merkbare Unterschiede ergeben. Diese Unterschiede entstehen deshalb, weil bei höherer zeitlicher Aggregation vermehrt Messpunkte entstehen, die einen Mischwert aus zeitweise stabilem und zeitweise instabilem Verkehr darstellen. Die Zunahme dieser Mischwerte „zieht“ die Kurven mit höherem Aggregationsniveau im Bereich hoher Verkehrsstärken (in denen stabile und instabile Bereiche vorkommen) nach unten. Die quadratische Regression zeigt diesen Sachverhalt detaillierter auf.

Insgesamt sind die Bestimmtheitsmaße bei den kürzeren zeitlichen Bezugsintervallen kleiner als bei den längeren. Dies ist auf die größeren Schwankungen des Verkehrsflusses im kurzen Zeitintervall zurückzuführen.

### **Betrachtung des instabilen Bereichs**

Im instabilen Bereich stellt sich der geschilderte Sachverhalt genau entgegengesetzt dar. Im kurzen zeitlichen Bezugsintervall kann das nicht-lineare Zeitlückenmodell die Punktwolke besser anpassen als bei den höher aggregierten Intervallen. Der Grund dürfte darin liegen, dass das Modell die gemischten Verkehrszustände bei den längeren Zeitintervallen weniger gut erklären kann.

Die Funktionen des nicht-linearen Zeitlückenansatzes sind im Unterschied zu den Funktionen im stabilen Bereich nicht durch emp.  $q_{\max}$  begrenzt, sondern durch Erreichen des Gültigkeitsbereichs bei  $v=85$  km/h. Vergleicht man die Maximalwerte des stabilen und des instabilen Bereichs in Abb. 6-2, so erkennt man, dass die maximalen Verkehrsstärken im instabilen Bereich niedriger als im stabilen Bereich liegen. Hier zeigt sich das häufig beschriebene *capacity-drop-Phänomen*, also die Tatsache, dass die Kapazität im instabilen Verkehr geringer als im stabilen Verkehr ist.



**Abb. 6-1:** Lineares und quadratisches Verkehrsflussmodell des stabilen Bereichs und nicht-lineares Zeitlückenmodells des instabilen Bereichs für die verschiedenen zeitlichen Bezugsintervalle (MQ 316, A9 Richtung Nürnberg, Zeitraum 27.07.-09.08.2000)

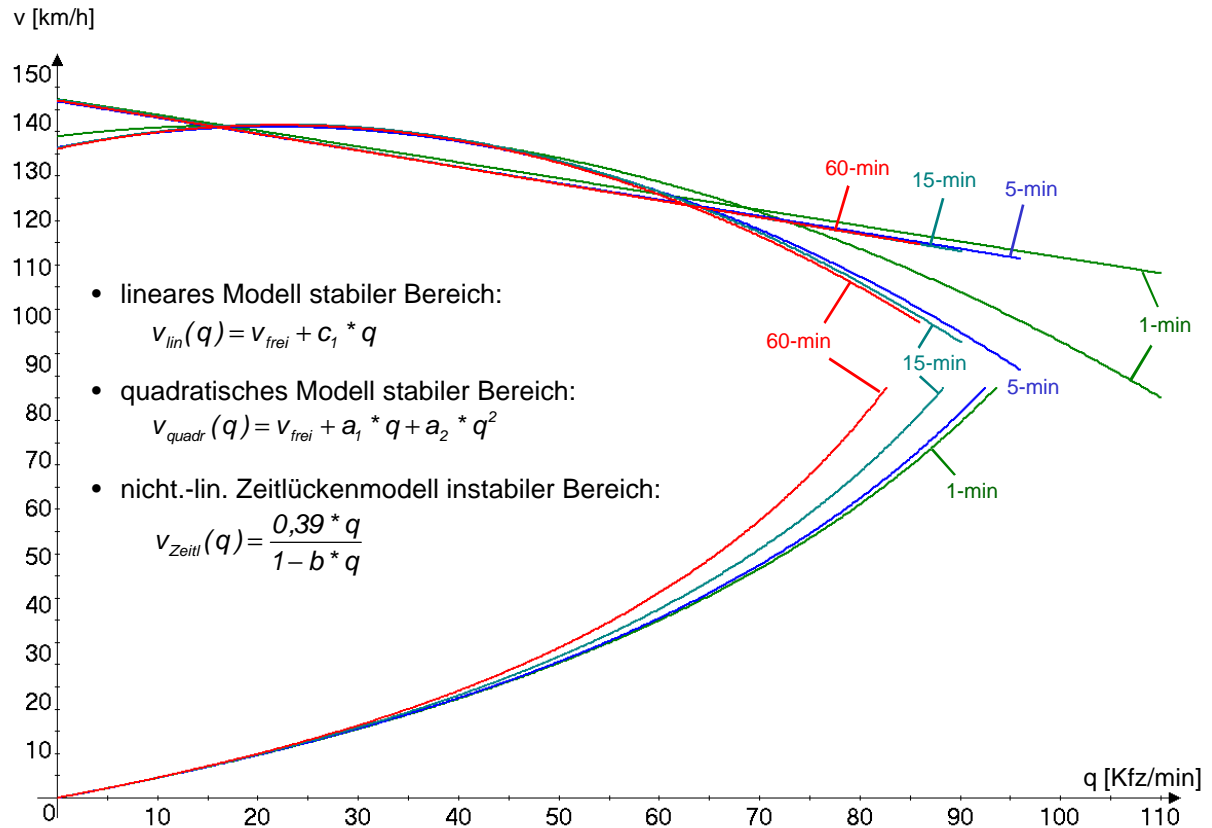
**Oben:** Zeitintervall 5 Minuten

**Unten:** Zeitintervall 60 Minuten



### Vergleich Verkehrsflussmodelle im 1-, 5-, 15- und 60-min-Intervall

MQ 316 der A9



**Abb. 6-2:** Grafischer Vergleich der Ergebnisse der Verkehrsflussmodelle in verschiedenen zeitlichen Bezugsintervallen (A9, MQ 316)

Intervall [min]	Max. [Kfz/min]	Lineares Modell					Quadratisches Modell				Zeitlückenmodell	
		$v_{frei}$	Std.*)	$c_1$	Std.*)	B**)	$v_{frei}$	$a_1$	$a_2$	B**)	b	B**)
1	110	144,7	0,164	-0,33	0,004	0,348	137,0	0,245	-0,0067	0,420	0,0061	0,457
5	96	144,2	0,304	-0,34	0,070	0,407	134,7	0,349	-0,0091	0,523	0,0062	0,397
15	90	144,6	0,498	-0,35	0,011	0,448	134,6	0,436	-0,0098	0,579	0,0068	0,159
60	86	144,4	0,952	-0,35	0,022	0,476	134,4	0,442	-0,0100	0,614	0,0075	-0,97

\*) Std.=Standardfehler der Schätzung      \*\*) B = Bestimmtheitsmaß

**Tabelle 6-1:** Tabellarischer Vergleich der Ergebnisse der Verkehrsflussmodelle in verschiedenen zeitlichen Bezugsintervallen (A9, MQ 316)

#### 6.4 Untersuchung dreistreifiger Querschnitte der A9 und der A8 Ost

Nachdem die Anwendung der Modelle und der Einfluss des zeitlichen Bezugsintervalls exemplarisch an einem Querschnitt untersucht wurde, werden nun mehrere Querschnitte verglichen. Im folgenden wird nur das üblicherweise verwendete Stundenintervall betrachtet, mit dem ein Vergleich mit Werten früherer Untersuchungen möglich ist. Weiterhin gilt der Schwerpunkt der Anwendung des linearen q-v-Modells im stabilen Bereich, da diese Funktion mit den Ergebnissen der umfangreichen Untersuchung von PONZLET (1996) verglichen werden kann.

Insgesamt wurden zehn Querschnitte der A9 und fünf Querschnitte der A8 Ost untersucht. Die Querschnitte der A9 wurden in allen drei Verkehrsflussmodellen analysiert, die der A8 Ost nur im linearen Modell. Die Ergebnisse der linearen q-v-Funktion sind in Tabelle 6-2 angegeben. In Abb. 6-3 sind die Funktionen aller drei Verkehrsflussmodelle (aus Gründen der Übersichtlichkeit nur von acht ausgewählten Querschnitten) der A9 grafisch veranschaulicht, davon fünf mit SBA und drei ohne SBA. In Abb. 6-4 sind die fünf Mit-SBA-Querschnitte der A8 Ost dargestellt.

Bei der Betrachtung der linearen q-v-Funktionen (oberes Diagramm von Abb. 6-3) zeigen sich Unterschiede zwischen den Querschnitten sowohl in der Regressionskonstanten (d.h. der Geschwindigkeit  $v_{\text{frei}}$ ) als auch im Regressionskoeffizienten, also der Abnahme der Geschwindigkeit mit zunehmender Verkehrsstärke. Aus den etwas höheren Geschwindigkeiten von  $v_{\text{frei}}$  wird ersichtlich, dass die Richtungsfahrbahn nach Nürnberg generell ein geringfügig höheres Geschwindigkeitsniveau besitzt als die Richtungsfahrbahn nach München. Die Gründe dafür können in einer günstigeren Wegbedingung (d.h. Trassierung), in Unterschieden bei der Verkehrsbedingung (z.B. Fahrerkollektiv) oder in beidem liegen. Das Vorhandensein einer SBA auf der Richtungsfahrbahn nach München kann nicht der Grund sein, da diese bei niedrigen Verkehrsstärken so gut wie nie in Betrieb ist.

Bei den quadratischen q-v-Funktionen zeigt sich der gleiche Sachverhalt (unteres Diagramm von Abb. 6-3). Es ist wieder ein etwas höheres Geschwindigkeitsniveau der Richtungsfahrbahn nach Nürnberg im Bereich niedriger Verkehrsstärken zu erkennen ( $v_{\text{frei}}$ ).

Bei der Betrachtung des Zeitlückenmodells für den instabilen Verkehr ist das „capacity-drop“-Phänomen deutlich erkennbar. Deutliche und einheitliche Unterschiede zwischen beeinflussten und unbeeinflussten oder zwischen den Richtungsfahrbahnen sind nicht zu erkennen.

### Ergebnisse für mehrere Querschnitte der A9

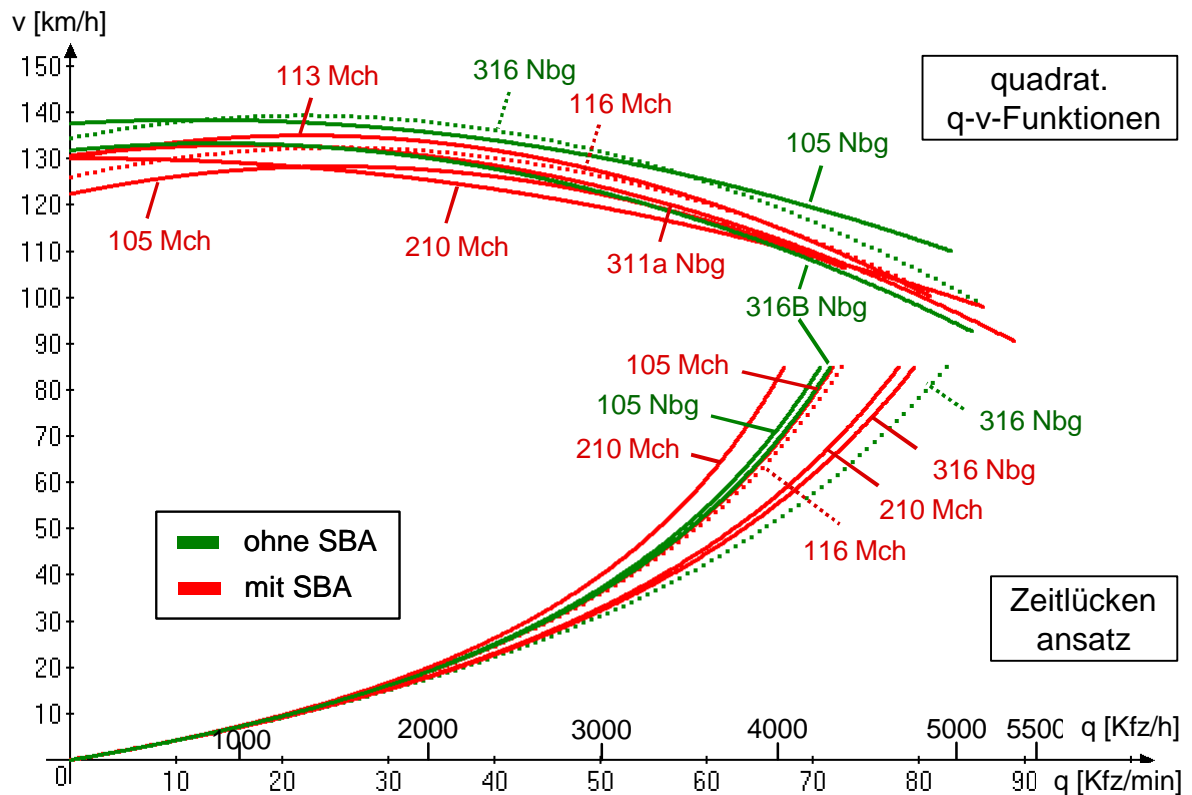
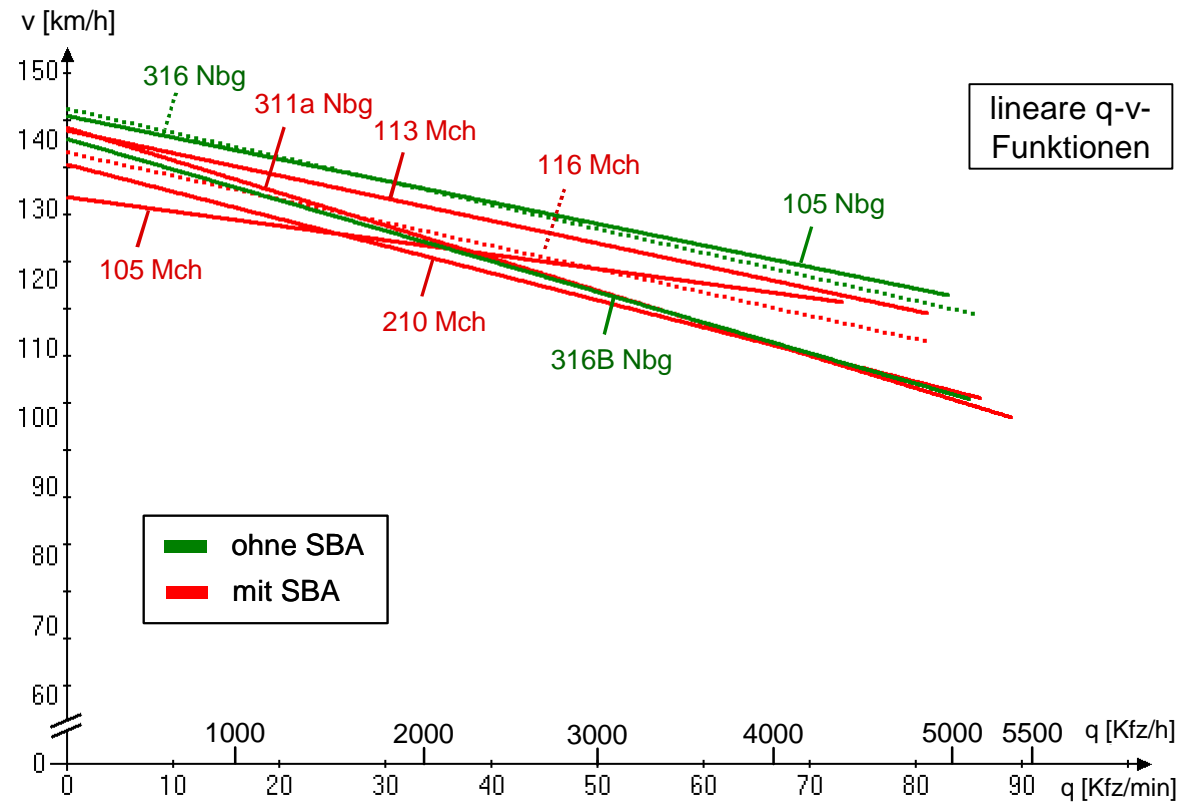
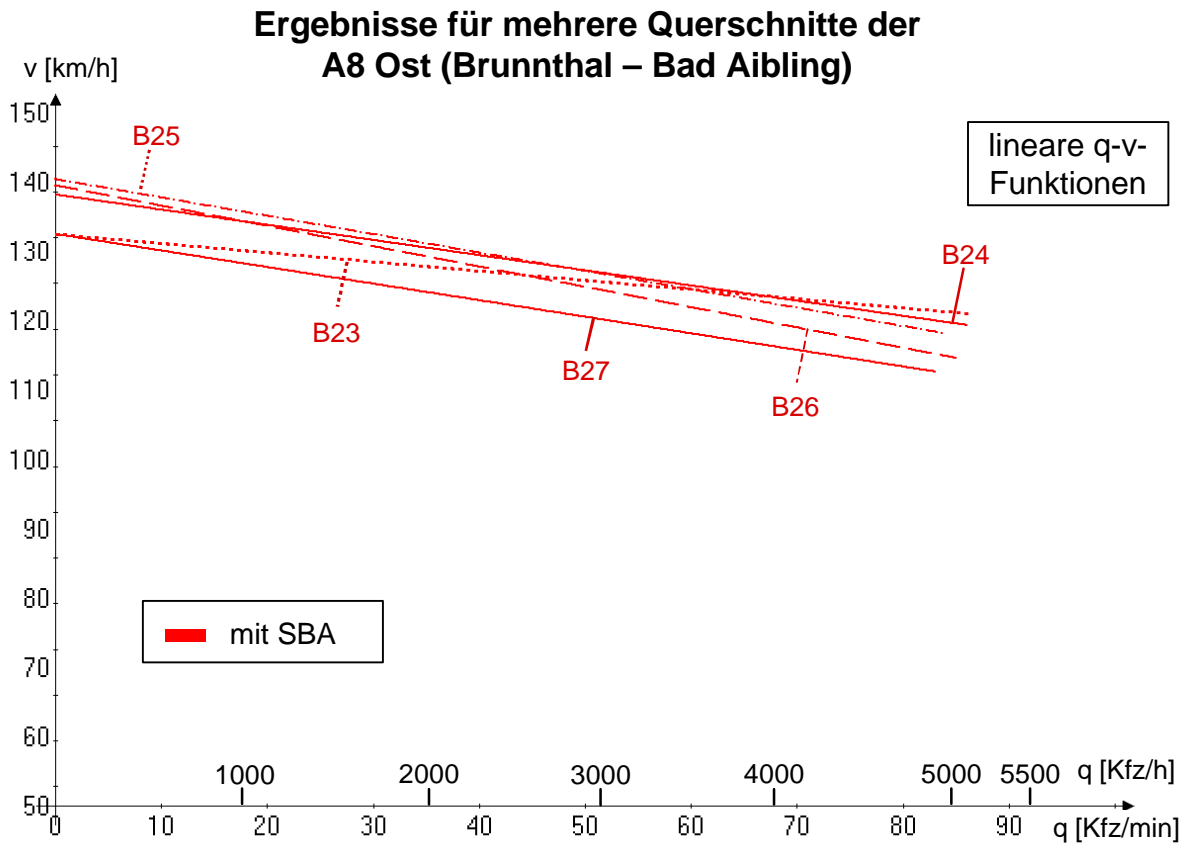


Abb. 6-3: q-v-Funktionen für acht Querschnitte der A9 München – Nürnberg im 60-min-Intervall

oberes Diagramm: lineare q-v-Funktion

unteres Diagramm: quadratische q-v-Funktion bzw. Zeitlückenansatz



**Abb. 6-4:** q-v-Funktionen für fünf Querschnitte der A8 Ost (Brunnthal-Bad Aibling) im 60-min-Intervall (lineare q-v-Funktion)

lineare q-v-Funktion für den stabilen Bereich					
	MQ	mit / ohne SBA	$v_{\text{frei}}$ [km/h]	$C_1$ [km/h/Kfz/min]	$q_{\text{max}}$ [Kfz/h]
A9 Richtung München	105_Mch	mit	131,7	-0,21	4.380
	113 Mch	mit	141,3	-0,33	4.860
	115 Mch	mit	140,4	-0,30	4.860
	116 Mch	mit	138,1	-0,34	4.860
	210 Mch	mit	136,4	-0,39	5.160
A9 Richtung Nürnberg	311aNbg	mit	141,7	-0,47	5.340
	311C Nbg	ohne	148,9	-0,39	5.040
	316 Nbg	ohne	144,4	-0,35	5.160
	316B Nbg	ohne	140,1	-0,44	5.100
	105 Nbg	ohne	143,4	-0,31	4.980
A8 Ost Richtung Stgt	B23	mit	132,5	-0,13	5.160
	B24	mit	138,2	-0,22	5.160
	B25	mit	140,4	-0,27	5.040
	B26	mit	139,5	-0,29	5.100
	B27	mit	132,5	-0,24	4.980

**Tabelle 6-2:** Konstante und Koeffizient der linearen q-v-Funktion für alle untersuchten Querschnitte der A9 und der A8 Ost (Brunnthal – Bad Aibling)

Bei der Strecke A8 Ost Brunenthal–Bad Aibling sind die q-v-Funktionen für die fünf aufeinander folgende Querschnitte B23 bis B27 dargestellt. Diese fünf Querschnitte befinden sich in einem im Hinblick auf Weg-, Umfeld- und Verkehrsbedingungen sehr vergleichbarem 10 km langen Abschnitt zwischen AS Holzkirchen und AS Hofoldinginger Forst. Trotzdem sind Unterschiede bei dem Geschwindigkeitsniveau von  $v_{\text{frei}}$  und bei der Neigung der Regressionsgeraden zu erkennen.

Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass auch bei sehr gut vergleichbaren Querschnitten Differenzen im Geschwindigkeitsniveau von mehreren km/h verbleiben, die über die erfassten Trassierungsparameter einer Strecke nicht erklärt werden können. Da sich Verkehrs- und Umfeldbedingungen gleich darstellen (gleicher Verkehrsstrom, keine Zu- und Abfahrt, gleicher Zeitraum), müssen kleine Unterschiede in der Wegbedingung die Ursache für die Unterschiede sein.

### Zusammenfassung der q-v-Funktionen und Vergleich der Gruppen

Der Vergleich der Querschnitte erfolgt analog zu dem Vorgehen bei der Untersuchung der Kapazität in Kapitel 5.2.1. Dort wurden nach dem Kriterium der Verkehrsbelastung innerhalb des Untersuchungszeitraums drei vergleichbare Gruppen erstellt. Für diese drei Gruppen werden die Mittelwerte für die Regressionskonstante  $v_{\text{frei}}$  und die –koeffizienten  $c_1$  berechnet:

Betriebszustand	Strecke	Querschnitte	Mittelwerte von	
			$v_{\text{frei}}$ [km/h]	$c_1$ [km/h/Kfz/min]
ohne SBA	A9 Ri. Nbg	311C, 316, 316B Nbg	144,5	-0,39
mit SBA	A9 Ri. Mch	113, 115, 116 und 201 Mch	139,1	-0,34
mit SBA	A8 Ri. Stgt.	B23 bis B27 Richtung Stgt.	136,6	-0,23

**Tabelle 6-3: Vergleich der Mittelwerte für Regressionskonstante  $v_{\text{frei}}$  und Regressionskoeffizient  $c_1$  für die drei Gruppen**

Wie oben bereits beschrieben, ist das Geschwindigkeitsniveau im freien Verkehr auf der Richtungsfahrbahn der A9 nach Nürnberg höher als auf der Richtungsfahrbahn der A9 nach München und deutlich höher als auf der Richtungsfahrbahn der A8 Ost nach Stuttgart. Die Gründe müssen in kleinen Unterschieden bei den Weg- bzw. Verkehrsbedingungen liegen. Es fällt auf, dass der Regressionskoeffizient sich für beide Richtungsfahrbahnen der A9 fast gleich darstellt, bei der Richtungsfahrbahn der A8 aber wesentlich kleiner ist. Bei dieser Gruppe sinkt mit zunehmender Verkehrsstärke das Geschwindigkeitsniveau langsamer ab.

Eine Interpretation der Ergebnisse im Hinblick auf die Wirkungen der SBA fällt schwer, da sich offensichtlich streckencharakteristische Unterschiede größer darstellen als mögliche Effekte der SBA. Dies ist daran zu erkennen, dass sich die beiden Mit-SBA-Gruppen deutlich unterscheiden und die beiden Gruppen der A9 sehr

ähnlich darstellen. Dies ist ein Indiz dafür, dass sich die Unterschiede der ermittelten q-v-Funktionen aus den Unterschieden der Strecke ergeben. Nicht messbare Unterschiede bei der Weg- oder Verkehrsbedingung müssen die Ursache darstellen. Ein möglicher Effekt der SBA kann aus den anderen Einflüssen nicht herausgefiltert werden. Sicher kann nur interpretiert werden, dass SBA zumindest keinen größeren Einfluss auf die q-v-Funktion (und damit auf die Leistungsfähigkeit) einer Strecke ausüben, dies wäre sonst erkennbar gewesen.

### **Vergleich der q-v-Funktionen mit bisherigen Untersuchungen**

Für einen Vergleich der q-v-Funktionen mit früheren Untersuchungen eignet sich die Forschungsarbeit von PONZLET (1996) am besten. In der Arbeit wurden mehrere dreistreifige Querschnitte mit unterschiedlichen Betriebsbedingungen auf ihre Leistungsfähigkeit hin untersucht. Ein Vergleich mit den eigenen Untersuchungen ist möglich, da lineare q-v-Funktionen verwendet wurden. Die q-v-Funktionen des HBS werden nicht für einen Vergleich herangezogen, da diese Funktionen Mittelwerte aus mehreren Untersuchungen darstellen und teilweise speziell für Bemessungszwecke festgelegt wurden.

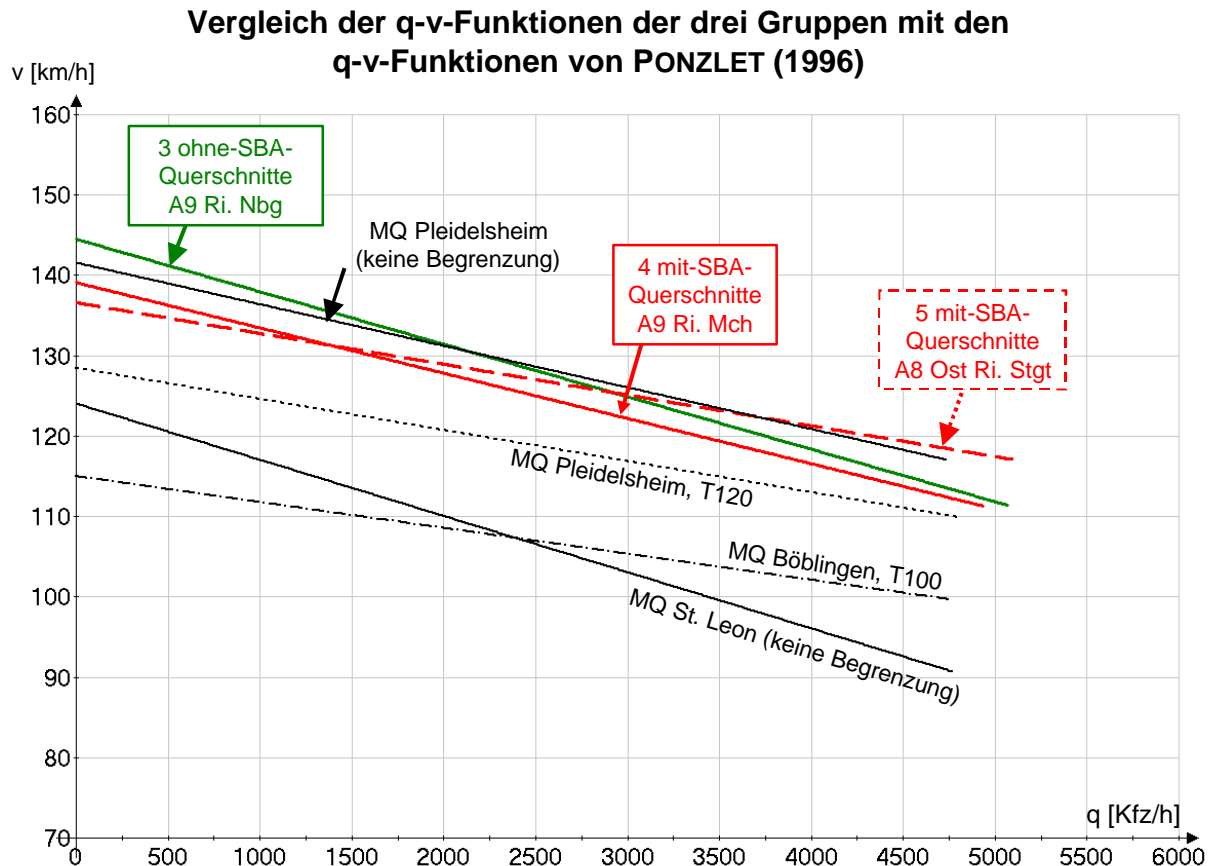
PONZLET (1996) konnte Daten von acht dreistreifigen Messquerschnitten gewinnen. Zwei Messquerschnitte kommen wegen großer Längsneigungen für einen Vergleich mit den eigenen Messungen nicht in Frage. Von den verbleibenden Querschnitten werden für einen Vergleich herangezogen:

- ein Messquerschnitt ohne Geschwindigkeitsbegrenzung (MQ St. Leon Richtung Heidelberg)
- ein Messquerschnitt, dessen Betriebszustand sich im Untersuchungszeitraum von „frei“ auf T120 geändert hat (MQ Pleidelsheim Ri. Stuttgart)
- ein Messquerschnitt mit T100 (MQ Böblingen)

In Abb. 6-5 und Tabelle 6-4 sind die vier ausgewählten q-v-Funktionen von PONZLET (1996) und die q-v-Funktionen der drei Querschnitts-Gruppen der eigenen Untersuchung vergleichend dargestellt.

Bei Betrachtung des Vergleichs fällt als erstes das erstaunlich niedrige Geschwindigkeitsniveau des MQ St. Leon, ein Messquerschnitt ohne Geschwindigkeitsbegrenzung, auf. PONZLET (1996) gibt als Erklärung dafür an, dass ein stromabwärts liegendes Autobahnkreuz die Verkehrsteilnehmer zu einer Verringerung ihrer Geschwindigkeit veranlasst. Dies ist ein Beispiel dafür, wie stark sich nicht objektiv messbare Einflüsse bei der Wegbedingung auf den Verkehrsfluss auswirken können und wie kritisch Vergleiche der Leistungsfähigkeit verschiedener Querschnitte gesehen werden müssen.

Anhand der Betrachtung des MQ Pleidelsheim kann analysiert werden, wie sich der Einfluss einer starren Geschwindigkeitsbegrenzung (T120) auswirkt. Die Geschwindigkeitsbegrenzung bewirkt bei geringen Verkehrsstärken ein deutliches Abfallen des Geschwindigkeitsniveaus um 13 km/h. Bei hohen Verkehrsstärken fällt dieser Abfall mit 8 km/h geringer aus.



**Abb. 6-5: Grafischer Vergleich der q-v-Funktionen der drei Gruppen mit q-v-Funktionen von PONZLET (1996)**

	Betriebszustand	Strecke	Querschnitt(e)	$V_{\text{frei}}$ [km/h]	$C_1$
Eigene Unters.	ohne SBA	A9 Ri. Nbg	311C, 316, 316B Nbg	144,5	-0,0065
	mit SBA	A9 Ri. Mch	113, 115, 116 und 201 Mch	139,1	-0,0056
	mit SBA	A8 Ri. Stgt.	B23 bis B27 Richtung Stgt.	136,6	-0,0038
PONZLET (1996)	frei	A5	St. Leon Ri. Heidelberg	124,0	-0,0069
	frei	A81	Pleidelsheim Ri. Stuttgart	141,5	-0,0052
	120	A81	Pleidelsheim Ri. Stuttgart	128,5	-0,0039
	100	A81	Böblingen Ri. BB/Singen	115,0	-0,0032

**Tabelle 6-4: Tabellarischer Vergleich der q-v-Funktionen der drei Gruppen mit q-v-Funktionen von PONZLET (1996)**

Der MQ Böblingen mit T100 zeigt von allen Messquerschnitten das niedrigste Geschwindigkeitsniveau im freien Verkehr, und außerdem eine sehr geringe Neigung der q-v-Funktion, also eine nur geringe Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Verkehrsstärke. Dieser fast horizontale Verlauf der q-v-Funktion ist typisch für Querschnitte mit einer restriktiven Geschwindigkeitsbeschränkung.

Die drei Geraden der Querschnittsgruppen der eigenen Untersuchung zeigen alle ein sehr hohes Geschwindigkeitsniveau bei geringen Verkehrsstärken. Dies ist ein Indiz für günstige Weg- und Verkehrsbedingungen an den Querschnitten aller drei Gruppen.

Ein Vergleich der beiden Mit-SBA-Gruppen mit den beiden Querschnitten mit starrem Tempolimit zeigt, dass das bei statischen Geschwindigkeitsbegrenzungen auftretende Absinken des Geschwindigkeitsniveaus im Bereich des freien Verkehrs vermieden wird. Dies liegt daran, dass SBA bei geringen Verkehrsstärken nur selten Geschwindigkeitsbegrenzungen bei Vorliegen gefährlicher Verkehrs- oder Umfeldbedingungen schalten. Im Bereich der geringen bis mittleren Verkehrsstärken entstehen also Reisezeitersparnisse der Verkehrsteilnehmer, wenn anstelle einer statischen Geschwindigkeitsbegrenzung eine SBA installiert wird.

Im Bereich der hohen Verkehrsstärken zeigen beide Mit-SBA-Gruppen ein vergleichsweise geringes Absinken des Geschwindigkeitsniveaus, das im Bereich der höchsten Verkehrsstärken außerdem deutlich über den q-v-Funktionen der Querschnitte mit T120 und T100 liegt. Das Geschwindigkeitsniveau der Mit-SBA-Querschnittsgruppe der A8 Ost liegt bei hoher Verkehrsbelastung am höchsten. Daraus kann sicher interpretiert werden, dass die bei hohen Verkehrsstärken zeitlich häufig geschalteten Geschwindigkeitsbegrenzungen auf keinen Fall ein Absinken des mittleren Geschwindigkeitsniveaus bewirken. Dies liegt daran, dass die Geschwindigkeitsbegrenzungen nur dann geschaltet werden, wenn das Geschwindigkeitsniveau des Verkehrsfluss ohnehin niedrig ist. Weiterhin werden die restriktiven Begrenzungen T80 und T60 nur in seltenen Fällen der Gefahren- oder Stauwarnung eingeschaltet. Auf jeden Fall erzeugen die Geschwindigkeitsbegrenzungen des Harmonisierungs- bzw. des Stauwarnungsprogramms keine Reisezeitverluste.

Ob ein Effekt besteht, dass die Schaltung von Geschwindigkeitsbegrenzungen zu einem gleichmäßigeren Verkehrsfluss auf einem höheren Geschwindigkeitsniveau führt (wie aus früheren Untersuchungen vermutet) kann nicht mit Sicherheit gesagt werden. Die Unterschiede im Geschwindigkeitsniveau zwischen Querschnitten an verschiedenen Strecken und sogar zwischen einzelnen Querschnitten derselben Strecke sind selbst dann noch erheblich, wenn alle messbaren Weg-, Umfeld- und Verkehrsbedingungen sich als vergleichbar darstellen. Diese Unterschiede überdecken einen möglichen Effekt der SBA und sind im Rahmen dieser Datenbasis nicht weiter ausfilterbar.



Da die vorliegende Datenbasis keine ausreichend genauen Vergleich zulässt, kann eine mögliche Steigerung der Leistungsfähigkeit durch SBA nicht quantifiziert werden. Weiterhin ergeben sich aus der vorliegenden Datenbasis keine Hinweise, dass eine derartige Leitungsfähigkeitssteigerung auftritt.

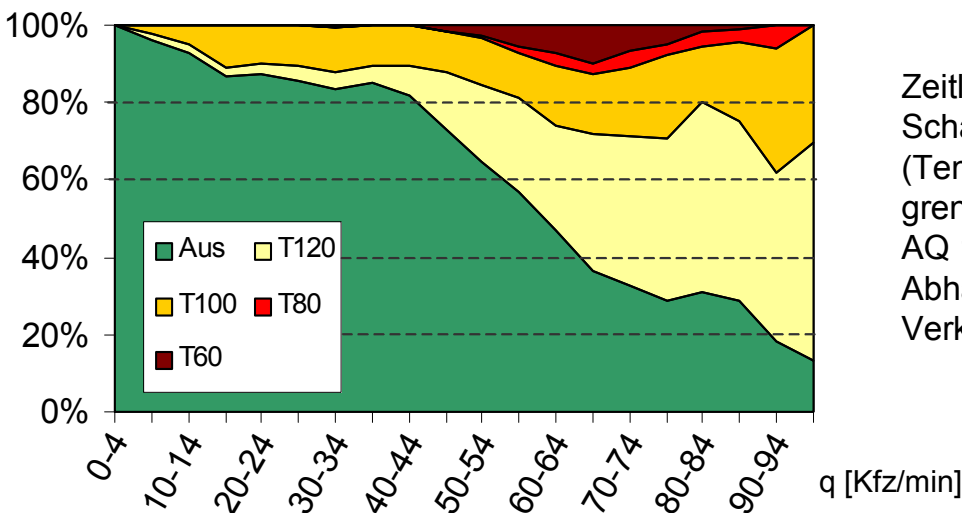
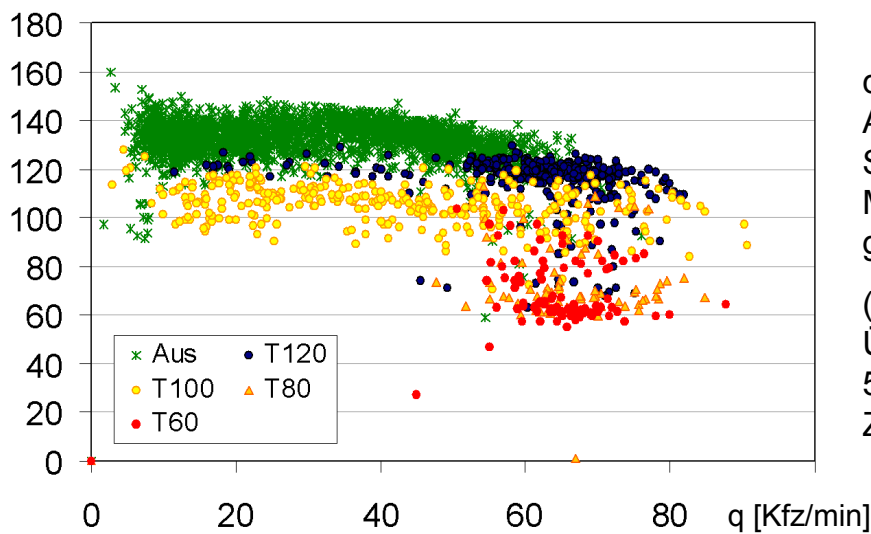
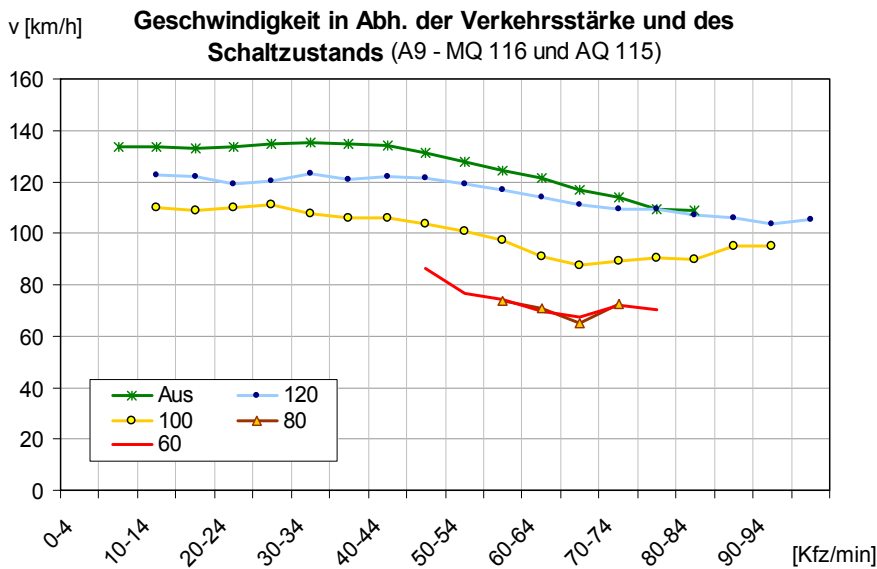
Eine sichere Aussage zu dieser Fragestellung wird nur anhand von Messdaten möglich sein, die in Form eines Vorher-Nachher-Vergleichs oder noch besser eines idealen Mit-Ohne-Vergleichs vorliegen. Nur damit wird es möglich sein, die streckencharakteristischen Einflüsse, die sich bei Betrachtung der Geschwindigkeit noch stärker bemerkbar machen als bei Betrachtung der maximalen Verkehrsstärke, auszufiltern.

### **6.5 Geschwindigkeitsniveau in Abhängigkeit des Schaltzustands**

Der Zusammenhang zwischen Schaltzustand und Verkehrszustand wird exemplarisch analysiert anhand der Verknüpfung der Daten eines Messquerschnitts mit einem Anzeigequerschnitt. Aufgrund der hohen Verkehrsbelastungen und der günstigen Lage im Bereich der freien Strecke wird dazu die Verknüpfung des dreistreifigen MQ 116 mit AQ 115 der A9 betrachtet. Es wird nur auf die Anzeigen des Typ-A-WVZ, also auf die Wirkung der Geschwindigkeitsbegrenzung, eingegangen.

In Abb. 6-6 ist diese Verknüpfung in verschiedenen Arten dargestellt. Im oberen Diagramm ist das Geschwindigkeitsniveau des Verkehrsflusses in Abhängigkeit des Schaltzustands dargestellt. Das mittlere Diagramm veranschaulicht die Werte in Form eines q-v-Diagramms, und das untere Diagramm stellt die relative Einschaltzeiten der SBA in Abhängigkeit der Verkehrsstärke dar.

Bei Betrachtung von Abb. 6-6 fällt auf, dass einzelne Messwerte bei hohen Verkehrsstärken auftreten, bei denen keine Geschwindigkeitsbegrenzung geschaltet wurde. Der Grund dafür liegt darin, dass bei einem Verkehrsfluss mit mittlerer Verkehrsstärke durch zufällige Schwankungen ein einzelnes Minutenintervall mit sehr hoher Verkehrsstärke auftreten kann. Die SBA reagiert wegen ihrer Trägheit nicht sofort. Diese Trägheit ist in den Steueralgorithmen vorgegeben, damit die Anzeigen nicht zu häufig wechseln. Bei einer detaillierten Betrachtung der Ganglinien zeigen sich außerdem immer wieder unplausibel große Verzögerungen bei der Erkennung von hohen Verkehrsstärken oder Geschwindigkeitseinbrüchen. Ein weiterer Grund für hohe Verkehrsstärken ohne Geschwindigkeitsbegrenzung sind also die (zumindest gelegentlich auftretenden) Fehlschaltungen von SBA.



**Abb. 0-1: Verknüpfung von Verkehrsfluss (MQ 116 der A9) mit den Anzeigen der SBA (AQ 115)**

- oben: Geschwindigkeitsniveau in Abhängigkeit des Schaltzustands
- mitte: q-v-Diagramm mit Darstellung der Schaltzustände
- unten: Zeitliche Anteile der Schaltzustände

Das untere Diagramm von Abb. 6-6 zeigt, dass die zeitlichen Anteile, in denen die SBA eine Geschwindigkeitsbegrenzung schaltet, erst oberhalb von Verkehrsstärken von 40–50 Kfz/min eine Rolle spielen. Mit zunehmender Verkehrsstärke wird vor allem die Tempobegrenzung T120 als Harmonisierungsprogramm geschaltet. Die Tempobegrenzung T100 wird überwiegend wegen kritischer Umfeldbedingungen (Nässe) geschaltet und tritt über den gesamten Bereich der Verkehrsstärken auf. Dass die restriktiven Begrenzungen T80 und T60 bei hohen, aber nicht bei den maximalen, Verkehrsstärken auftreten, verwundert zunächst. Dies ist damit zu erklären, dass sich der Verkehr bei den maximalen Verkehrsstärken im Zustand des stabilen Verkehrsfluss befindet. Dort ist das Geschwindigkeitsniveau relativ hoch mit 90–110 km/h, entsprechend schaltet die SBA T100 oder T120. Im instabilen Verkehr sind die Verkehrsstärken im Mittel niedriger als im stabilen Verkehr. Dort wird entsprechend den niedrigeren Geschwindigkeiten T80 und T60 geschaltet.

Eine Interpretation der Erkenntnisse, die sich aus der Verknüpfung von Mess- und Anzeigedaten ergeben, muss wegen der Wechselwirkung Schaltzustand - Verkehrszustand mit großer Vorsicht gemacht werden („unechter Mit-Ohne-Vergleich“, Seite 68). Bei Betrachtung der Daten kann nicht gesagt werden, ob sich der Verkehrszustand als Folge des Schaltzustands einstellt, oder ob der Schaltzustand als Folge des Verkehrszustands entsteht. In der Praxis ist eine Wechselwirkung aus beiden Effekten vorhanden.

Ein Vergleich der „Aus“-Kurve mit der „T120“-Kurve im oberen Diagramm von Abb. 6-6 lässt vermuten, dass das Geschwindigkeitsniveau beim Schaltzustand T120 langsamer absinkt als bei ausgeschalteter SBA. Eine gedachte Fortsetzung der „Aus“-Kurve deutet darauf hin, dass die „T120“-Kurve bei sehr hohen Verkehrsstärken oberhalb der „Aus“-Kurve liegt. Wenn hier tatsächlich eine Wirkung des Schaltzustands vorläge, würden die Reisezeitersparnisse in diesem Bereich eine große Nutzenkomponente darstellen, da in diesem Bereich der hohen Verkehrsstärke eine sehr große Anzahl von Verkehrsteilnehmern von einer Erhöhung des Geschwindigkeitsniveaus profitieren würde. Die Größe dieses Nutzens aus der vorliegenden Datenbasis zu interpretieren ist allerdings reine Spekulation, da der hier durchgeführte „unechte“ Mit-Ohne-Vergleich einer großen Verzerrung der Verkehrsbedingung unterliegt.

Dieser evtl. Nutzen könnte mit einer verbesserten Datenbasis („echter“ Mit-Ohne-Vergleich) bestimmt werden. An dieser Stelle kann nur auf den weiteren Forschungsbedarf und vor allem auf das zur Verfügung stellen der notwendigen Datengrundlage durch die Auftraggeber bzw. Betreiber von SBA hingewiesen werden.

## 7 HOMOGENITÄT DES VERKEHRSFLOSSES

### 7.1 Grundlagen

#### Ziel der Untersuchung

Die räumliche und zeitliche Gleichmäßigkeit eines Verkehrsflusses wird mit den Begriffen *harmonischer* oder *homogener* Verkehrsfluss bezeichnet. Eine allgemein übliche Definition und Abgrenzung der beiden Begriffe gibt es jedoch nicht.

Ein harmonischer Verkehrsfluss bedeutet für die Verkehrsteilnehmer ein angenehmeres Fahren. Dieser Nutzen wird jedoch zumindest subjektiv empfunden und ist nicht leicht direkt quantifizierbar. Die Homogenität eines Verkehrsflusses wird daher in den gängigen Bewertungsverfahren nicht berücksichtigt. Trotzdem spielt die Homogenität eines Verkehrsflusses eine große Rolle, da sie Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und die Kapazität einer Strecke hat. Die Harmonisierung eines Verkehrsflusses kann zu einer Senkung der Unfallzahlen sowie zu einer Stabilisierung des Verkehrsflusses führen und somit einen Nutzen darstellen.

Bei der vorliegenden Forschungsarbeit stellt die Untersuchung der Harmonisierungswirkungen von SBA nicht das primäre Forschungsziel dar. Sie ist dennoch wichtig, um ein besseres Verständnis der Wirkungsweise von SBA zu erhalten und um den subjektiven Nutzen zu ermitteln. Im folgenden wird daher der Einfluss von SBA auf die Homogenität des Verkehrsflusses untersucht. Der Schwerpunkt liegt in der Betrachtung der Verteilung des Verkehrs auf die einzelnen Fahrstreifen.

#### Erfahrungen aus früheren Untersuchungen

Grundlegend kann zwischen *räumlichen* und *zeitlichen* Untersuchungen unterschieden werden. Die räumlichen Untersuchungen betrachten Differenzen einer verkehrlichen Kenngröße (z.B. Geschwindigkeit, Verkehrsstärke oder Verkehrsdichte) zwischen verschiedenen Orten. Die zeitlichen Untersuchungen betrachten die Schwankungen der Kenngrößen im Verlauf der Zeit. Als Kombination können auch *räumlich-zeitliche* Untersuchungen durchgeführt werden.

Weiterhin wird zwischen *mikroskopischen* Untersuchungen (Betrachtung von Individualfahrzeugen) und *makroskopischen* Untersuchungen (Betrachtung von Fahrzeugkollektiven) unterschieden. Die makroskopischen Untersuchungen verwenden oft anstelle des 1-min-Intervalls besonders kurze Zeitintervalle von 15 s oder 30 s. Beide Untersuchungsmethoden sind geeignet um die Harmonisierungswirkungen von SBA (bzw. von statischen Geschwindigkeitsbegrenzungen und Lkw-Überholverböten) zu untersuchen.

In Abhängigkeit von der vorhandenen Datengrundlage und des Untersuchungsziels stellen sich unterschiedliche Untersuchungsmethoden als geeignet dar. Folgende mikroskopische bzw. makroskopische Methoden wurden in aktuellen Untersuchungen angewandt:

#### Mikroskopische Betrachtungen

- Untersuchung der Nettozeitlücken und Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen aufeinander folgenden Fahrzeugen und Berechnung von gefährlich kurzen Zeitlücken mit dem *TTC-(Time-to-collision)*-Maß (STEINHOFF, THORMANN und GLAS 2000; STEINHOFF et. al. 2002; HOFFMANN-LEICHTER 1997)
- Erfassung der Fahrstreifenwechsel mittels Videoaufzeichnungen und damit Berechnung der Fahrstreifenwechsel-Häufigkeit (HOFFMANN-LEICHTER 1997; STÖCKER und TRUPAT 2001)

#### Makroskopische Betrachtungen

- Bildung von Summenhäufigkeits-Diagrammen der Geschwindigkeitsverteilung und Bestimmung von  $v_{85}$  und  $v_{15}$ ; Verwendung von 1-min- und 5-min-Intervallen (MANGOLD et. al. 1996; DREWS 1996)
- Betrachtung der zeitlichen Schwankungen der Geschwindigkeiten im 30s-Intervall und Berechnung des *Harmonisierungsmaßes* (STEINHOFF, THORMANN und GLAS 2000)
- Abgrenzung verschiedener Verkehrszustände im Fundamentaldiagramm mittels Betrachtung von Differenzen von Geschwindigkeit, Verkehrsstärke und -dichte der verschiedenen Fahrstreifen (KIM 2002)

Da im Rahmen dieser Untersuchung keine Videobeobachtungen oder Einzelfahrzeugdaten vorliegen, können mikroskopische Betrachtungen nicht durchgeführt werden. Ebenso scheiden makroskopische Betrachtungen in Zeiträumen kleiner als eine Minute aus.

Aus den Erfahrungen früherer Untersuchung ist das Problem bekannt, dass die zahlreichen zufälligen und systematischen Schwankungen des Verkehrsablaufs den Einfluss der untersuchten Größe (d.h. der SBA oder der statischen Anordnung) überlagern. Das Problem der nicht konstanten Randbedingungen bei einem Vergleich von Messungen des Verkehrsflusses zu verschiedenen Zeitpunkten oder an verschiedenen Orten hatte bei den Untersuchungen zur Homogenität eines Verkehrsflusses noch größere Auswirkungen als bei Untersuchungen zur Kapazität und zur Leistungsfähigkeit. Dies schränkte häufig die Aussagefähigkeit früherer Untersuchungen stark ein.

## 7.2 Untersuchungsmethode

Die Untersuchung der Harmonisierungswirkungen erfolgt unter Verwendung des zeitlichen Bezugsintervalls von einer Minute. Da in diesem Zeitintervall die Daten aufgezeichnet wurden, ist dies die höchstmögliche zeitliche Auflösung. Eine Aggregation der Daten in längere Zeiträume wie bei der Untersuchung der Kapazität und der Leistungsfähigkeit wird nicht vorgenommen.

Ein deutliche Harmonisierungswirkung von SBA wurde in mehreren früheren Untersuchungen bereits festgestellt (Kapitel 3.2.2). Innerhalb dieser Untersuchung wird speziell die räumliche Harmonisierung des Verkehrsflusses untersucht, da dies im Hinblick auf die Kapazität eine Rolle spielt. Insbesondere soll geklärt werden, ob SBA einen Einfluss auf die Verteilung des Verkehrs auf die Fahrstreifen ausüben. Eine gleichmäßigere Auslastung der Fahrstreifen könnte die Grundlage für einen stabileren Verkehrsfluss darstellen.

### Berücksichtigung des Einflusses der Verkehrsstärke

Alle Kenngrößen zur Charakterisierung eines Verkehrsflusses, wie Geschwindigkeitsniveau oder Verteilung des Verkehrs auf den Fahrstreifen, hängen in erster Linie von den Weg- und Umfeldbedingungen ab. Einen weiteren entscheidenden Einfluss übt die Verkehrsstärke aus, da mit zunehmender Verkehrsstärke die Wahlfreiheit der Verkehrsteilnehmer im Hinblick auf Geschwindigkeit und Fahrstreifenwahl abnimmt. Aus diesem Grund nimmt mit zunehmender Verkehrsstärke die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsflusses ab und die Fahrstreifen werden gleichmäßiger ausgelastet.

Ein Vergleich des Verkehrsflusses zu verschiedenen Zeitpunkten oder an verschiedenen Orten ist nur sinnvoll, wenn die Weg-, Umfeld- und Verkehrsbedingungen gleich (zumindest hinreichend ähnlich) sind und die gleiche Verkehrsstärke vorherrscht. Daher wird für die folgenden Untersuchungen der Verkehrsfluss in Klassen gleicher Verkehrsstärke eingeteilt und Vergleiche nur zwischen Klassen mit gleicher Verkehrsstärke durchgeführt. Innerhalb einer Klasse werden die Messdaten über den gesamten Zeitraum gemittelt und damit der Einfluss zufälliger Schwankungen reduziert.

Bei der Wahl der Klassengröße steht der Wunsch nach der Einteilung in möglichst kleine Bereiche für detaillierte Aussagen dem Wunsch nach genügend Messwerten pro Klasse zur statistischen Absicherung entgegen. Zur Bestimmung der optimalen Klassengröße kann die *Faustformel von Sturges* oder die Empfehlung nach DIN-Norm 55302 verwendet werden (HERZ et. al. 1992):

Faustformel von Sturges:

$$m = 1 + 3,32 \cdot \log n$$

m ... Anzahl der Klassen

n .... Anzahl der beobachteten Werte

DIN 55 302:

Anzahl der Beobachtungswerte	Anzahl der Klassen
$n \leq 100$	$m \geq 10$
$100 < n \leq 1\ 000$	$m \geq 13$
$1\ 000 < n \leq 10\ 000$	$m \geq 16$
$10\ 000 < n \leq 100\ 000$	$m \geq 20$

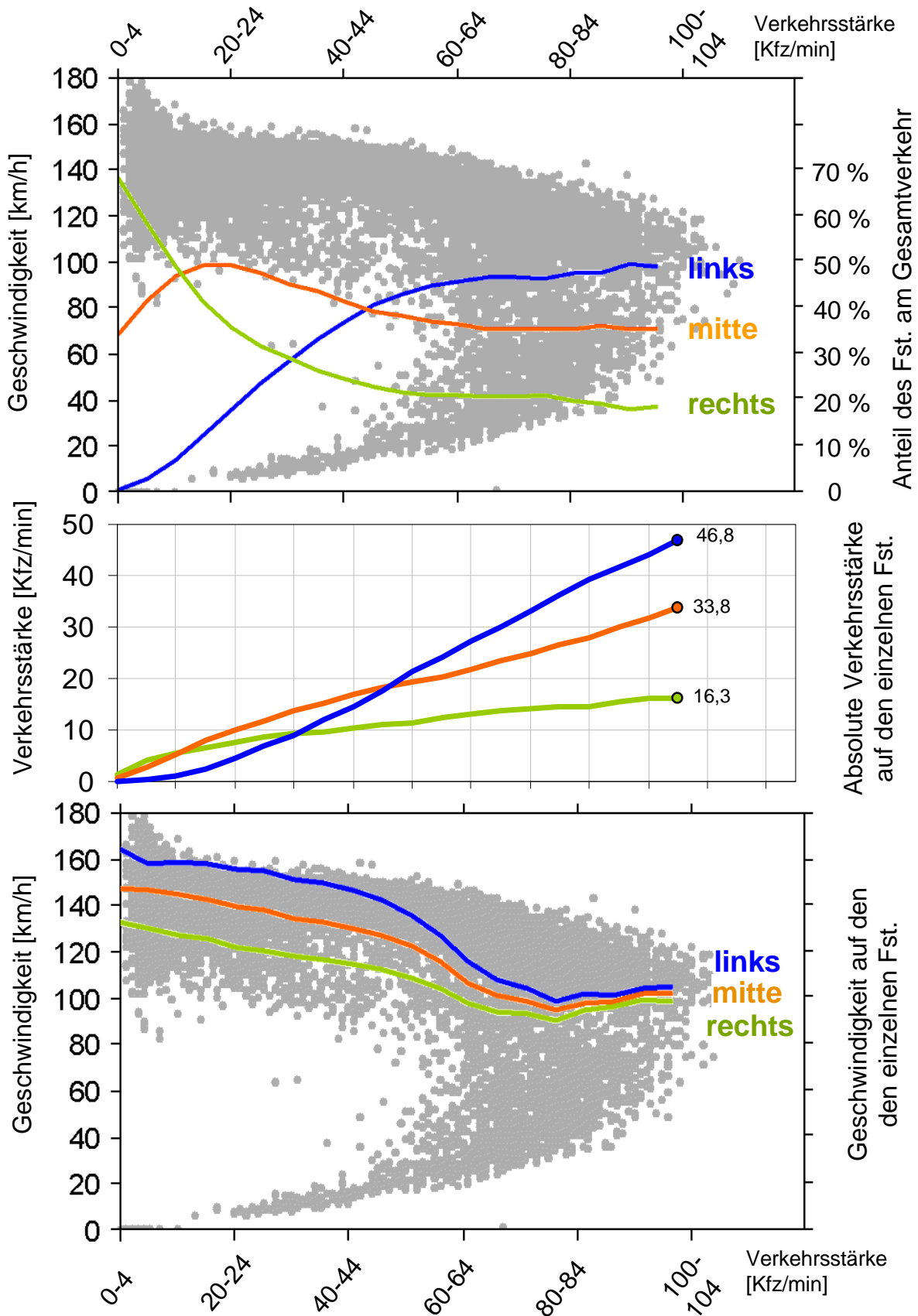
Bei den im Regelfall ca. 20 000 Messwerten pro Messquerschnitt ergibt sich nach der Faustformel von Sturges eine Klassenanzahl  $m \approx 15$  und nach der DIN-Norm eine Anzahl von  $m \geq 20$ . Da der Wertebereich der Verkehrsstärke gemessen in Minutenintervallen von  $q_{\min} = 0$  bis  $q_{\max} = 100 - 115$  Kfz/min (je nach Querschnitt) reicht, liegt es nahe, eine Klassenbreite von 5 Kfz/min, entsprechend ca. 20 Klassen, zu wählen. Die folgenden Auswertungen basieren auf der Bildung von Klassen dieser Breite. Innerhalb einer Klasse werden alle im 14-Tages-Zeitraum gemessenen Kenngrößen pro Querschnitt zusammengefasst und gemittelt.

**Beispielhafte Anwendung der Untersuchungsmethode**

Abb. 7-1 zeigt, wie die Methode der Einteilung des Verkehrs in Verkehrsstärkeklassen angewandt wird, um die Verteilung des Verkehrs auf die Fahrstreifen und das Geschwindigkeitsniveau der einzelnen Fahrstreifen zu analysieren. Dargestellt sind die Ergebnisse für den dreistreifigen Ohne-SBA-Querschnitt MQ 316 der A9.

Im oberen Diagramm von Abb. 7-1 ist der prozentuale Anteil der Fahrstreifen am Gesamtverkehr, im mittleren Diagramm die absolute Verkehrsstärke auf den Fahrstreifen und im unteren Diagramm das Geschwindigkeitsniveau auf den Fahrstreifen dargestellt. Zur Veranschaulichung und zur Interpretation ist im Hintergrund das q-v-Diagramm des Querschnitts dargestellt.

Die Betrachtung der prozentualen Verteilung des Verkehrs zeigt, dass im Bereich der schwachen Verkehrsstärken die Verkehrsteilnehmer fast nur den rechten und mittleren Fahrstreifen benutzen. Der linke Fahrstreifen wird bei schwachen Verkehrsstärken kaum befahren. Mit zunehmender Verkehrsstärke nimmt die Benutzung des rechten Fahrstreifens rasch ab und die des linken Fahrstreifens rasch zu, bis schließlich oberhalb einer Verkehrsstärke von ca. 50 Kfz/min der linke Fahrstreifen der am stärksten belastete Fahrstreifen ist. Die Betrachtung der höchsten Verkehrsstärkeklasse dieses Querschnitts (90-94 Kfz/min) zeigt, dass die einzelnen Fahrstreifen an der Kapazitätsgrenze nicht optimal (d.h. nicht gleichmäßig) ausgelastet sind.



**Abb. 7-1:** Fahrstreifenauslastung und Geschwindigkeitsniveau der einzelnen Fahrstreifen in Abh. der Verkehrsstärke (MQ 316 der A9, ohne SBA)  
 oben: proz. Anteil der einzelnen Fahrstreifen am Gesamtverkehr  
 mitte: absolute Verkehrsstärke auf den einzelnen Fahrstreifen  
 unten: Geschwindigkeitsniveau auf den einzelnen Fahrstreifen



Bei einem Vergleich verschiedener Fahrstreifen muss bedacht werden, dass die Lkw überwiegend auf dem rechten Fahrstreifen fahren. Wegen der größeren Länge dieser Fahrzeuge beanspruchen sie eine höhere Brutto-Zeitlücke. Dies verringert die maximale Verkehrsstärke auf dem rechten Fahrstreifen und verhindert, dass eine Gleichverteilung der Verkehrsstärke auf allen Fahrstreifen auftreten kann. Im Bereich der maximalen Verkehrsstärke spielen die Lkw jedoch in Bezug auf die gesamte Verkehrsstärke nur eine geringe Rolle. Aus diesem Grund und weil die vorliegenden dreistreifigen Querschnitte durchweg ähnliche Lkw-Anteile aufweisen, kann auf eine Umrechnung der Lkw in Pkw-Einheiten verzichtet werden.

Die ungleichmäßige Auslastung der einzelnen Fahrstreifen bei Verkehrsstärken nahe der Kapazitätsgrenze ist nur teilweise eine Folge der überwiegend auf dem rechten Fahrstreifen fahrenden Lkw. Den Hauptgrund stellt der Wunsch der Verkehrsteilnehmer dar, auf dem linken Fahrstreifen schneller voranzukommen („Linksfahrer-Effekt“). Dieser Sachverhalt ist aus früheren Untersuchungen bekannt (PONZLET 1996, SPARMANN 1978) und reduziert die Kapazität einer Strecke.

Das mittlere Diagramm von Abb. 7-1 belegt den „Linksfahrer-Effekt“ mittels Betrachtung der absoluten Verkehrsstärke auf den Fahrstreifen. Man erkennt, dass bei den schwachen Verkehrsstärken der linke Fahrstreifen eine Verkehrsstärke von nahezu null aufweist. Mit zunehmender Gesamtverkehrsstärke wächst die Verkehrsstärke auf dem linken Fahrstreifen schnell an und erreicht als Maximum den Wert von 46,8 Kfz/min. Zu diesem Wert sei angemerkt, dass diese Verkehrsstärke im Mittel einer durchschnittlichen Brutto-Zeitlücke von  $\approx 1,3$  s entspricht, also deutlich unter dem vorgegebenen zeitlichen Sicherheitsabstand von 1,8 s liegt (siehe Kapitel 8.1.2). Berücksichtigt man außerdem, dass der Wert von 1,3 s den Mittelwert der Zeitlückenverteilung darstellt, so wird deutlich, dass auf dem linken Fahrstreifen in großer Zahl in enorm kurzem Zeitabstand mit deutlicher Unterschreitung des Sicherheitsabstands gefahren wird.

Während auf dem linken Fahrstreifen eine sehr hohe Verkehrsstärke mit problematisch kurzen Sicherheitsabständen herrscht, sind der mittlere Fahrstreifen und insbesondere der rechte Fahrstreifen im Bereich der Kapazitätsgrenze wesentlich weniger befahren. Der linke Fahrstreifen nimmt fast so viel Verkehr auf, wie mittlerer und rechter Fahrstreifen zusammen. Es ist offensichtlich, dass auf dem mittleren und rechten Fahrstreifen Kapazitätsreserven vorhanden sind, die verschwendet werden. Oder umgekehrt betrachtet: Die Verkehrsteilnehmer könnten bei gleicher Gesamt-Verkehrsstärke mit größerer Verkehrssicherheit fahren, wenn sie sich gleichmäßiger auf die Fahrstreifen verteilen würden.

Das untere Diagramm von Abb. 7-1 zeigt die mittlere Geschwindigkeit der verschiedenen Fahrstreifen für die jeweiligen Verkehrsstärkeklassen. Hier fallen die Lkw weniger ins Gewicht, da wie bei allen anderen Untersuchungen nur die Pkw-

Geschwindigkeiten betrachtet werden. Man erkennt das bei schwachen Verkehrsstärken sehr hohe und für die verschiedenen Fahrstreifen sehr unterschiedliche, vom linken zum rechten Fahrstreifen abnehmende Geschwindigkeitsniveau. Bemerkenswert ist hier der Maximalwert von  $v \approx 165$  km/h für den linken Fahrstreifen bei geringen Verkehrsstärken (diese Werte treten nachts auf). Berücksichtigt man auch hier wieder, dass dies ein Mittelwert aus zahlreichen Messwerten ist, so ist anzunehmen, dass einige Verkehrsteilnehmer mit sehr hohen Geschwindigkeiten fahren (mit Unterschreitung der Haltesichtweiten). Mit zunehmender Verkehrsstärke nehmen die absolute Geschwindigkeiten und die Differenzen zwischen den Fahrstreifen ab. Im Bereich der maximalen Verkehrsstärken ist die Geschwindigkeit auf allen Fahrstreifen nahezu gleich um 80 km/h. Die Verkehrsteilnehmer auf dem linken Fahrstreifen können also keine Reisezeitersparnisse erzielen.

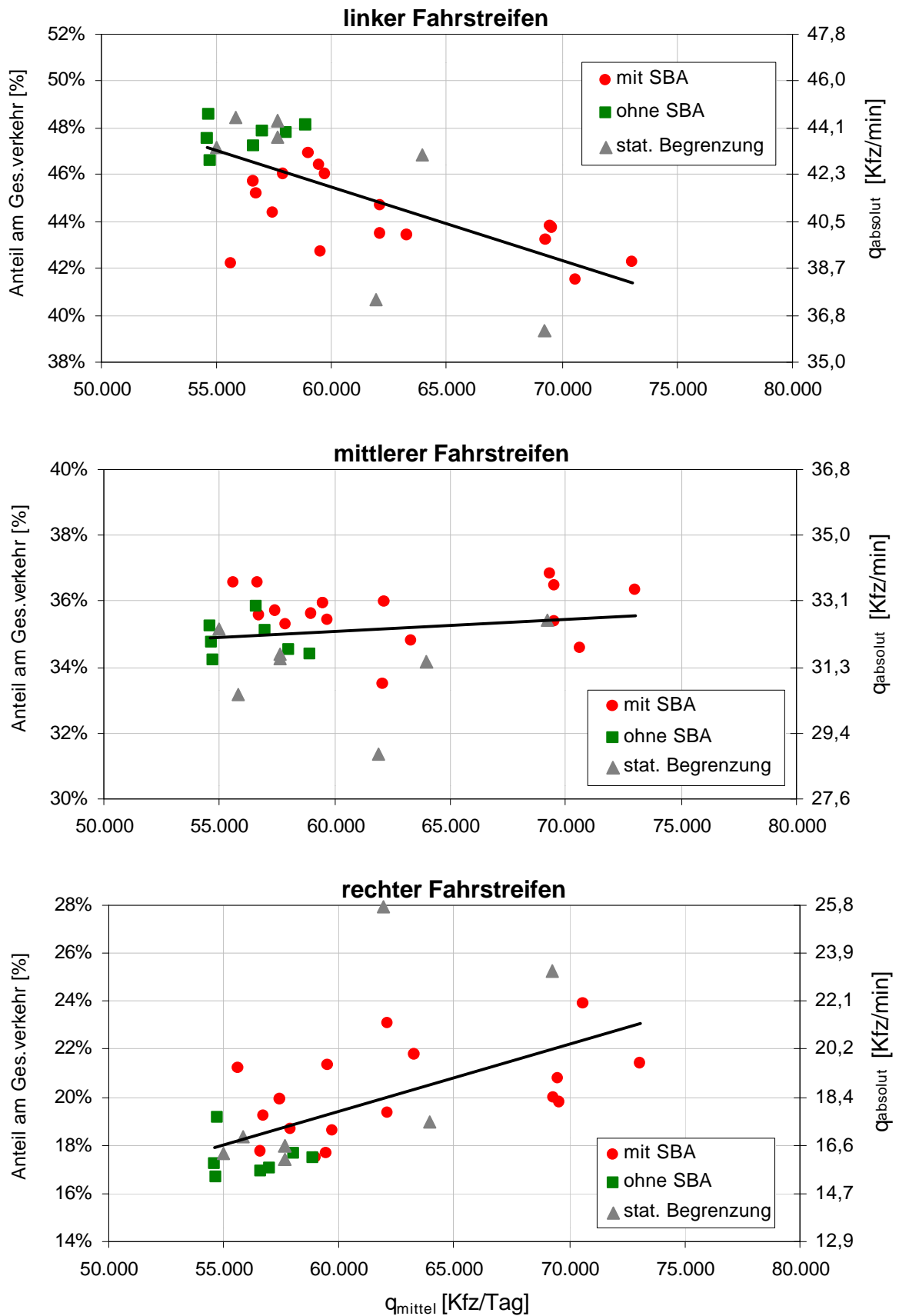
### 7.3 Verteilung des Verkehrs auf die Fahrstreifen

Mit der im vorigen Kapitel beschriebenen Methode der Einteilung der Messwerte in Verkehrsstärkeklassen wird die Aufteilung des Verkehrs auf die Fahrstreifen untersucht. Wie in Kapitel 5 gezeigt, ist mit der vorhandenen Datenbasis bei den zweistreifigen Strecken keine sinnvolle Vergleichsmöglichkeit von Streckenabschnitten mit SBA bzw. ohne SBA vorhanden. Daher werden im folgenden nur dreistreifige Streckenabschnitte betrachtet.

Bei dieser Untersuchung ist von Interesse, wie sich die Aufteilung des Verkehrs auf die Fahrstreifen bei sehr hohen Verkehrsstärken darstellt. Eine ungleichmäßigere Aufteilung hat im Vergleich zu einer gleichmäßigeren Aufteilung (bei gleicher Gesamtverkehrsstärke) den Nachteil, dass auf dem linken Fahrstreifen eine höhere Verkehrsstärke auftritt und demzufolge die Zeitlücken kürzer werden und der Verkehrsfluss störungsanfälliger wird.

Eine gleichmäßigere Auslastung der Fahrstreifen stellt daher eine Verbesserung des Verkehrsflusses dar. Aus früheren Untersuchungen (Kapitel 3.2.2) ist bekannt, dass SBA zu einem gleichmäßigeren Verkehrsfluss führen können. Dies wird darauf zurück geführt, dass die Geschwindigkeitsbegrenzungen und Hinweise wie Stauwarnung oder Gefahrenwarnung die Verkehrsteilnehmer zu einer angemesseneren Fahrweise anleiten und damit der „Linksfahrer-Effekt“ abgemindert wird. Weiterhin kann der Erlass eines Lkw-Überholverbots bewirken, dass auf dem mittleren Fahrstreifen die Anzahl der von Lkw verursachten Störungen abnimmt und dadurch mehr Pkw-Fahrer den mittleren Fahrstreifen benutzen.

Abb. 7-2 zeigt die prozentualen Anteile der Fahrstreifen am Gesamtverkehr in der Verkehrsstärkekategorie 90-94 Kfz/min für alle Messquerschnitte der A9 München – Nürnberg und der A8 Ost Brunnthäl – Bad Aibling. Die Ergebnisse der einzelnen Messquerschnitte sind in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung  $q_{\text{mittel}}$  aufgetragen.



**Abb. 7-2:** Verteilung des Verkehrs auf die Fahrstreifen innerhalb der Verkehrsstärkeklasse 90-94 Kfz/min in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung  $q_{\text{mittel}}$ . Darstellung aller Messwerte und der Regressionsgerade für alle drei-streifigen Querschnitte der A9 und der A8 Ost

Es ist zu sehen, dass ein deutlicher Einfluss der Verkehrsbelastung  $q_{\text{mittel}}$  auf die Verteilung des Verkehrs auf die Fahrstreifen vorliegt. Je höher sich die Verkehrsbelastung darstellt, desto gleichmäßiger ist die Aufteilung des Verkehrs auf die Fahrstreifen. Es tritt eine Verlagerung des Verkehrs vom linken zum rechten Fahrstreifen auf. Der Anteil des mittleren Fahrstreifens bleibt annähernd gleich. Dies dürfte daran liegen, dass ähnlich viele Verkehrsteilnehmer vom linken auf den mittleren Fahrstreifen wechseln wie vom mittleren auf den rechten Fahrstreifen.

In der gleichen Verkehrsstärkeklasse sind demzufolge Querschnitte mit höherer Verkehrsbelastung  $q_{\text{mittel}}$  gleichmäßiger ausgelastet. Dies korrespondiert mit den Ergebnissen aus Kapitel 5.2.1, wo festgestellt wurde, dass die maximale stündliche Verkehrsstärke der Querschnitte mit steigender Verkehrsbelastung zunimmt. Eine Erklärung dafür ist, dass die Verkehrsteilnehmer mit zunehmender Verkehrsbelastung, bzw. mit zunehmender Nähe zum Ballungsraum, bereit sind, ihr Verhalten anzupassen und verhaltener zu fahren. Die Verkehrsteilnehmer versuchen in geringerem Maße ihre Wunschgeschwindigkeit auf dem linken Fahrstreifen zu realisieren. Diese bessere Ausnutzung des Querschnitts bei steigender Verkehrsbelastung ist Folge auf eine Selbstorganisation des Verkehrs hin.

Betrachtet man Abb. 7-2, so erkennt man, dass die Querschnitte mit SBA im Mittel gleichmäßiger ausgelastet sind als die Querschnitte ohne SBA. Ein Vergleich der Mittelwerte der drei Gruppen von Querschnitten, die in Kapitel 5.2.1 aufgrund der vergleichbaren Verkehrsbelastung eingeteilt wurden, ergibt folgende Tabelle:

Betriebszustand	Strecke	Querschnitte	Prozentualer Anteil des Fahrstreifens			absolute Verkehrsstärke [Kfz/min]		
			Li.	Mi.	Re.	Li.	Mi.	Re.
Verkehrsstärkeklasse 80 – 84 Kfz/min			Li.	Mi.	Re.	Li.	Mi.	Re.
ohne SBA	A9	311C, 316, 316B Ri. Nbg	47,6%	34,4%	18,0%	39,0	28,2	14,8
mit SBA	A9	113,115,116,201 Ri. Mch	43,5%	36,7%	19,9%	35,7	30,1	16,3
mit SBA	A8	B23,24,25,26,27 Ri. Stgt	44,7%	35,7%	20,0%	36,7	29,3	16,4
Verkehrsstärkeklasse 90 – 94 Kfz/min			Li.	Mi.	Re.	Li.	Mi.	Re.
ohne SBA	A9	311C, 316, 316B Ri. Nbg	47,7%	34,9%	17,4%	43,9	32,1	16,0
mit SBA	A9	113,115,116,201 Ri. Mch	44,4%	36,1%	19,6%	40,8	33,2	18,0
mit SBA	A8	B23,24,25,26,27 Ri. Stgt	45,6%	35,6%	18,8%	42,0	32,8	17,3

**Tabelle 7-1: Vergleich von drei Gruppen von Querschnitten im Hinblick auf prozentualer Anteil und absolute Verkehrsstärke der einzelnen Fahrstreifen bei der Verkehrsstärkeklasse 80 – 84 Kfz/min und 90 – 94 Kfz/min**

Die Ohne-SBA-Gruppe weist in beiden Verkehrsstärkeklassen eine ungleichmäßigere Verteilung des Verkehrs auf die Fahrstreifen auf als die beiden Mit-SBA-Gruppen. Ein Vergleich der absoluten Verkehrsstärken der einzelnen Fahrstreifen

der Gruppen zeigt, dass diese bei der Ohne-SBA-Gruppe auf dem linken Fahrstreifen deutlich höher, auf dem mittleren Fahrstreifen etwas niedriger und auf dem rechten Fahrstreifen deutlich niedriger ist als bei den beiden Mit-SBA-Gruppen.

SBA bewirken also eine günstigere Auslastung der einzelnen Fahrstreifen und eine Verringerung der Spitzenverkehrsstärke des linken Fahrstreifens. Dies ist verbunden mit positiven Auswirkungen auf den Verkehrsfluss, da bei gleicher Verkehrsstärke im Gesamt-Querschnitt der linke Fahrstreifen einer geringere Verkehrsstärke aufweist und somit weniger störungsanfällig ist.

### Auswirkungen des Lkw-Überholverbots auf die Fahrstreifenauslastung

Bei der Untersuchung der Wirkungen des Schaltzustands „Lkw-Überholverbot“ ergibt sich (analog zu der Frage der Bestimmung der maximalen Verkehrsstärke in Abhängigkeit des Schaltzustands in Kapitel 5.4) die Schwierigkeit, dass der zu untersuchende Schaltzustand bei hohen Verkehrsstärken überwiegend geschaltet ist und somit keine unbeeinflussten Zeiträume vorliegen. Überwiegend bedeutet, dass das aus verkehrlichen Gründen geschaltete Lkw-Überholverbot eine geringere Priorität hat als die anderen Anzeigen des Typ-B-WVZ (wie z.B. Nässe-, Glatteis oder Stauwarnung). Somit existieren im Rahmen des vorhandenen Datensatzes auch einige Messwerte mit hohen Verkehrsstärken, bei denen kein Lkw-Überholverbot geschaltet wurde. Allerdings liegen dann besondere Verkehrs- oder Umfeldbedingungen vor, so dass diese Werte ebenso wenig als Vergleichsbasis verwendet werden können.

Der Vergleich des Verkehrsflusses mit Lkw-Überholverbot mit dem Verkehrsfluss ohne Lkw-Überholverbot muss daher ebenso als Vergleich verschiedener Querschnitte durchgeführt werden. Exemplarisch wird dies für zwei ausgewählte Messquerschnitte der A9 durchgeführt, die über den Messzeitraum hinweg einen sehr ähnlichen Lkw-Anteil (MQ 116: 14,6% und MQ 316: 14,7%) aufweisen (siehe Tabelle 7-2):

Betriebszustand	Strecke	Querschnitte	Lkw-Anteil auf dem Fahrstreifen			Lkw-Verkehrsstärke [Kfz/min]		
			Li.	Mi.	Re.	Li.	Mi.	Re.
Verkehrsstärkeklasse 80 – 84 Kfz/min			Li.	Mi.	Re.	Li.	Mi.	Re.
ohne SBA	A9	MQ 316 Nbg	0,6 %	5,9 %	50,8%	0,2	1,6	7,6
mit SBA	A9	MQ 116 Mch	0,5 %	3,3 %	59,0%	0,2	1,0	9,5
Verkehrsstärkeklasse 90 – 94 Kfz/min			Li.	Mi.	Re.	Li.	Mi.	Re.
ohne SBA	A9	MQ 316 Nbg	0,6 %	6,5 %	54,9%	0,3	2,0	8,6
mit SBA	A9	MQ 116 Mch	0,7 %	3,5 %	58,8%	0,3	1,1	10,7

**Tabelle 7-2: Exemplarische Betrachtung des Lkw-Anteils und der Lkw-Verkehrsstärken auf den Fahrstreifen an zwei Querschnitten**

In der Tabelle sind die relativen Lkw-Anteile und die absoluten Lkw-Verkehrsstärken je Fahrstreifen für die zwei Verkehrsstärkeklassen 80–84 und 90–94 Kfz/min angegeben. Auf dem linken Fahrstreifen ist der Lkw-Anteil in beiden Fällen beinahe null Prozent, auf dem rechten Fahrstreifen beträgt er über 50%. Der Mit-SBA-Querschnitt besitzt im Vergleich zum Ohne-SBA-Querschnitt einen geringeren Lkw-Anteil auf dem mittleren Fahrstreifen und einen höheren Anteil auf dem rechten Fahrstreifen. Bei der Betrachtung der absoluten Verkehrsstärken zeigt sich, dass bei dem Mit-SBA-Querschnitt die Lkw-Verkehrsstärke auf dem mittleren Fahrstreifen sinkt und auf dem rechten Fahrstreifen ansteigt. Es zeigt sich eine Verschiebung der Lkw vom mittleren auf den rechten Fahrstreifen.

Dieses Ergebnis wurde exemplarisch mittels eines Vergleichs zweier ausgewählter Querschnitte gewonnen. Ein sinnvoller Vergleich von mehreren Querschnitten ist wegen der zu großen Unterschiede im Lkw-Anteil nicht möglich.

Erfahrungen aus früheren Untersuchungen zeigen, dass die Auswirkungen von Lkw-Überholverböten nur schwer von den zahlreichen Schwankungen des Verkehrsflusses abzugrenzen sind (DREWS 1996, Kapitel 3.1.4). Abgesicherte und genauere Erkenntnisse könnten nur durch die Auswertung eines Datensatzes gewonnen werden, der einen Vorher-Nachher-Vergleich oder am Besten einen „idealen“ Mit-Ohne-Vergleich beinhaltet (Kapitel 4.3). Der Nutzen der Schaltung von Lkw-Überholverböten durch eine SBA kann daher mit dem vorliegenden Datensatz nicht separat bestimmt und monetarisiert werden.

## 8 STABILITÄT DES VERKEHRSFLUSSES

### 8.1 Grundlagen

#### 8.1.1 Zusammenhang zwischen Kapazität und Stabilität

Die Ursachen vieler Staus sind leicht erklärbar: eine Änderung bei den Weg- oder Umfeldbedingungen reduziert die Kapazität einer Strecke und die vorhandene Verkehrsbelastung wird nicht mehr bewältigt. Dies kann geschehen durch

- die Überlastung von Zu- bzw. Abfahrten verbunden mit Rückstaus
- das Auftreten eines kapazitätsreduzierenden Engpasses auf der freien Strecke (z.B. Sperrung eines Fahrstreifens aufgrund eines Unfalls oder einer Baustelle, verkehrsbehindernde Wettersituation)

Derartig entstandene Staus besitzen eine eindeutige, vom Prinzip her reproduzierbare Ursache und sind bei entsprechender Kenntnis der verkehrlichen und umfeldbedingten Situation vorhersagbar.

Neben diesen eindeutig erklärbaren Staus können bei hohen Verkehrsstärken Staus entstehen, ohne dass eine Kapazitätsreduktion an der Strecke auftritt. Diese Staus entstehen ohne externe Einflüsse intern aus dem Verkehrsfluss heraus, wenn zufällige Schwankungen von Verkehrsstärke oder Verkehrsdichte zu einem Umschlagen des Verkehrs vom stabilen in den instabilen Zustand führen. Das Fehlen einer eindeutigen Ursache führt zu der Bezeichnung „*Stau aus dem Nichts*“.

Eine Untersuchung zu Stauursachen und Staulängen über einen Zeitraum von drei Jahren an der A8 auf dem Abschnitt Karlsruhe-Ulm zeigt, dass zahlenmäßig Baustellen- und unfallbedingte Staus häufiger vorkommen als die durch eine hohe Verkehrsstärke begründeten Staus (SCHAECHTERLE et. al. 1988). Im Mittel waren die Staus aufgrund hoher Verkehrsstärke allerdings wesentlich länger und betrafen somit eine größere Anzahl von Verkehrsteilnehmern. Mit zunehmender Verkehrsbelastung des Straßennetzes kommt der Stauursache „hohe Verkehrsbelastung“ die größte Bedeutung im Hinblick auf die Reisezeitverluste bei den Verkehrsteilnehmern zu.

#### **Stauvermeidung mit betrieblichen Maßnahmen**

Aufgrund umweltpolitischer und wirtschaftlicher Begrenzungen beim Ausbau des Straßennetzes kommt betrieblichen Maßnahmen zur Reduktion der „Staus aus dem Nichts“ eine wachsende Bedeutung zu. Diese Maßnahmen müssen nicht unbedingt eine Erhöhung der Kapazität einer Straße im Sinne der maximalen Verkehrsstärke bewirken, um eine Verbesserung der Verkehrssituation zu erzielen. Ein großer Nutzen kann auch durch die Reduktion von Störungen im Verkehrsfluss entstehen,

wenn dadurch der Verkehrsfluss über einen längeren Zeitraum an der Kapazitätsgrenze aufrecht gehalten wird.

Ein Beispiel soll dies veranschaulichen: Die zweistreifige Gotthard-Tunnelstrecke ist im Urlauberverkehr häufig verkehrlich überlastet. Den dadurch auftretenden Staus kann baulich nur durch die sehr kostspielige Maßnahme des Baus einer zweiten Tunnelröhre begegnet werden. Aufgrund dieser Situation wurde das Verbesserungspotenzial betrieblicher Maßnahmen untersucht (BUNDESAMT FÜR STRAßEN 2001). Eine Messung des Verkehrsflusses über einen Zeitraum von mehreren Jahren ergab eine maximale Verkehrsstärke von 1375 Kfz/h / Fahrtrichtung. Die durchschnittliche maximale Verkehrsstärke an Tagen mit Verkehrsüberlastung betrug jedoch nur 850 Kfz/h pro Fahrtrichtung, d.h. die maximal mögliche Verkehrsstärke wurde nur selten erreicht. Die meisten Staus entstanden also durch ein Zusammenbrechen des Verkehrs vor Erreichen der Kapazitätsgrenze. Durch betriebliche Maßnahmen, wie eine günstigere Steuerung des Verkehrsflusses und einer Geschwindigkeitsbeschränkung in der Zufahrt, konnte ein stabilerer Verkehrsfluss erreicht und die durchschnittliche maximale Verkehrsstärke auf 950 Kfz/h gesteigert werden. Durch weitere Maßnahmen (auch bauliche Maßnahmen in der Zufahrt) wird angestrebt, langfristig eine durchschnittliche maximale Verkehrsstärke von bis zu 1100 Kfz/h zu erzielen. Dies würde die Anzahl der Staustunden erheblich reduzieren und den Bau einer zweiten Tunnelröhre erübrigen oder zumindest aufschieben.

Das Beispiel legt nahe, dass die Beschreibung der Kapazität eines Streckenabschnitts mit der maximalen Verkehrsstärke nicht ausreichend ist. Es stellt sich die Frage, wie häufig und über welchen Zeitraum die maximale Verkehrsstärke erreicht werden kann und wie sich der Verkehrsfluss bei Erreichen der maximalen Verkehrsstärke verhält. Hier könnten betriebliche Maßnahmen, wie Streckenbeeinflussungsanlagen, eine Verbesserung erzielen, die mit der Untersuchung der maximalen Verkehrsstärke (Kapitel 5), der q-v-Funktion (Kapitel 6) und der Homogenität des Verkehrsablaufs (Kapitel 7) nicht festgestellt werden konnten. Aus diesem Grund erfolgt in diesem Kapitel eine Untersuchung der Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehr. Diese Übergänge werden im folgenden mit dem Begriff *Verkehrszusammenbruch* bezeichnet.

### **8.1.2 Entstehung von Verkehrszusammenbrüchen**

Um Verkehrszusammenbrüche zu erklären, muss man die Entstehung des Verkehrsflusses genau analysieren. Der Verkehrsfluss ergibt sich – wie in Kapitel 3 bereits erwähnt – aus der Interaktion zahlreicher Verkehrsteilnehmer. Die Verkehrsteilnehmer handeln nach ihren jeweiligen Präferenzen im Hinblick auf Wunschgeschwindigkeit und Sicherheitsempfinden. Diese beiden Faktoren hängen von der Einstellung des jeweiligen Fahrers ab, und lassen sich schwer messen und



quantitativ beschreiben. Die Straßenverkehrsordnung gibt Regeln für die Verhaltensweise der Verkehrsteilnehmer vor, doch lassen diese einen Entscheidungsspielraum zu und werden in der Praxis nur zu einem gewissen Maße befolgt.

Neben den allgemeinen Grundregeln für das Führen eines Fahrzeugs sind für den Verkehrsablauf auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen von Bedeutung:

- das Rechtsfahrgebot (§2 StVO)
- keine allgemeine Geschwindigkeitsbegrenzung für Pkw auf Autobahnen (§3 StVO)
- ein ausreichender Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug (§4 StVO)

Insbesondere die Frage nach dem Sicherheitsabstand ist für das Verstehen des Verkehrsflusses bedeutend. Die Vorschrift der StVO wird so interpretiert, dass ein Fahren im *relativen Sicherheitsabstand* ausreichend ist (KRAMER 2001). Dies bedeutet, dass der zeitliche Abstand so groß sein muss wie die Summe aus eigener Reaktions- und Bremsansprechzeit. Da beim eigentlichen Verzögerungsvorgang beide Fahrzeuge bremsen, muss dafür kein weiterer Abstand vorgesehen werden.

Als ausreichender Zeitabstand gilt in der Regel 1,8 s. Dies hat zu der sogenannten *2-s-Regel*, oder auf den Weg umgerechnet zur *Tacho-halbe-Regel* geführt. Unterschreitet man als Kraftfahrer diesen Abstand, muss man mit einem Bußgeld rechnen (KRAMER 2001).

Bei den Zeitlücken muss in *Brutto-* und *Nettozeitlücken* unterschieden werden. Die Bruttozeitlücke beschreibt den Abstand zwischen gleichen Bezugspunkten zweier Fahrzeuge, die Nettozeitlücke den Abstand zwischen der hinteren Stoßstange des vorderen Fahrzeugs und der vorderen Stoßstange des hinteren Fahrzeugs. Bei hohen Geschwindigkeiten unterscheiden sich beide Werte wenig, da dann der zeitliche Abstand zweier Fahrzeuge fast nur von dem Sicherheitsabstand bestimmt wird.

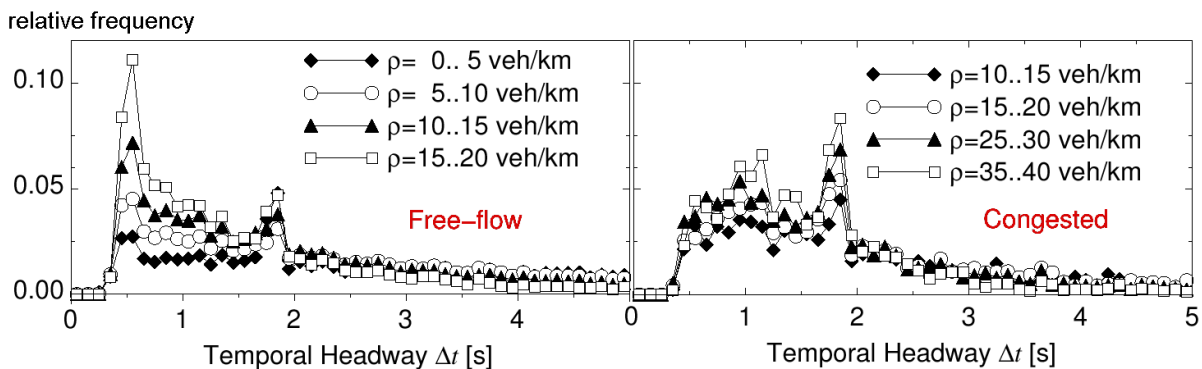
Fahren alle Verkehrsteilnehmer konstant nach der 2-s-Regel, würde sich bei Vernachlässigung der Fahrzeuglänge eine Kapazität von

$$q = 3600 \left[ \frac{s}{h} \right] + 2 \left[ \frac{s}{Kfz} \right] = 1800 \left[ \frac{Kfz}{h} \right] \text{ je Fahrstreifen}$$

ergeben. In der Tat stellen sich in der Realität für den linken und mittleren Fahrstreifen ähnliche Werte für die Kapazität von ca. 2000 Kfz/h/Fst ein (Kapitel 5), für den rechten Fahrstreifen liegt dieser Wert wegen der längeren Lkw niedriger.

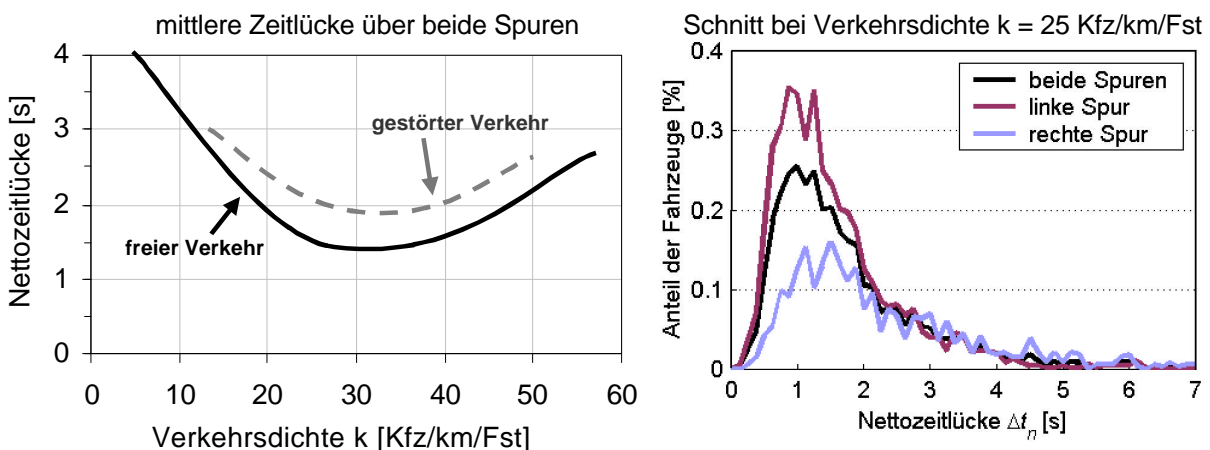
Die Verteilung von Zeitlücken im Verkehrsfluss auf Autobahnen kann durch Messungen von Einzelfahrzeugen gewonnen werden (NEUBERT 2002, KIENZLE 2001). Dabei wurde festgestellt, dass die mittlere Länge der Zeitlücken von der Verkehrsdichte und vom Verkehrszustand abhängt (Abb. 8-1 und Abb. 8-2).

NEUBERT et. al. (2002) analysiert einen Datensatz der A1 bei Köln im Hinblick auf die Zeitlückenverteilung bei verschiedenen Dichten (Abb. 8-1). Das linke Diagramm stellt die Zeitlückenverteilung im freien Verkehr dar. Es treten zwei Spitzen bei 0,5 - 0,8s und bei ca. 1,8s auf. Die erste Häufung der Zeitlücken zwischen 0,5 und 0,8s entstammt aus Fahrzeugpuls, in denen in extrem kurzem Abstand gefahren wird. Die zweite Häufung bei ca. 1,8s resultiert aus den Verkehrsteilnehmern, die im vorgeschriebenen Sicherheitsabstand fahren. Im rechten Diagramm von Abb. 8-1 erkennt man eine andere Verhaltensweise der Verkehrsteilnehmer im stockenden Verkehr. Es entsteht eine gewisse Häufung bei ca. 1,3s und eine deutliche Häufung bei 1,8s. Die sehr kurzen Zeitlücken treten also wesentlich seltener auf.



**Abb. 8-1: Zeitlückenverteilung für den freien bzw. für den stockenden Verkehr (NEUBERT et. al. 2002)**

Bei der Messung der Zeitlücken an der A92 im Bereich München durch KIENZLE (2001) zeigt sich der prinzipielle Verlauf ähnlich (Abb. 8-2). Im linken Diagramm erkennt man wieder die im Mittel kürzeren Zeitlücken im freien Verkehr gegenüber dem gestörten Verkehr. Für die Verkehrsdichte von 25 Kfz/km/Fst zeigt die rechte Abbildung die prozentuale Verteilung der Zeitlücken, die ein Maximum bei ca. 1,0 s aufweist.



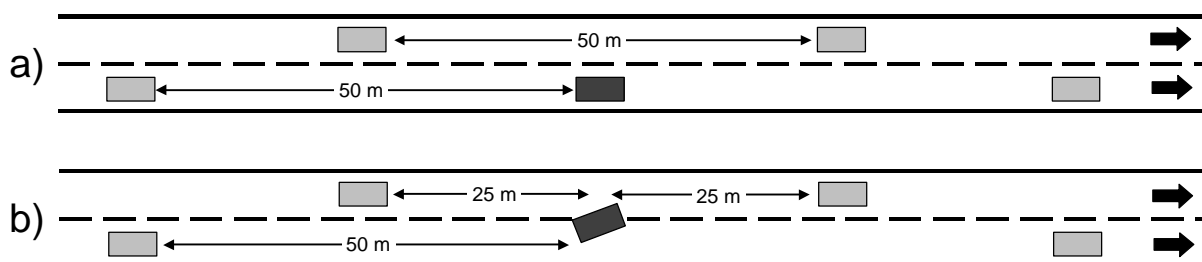
**Abb. 8-2: Zeitlückenverteilung auf einer zweistreifigen Autobahn (KIENZLE 2001)**  
**links: mittl. Zeitlücke in Abhängigkeit der Verkehrsdichte**  
**rechts: Zeitlückenverteilung bei der Verkehrsdichte k = 25 Kfz/km/Fst**

Im dichten Verkehr wird also – besonders auf dem linken Fahrstreifen – häufig deutlich unterhalb des vorgegebenen Sicherheitsabstands gefahren. Dieses Fahren in sehr kurzen Zeitlücken ist vom Standpunkt der Verkehrssicherheit bedenklich, für die Leistungsfähigkeit einer Strecke förderlich. Sicherheit und Leistungsfähigkeit des Verkehrsflusses stehen zueinander im Gegensatz.

### Auftreten einer Störung im Verkehrsfluss

Warum bei hoher Verkehrsbelastung „Staus aus dem Nichts“ auftreten können, liegt in zwei Effekten begründet, die aus den eben beschriebenen Untersuchungen zur Zeitlückenverteilung ersichtlich werden: Im Falle von Störungen im Verkehr erhöhen die Verkehrsteilnehmer ihren Sicherheitsabstand und damit die Größe der Nettozeitlücken. Dies bewirkt ein lokales Absinken der Verkehrsstärke bei stromaufwärts weiterhin konstant hohem Zufluss. Der Querschnitt kann die Verkehrsbelastung nicht mehr bewältigen und es entsteht ein Verkehrszusammenbruch.

Dieser Vorgang kann auch ohne externen Einfluss allein aus den Vorgängen im Verkehrsfluss heraus entstehen, wie Abb. 8-3 veranschaulicht:



**Abb. 8-3: Stauentstehung aufgrund eines einzelnen Überholvorgangs**

In der Ausgangssituation (a) herrscht ein ideal gleichmäßiger Verkehrsfluss mit  $v = 100 \text{ km/h}$  und  $\Delta t = 2 \text{ s}$  (entsprechend  $\Delta s = 50 \text{ m}$ ) auf beiden Fahrstreifen. In Situation (b) möchte ein Verkehrsteilnehmer einen Überholvorgang durchführen und unternimmt einen Fahrstreifenwechsel. Im Beispiel schert der Fahrer auf dem linken Fahrstreifen in der Mitte zwischen zwei Fahrzeugen ein und bewirkt für den hinteren Fahrer eine Abnahme seines Sicherheitsabstands auf die Hälfte. Möchte nun der hintere Fahrer seinen ursprünglichen Sicherheitsabstand wieder herstellen, muss er verzögern und beeinflusst damit wiederum das ihm folgende Fahrzeug. Der Überholvorgang bewirkt eine lokale Störung des Verkehrsflusses.

Weitere Störungen können z.B. aus abrupten Bremsvorgängen durch unaufmerksame Fahrer entstehen. Im Normalfall absorbiert der Fahrzeugstrom diese Art von Störungen. Unter bestimmten Randbedingungen können die Auswirkungen jedoch oszillatorisch anwachsen.

Das Anwachsen einer lokalen Störung kann in einer Mikrosimulation beschrieben werden. Mikrosimulationen benutzen Fahrzeugfolgemodelle, die das Verhalten der

Verkehrsteilnehmer beschreiben. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Verkehrsteilnehmer auf Geschwindigkeitsänderungen  $\Delta v$  des Vorderfahrzeugs mit einer gewissen Reaktionszeit  $T$  einen Verzögerungs- oder Beschleunigungsvorgang einleiten. Im Fahrzeugfolgemodell drückt sich dies mit einer linearen Differentialgleichung 2. Ordnung aus (LAPIERRE und STEIERWALD 1987):

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = \lambda [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} x_n(t) \dots \text{Position des vorausfahrenden Fzg.} \\ x_{n+1}(t) \dots \text{Position des nachfolgenden Fzg.} \\ \ddot{\phantom{x}} \dots \text{Sensitivitätskonstante} \end{array}$$

Untersuchungen zeigen, dass sich die Störung unter bestimmten Umständen aufschaukelt und fortpflanzt. Die entscheidende Größe ist das Produkt aus Sensitivitätskonstante  $\ddot{\phantom{x}}$  und Reaktionszeit  $T$ . Ist dieses klein genug, ist die Amplitude des Abstandsverhaltens gedämpft und es liegt ein stabiler Verkehrsfluss vor. Oberhalb dieser Größe wachsen die Reaktionen der Folgefahrzeuge oszillatorisch an, die Störung breitet sich aus.

### Entstehung von synchronem Verkehr

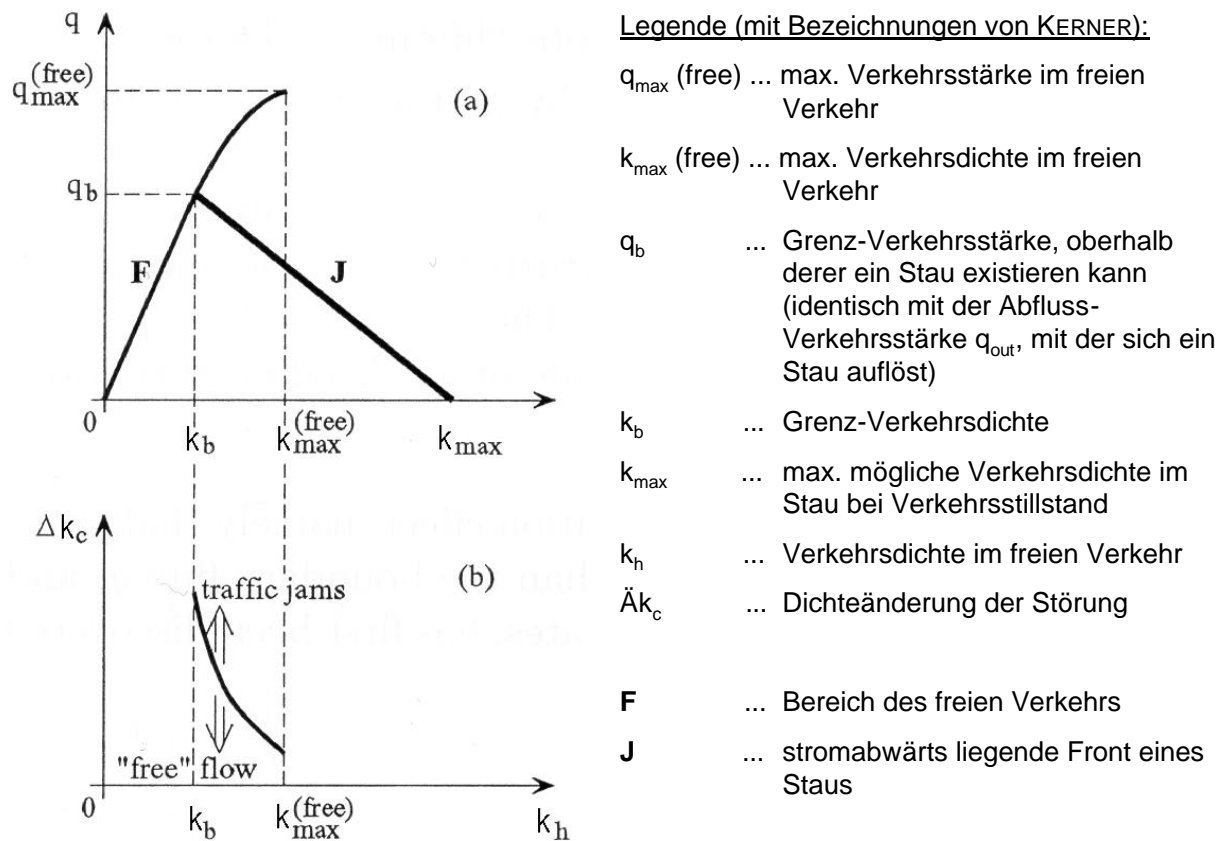
Mit zunehmender Anzahl von Überholvorgängen kann der Verkehrsfluss vom freien Verkehr in den *synchronen Verkehr* übergehen, ohne dass ein Verkehrszusammenbruch eintritt. Untersuchungen von MAHNKE et. al. (2002) zeigen anhand von empirischen und theoretischen Überlegungen, wie bei steigender Verkehrsdichte die zunehmende Anzahl von Überholvorgängen zu einer Korrelation des Verkehrsflusses auf den einzelnen Fahrstreifen führt. Verbunden mit der Zunahme der Überholvorgänge ist eine starke Bildung von Fahrzeugpuls und eine Abnahme der mittleren Geschwindigkeit. Der synchrone Verkehr kann mit Geschwindigkeits- oder Dichtekriterium kaum abgegrenzt werden, da er in allen Verkehrszuständen vom gestauten bis hin zum teilgebundenem Verkehr auftritt (Kapitel 8.2.1).

### Kritische Verkehrszustände

Aktuelle Untersuchungen von KERNER (1997) befassen sich mit dem Phänomen des „Staus aus dem Nichts“. Grundlage stellen Untersuchungen zum Verhalten der Verkehrsteilnehmer bei der Stauauflösung dar, bei denen festgestellt wurde, dass das Verhalten beim Übergang vom Stau in den freien Verkehrsfluss einer konstanten Charakteristika unterliegt. Damit sind Verkehrsstärke und Verkehrsdichte an der Stauauflösungsfront feste, bekannte Werte. Messungen ergaben, dass diese Werte deutlich unter den Werten für den freien Verkehrsfluss liegen. KERNER gibt als grobe Annäherung an:

$$\frac{q_{\max}(\text{free})}{q_{\text{out}}} \approx 1,5 \quad \begin{array}{l} q_{\max}(\text{free}) \dots \text{maximale Verkehrsstärke im freien Verkehr} \\ q_{\text{out}} \dots \text{Verkehrsstärke aus dem Stau heraus bei der Stauauflösung} \end{array}$$

Daraus folgt, dass es im freien Verkehrsfluss oberhalb der Verkehrsstärke  $q_{\text{out}}$  bei Auftreten von lokalen Störungen zu einem Umschlagen des Verkehrs in den Stauzustand kommen kann (Abb. 8-4). Die Verkehrsstärke  $q_{\text{out}}$  der Auflösung einer Staufront wird daher als Grenz-Verkehrsstärke  $q_b$  bezeichnet. Bei Verkehrsstärken zwischen  $q_b < q < q_{\text{max}}(\text{free})$  befindet sich der freie Verkehr in einem *meta-stabilen* Zustand.



**Abb. 8-4:** Auswirkung einer lokalen Störung der Verkehrsdichte in einem freien Verkehrsfluss (KERNER 1997):

(a) Darstellung der Verhältnisse im q-k-Diagramm. Überschreitet die Verkehrsstärke  $q_{\text{free}}$  im freien Verkehr die Verkehrsstärke  $q_b = q_{\text{out}}$ , mit der sich ein Stau auflöst, so kann eine kleine Störung zum Umschlagen des Verkehrs in den Stauzustand führen (meta-stabiler Zustand).

(b) Der Schwellwert für die Größe der Störung  $\Delta k_c$  nimmt mit zunehmender Verkehrsdichte ab.

Abb. 8-4 (b) zeigt den Verlauf des Schwellwertes für eine Störung an, oberhalb derer es zu einem Umschlagen in den Stauzustand kommt. Dieser Schwellwert nimmt mit zunehmender Verkehrsdichte ab, sinkt jedoch nicht auf null, so dass auch bei maximaler Verkehrsstärke und Verkehrsdichte der Verkehr gegen kleine Instabilitäten resistent ist und für eine gewisse Zeit aufrecht erhalten werden kann.

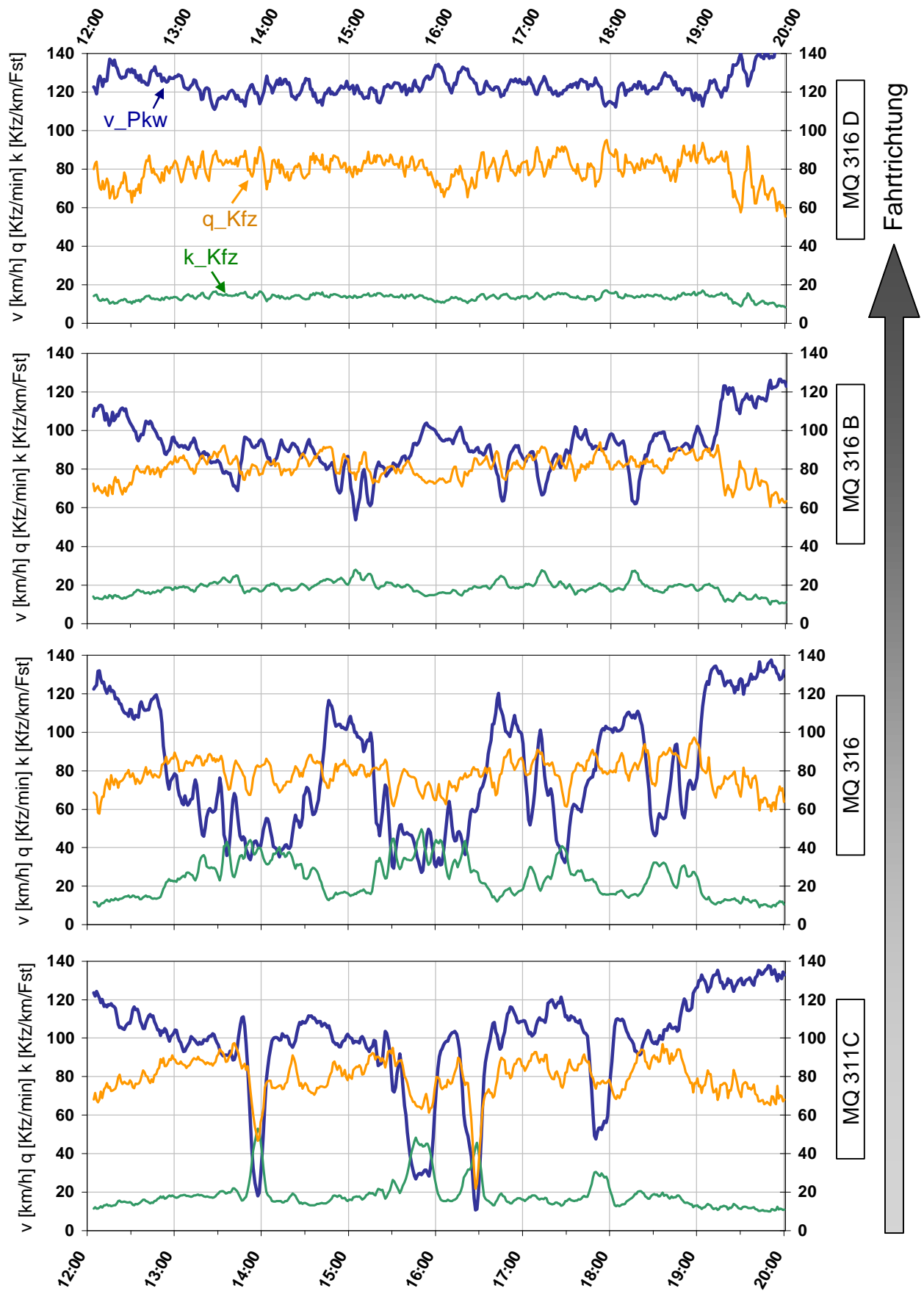
### 8.1.3 „Stau aus dem Nichts“ im Rahmen der vorliegenden Datenbasis

Innerhalb der betrachteten Zeiträume der vorhandenen Datenbasis treten an den verkehrlich stark belasteten Strecken zahlreiche „Staus aus dem Nichts“ auf. Diese lassen sich mittels einer räumlich-zeitlichen Betrachtung des Verkehrsflusses an Strecken erkennen, an denen Daten mehrerer benachbarter Messquerschnitte vorliegen. Eine zusätzliche Abgrenzung der „Staus aus dem Nichts“ von anderen Stauursachen wie Unfall oder Baustelle könnte mit Hilfe der Aufzeichnungen von Polizei- oder Baubehörden erfolgen. Für diesen umfangreichen Datensatz konnten diese Informationen nicht beschafft werden. Teilweise liegen die Informationen auch nicht detailliert genug vor, um Aussagen über Stauursachen treffen zu können (z.B. bei Tagesbaustellen mit kurzzeitigen Fahrstreifensperrungen in eigener Verantwortung der Baufirma). Es gelingt aber auch ohne diese Informationen, die von Verkehrsüberlastungen verursachten Staus von den Staus abzugrenzen, die aus einer Kapazitätsreduktion resultieren. Natürlich kann diese Abgrenzung nicht mit letzter Gewissheit erfolgen, da zwischen den Messquerschnitten keine Informationen über den Verkehrsfluss bekannt sind. Bei einer hohen Messstellendichte (hier 2 km) sind trotzdem zuverlässige Aussagen möglich.

In Abb. 8-5 ist der zeitliche Verlauf des Verkehrsflusses an vier aufeinanderfolgenden Messquerschnitten der A9 an der unbeeinflussten Fahrbahn Richtung Nürnberg dargestellt (für eine genaue Lage der Messquerschnitt siehe Anhang). Die Ganglinien zeigen die Entwicklung der Verkehrsstärke und Verkehrsdichte sowie der Geschwindigkeit über einen 8-h-Zeitraum am Freitag, 04.08.2000. An diesem Nachmittag herrschte ein starker Fernverkehr vor, wie man an der mit zunehmender Entfernung vom Ballungsraum konstant bleibenden Verkehrsstärke erkennt.

Bei der Betrachtung der Ganglinien ergibt sich folgendes Bild: der am weitesten stromabwärts gelegene MQ 316 D zeigt einen gleichmäßig stabilen Verkehrsfluss, der MQ 316 B zeigt einen Verkehrsfluss mit deutlich verminderter Geschwindigkeit an der Grenze vom stabilen zum instabilen Bereich und MQ 316 und MQ 311C zeigen mehrere deutliche Einbrüche des Geschwindigkeitsniveaus in den Stauzustand.

Bemerkenswert in Abb. 8-5 ist der erste Einbruch der Geschwindigkeit kurz vor 13 Uhr am MQ 316. Die Verkehrsstärke nimmt kurz vor dem Einbruch kontinuierlich zu und bleibt auch nach dem Einbruch hoch. Betrachtet man zur gleichen Zeit den Verkehrsfluss an den Querschnitten davor bzw. dahinter, so zeigt sich ebenfalls eine konstante Zunahme der Verkehrsstärke, jedoch kein Einbruch der Geschwindigkeit in den instabilen Bereich. An den umgebenden Messstellen ist also keine Verkehrsstörung vorhanden. Die Störung muss am MQ 316 oder in dem Bereich zwischen MQ 316 und MQ 316 B entstanden sein.



**Abb. 8-5:** Räumlich-zeitliche Darstellung des Verkehrsflusses an vier Messquerschnitten der A9 (von unten nach oben in Fahrtrichtung); dargestellt sind die Ganglinien für Geschwindigkeit, Verkehrsstärke und Verkehrsdichte über einen 8-h-Zeitraum (Freitag, 04.08.2000, 12:00–20:00 Uhr)

Als Gründe für den Verkehrszusammenbruch können kapazitätsmindernde Veränderungen bei den Weg- oder Umfeldbedingungen ausgeschlossen werden. Eine Kapazitätsminderung z.B. durch die Blockade eines Fahrstreifens aufgrund eines Unfalls oder einer Baustelle würde eine Verminderung des Abflusses und damit eine erkennbare Verringerung der Verkehrsstärke am MQ 316 B bewirken. Dies ist nicht der Fall. Weiterhin herrschen keine kapazitätsmindernden Umfeldbedingungen (z.B. Regen) vor, wie aus den Aufzeichnungen der Umfeldmessungen der SBA der Gegenfahrbahn für diesem Zeitpunkt entnommen werden kann.

Es verbleibt als Ursache ein „Stau aus dem Nichts“, d.h. das Auftreten einer kleinen Störung hat bei der hohen Verkehrsstärke dazu geführt, dass der Verkehrsfluss vom stabilen in den instabilen Bereich umgeschlagen ist. Durch die verringerte Kapazität der Strecke im zusammengebrochenen Verkehr findet keine sofortige Erholung des Verkehrsflusses statt. Erst ca. 2 h später schlägt der Verkehr – vermutlich wegen eines geringen Absinkens der Verkehrsstärke – wieder in den stabilen Bereich um. Im Laufe des Tages treten am MQ 316 und am MQ 311C wiederholt derartige Verkehrszusammenbrüche und -erholungen auf.

In einer detaillierten Betrachtung soll der erste Verkehrszusammenbruch genauer analysiert werden. In Abb. 8-9 (Seite 159) ist der Verkehrsfluss in der im Rahmen dieses Datensatzes höchstmöglichen Detailauflösung (1-Minuten-Intervall) über einen Zeitraum von 45 Minuten dargestellt. Man erkennt anhand der Ganglinie, dass der Verkehrszusammenbruch in einem kurzen Zeitraum von 2-3 Minuten erfolgt. Im q-v- und im q-k-Diagramm ist dies als Übergang vom stabilen in den instabilen Bereich erkennbar. Bemerkenswert ist die fast unverändert hohe Verkehrsstärke.

Der Grund für den Zusammenbruch wird bei dieser Darstellung nicht ersichtlich. Die Zunahme der Verkehrsstärke auf fast 100 Kfz/min nach 12:50 Uhr könnte die Ursache sein. Diese Werte werden allerdings zu anderen Zeiten an diesem Querschnitt erreicht, ohne dass es zu einem Umschlagen des Verkehrs kommt. Vermutlich besteht der Grund in einer kleinen, nicht messbaren Störung des Verkehrsflusses (siehe Kapitel 8.1.2). Eine kleine Instabilität im Verkehr hat sich zu einem Verkehrszusammenbruch aufgeschaukelt.



## 8.2 Phasen und Phasenübergänge des Verkehrsflusses

### 8.2.1 Phasen des Verkehrsflusses

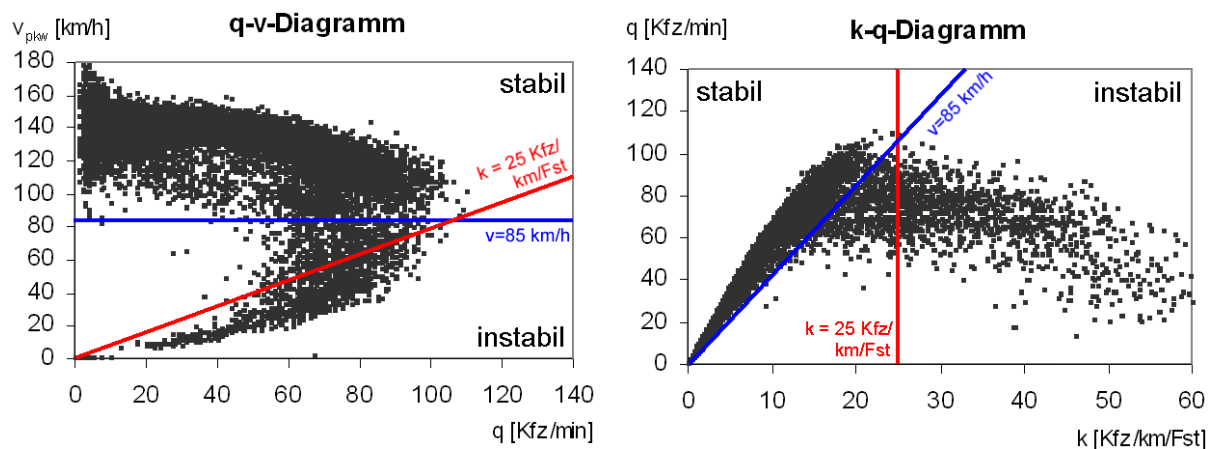
Das im vorigen Kapitel beschriebene unterschiedliche Verhalten der Verkehrsteilnehmer im Hinblick auf den Sicherheitsabstand bzw. auf das Zeitlückenverhalten führt dazu, dass verschiedene Phasen (Zustandsformen) des Verkehrsflusses auftreten. Die Beschreibung und Abgrenzung dieser Zustandsformen ist notwendig, um Aussagen zu Übergängen zwischen den Phasen und damit zur Stabilität des Verkehrsflusses treffen zu können.

Die Abgrenzung der Zustandsformen kann in Abhängigkeit von der Datengrundlage mit unterschiedlichen Methoden und Kriterien durchgeführt werden. In bisherigen Untersuchungen wurden sowohl disaggregierte Werte (d.h. Einzelfahrzeugdaten) als auch aggregierte Werte verwendet, wobei eine Aggregation nur in kurzen Zeitintervallen bis zu einer Minute oder darunter sinnvoll ist. Weiterhin kann die Abgrenzung mittels des gängigen Wertetripels „Verkehrsstärke-Verkehrsdichte-Geschwindigkeit“ oder unter Zuhilfenahme weiterer Kenngrößen wie z.B. der Standardabweichung erfolgen.

Die Forschung in diesem Bereich enthält zahlreiche offene Fragen. Einige Phänomene sind bislang nicht vollständig geklärt und Aussagen dazu in gewissem Maße spekulativ.

#### Abgrenzung stabiler / instabiler Bereich nach HBS

Eine einfache Unterscheidungsmöglichkeit der Verkehrszustände stellt die Einteilung in die zwei Bereiche „stabiler bzw. instabiler Verkehr“ dar. Als Unterscheidungskriterium bietet sich dabei entweder ein bestimmter Wert für die Geschwindigkeit oder für die Verkehrsdichte an. Abb. 8-6 zeigt anhand der Messdaten am MQ 316 der A9 eine Abgrenzung im q-v- bzw. im q-k-Diagramm:



**Abb. 8-6:** Abgrenzung im q-v-Diagramm (linkes Bild) oder q-k-Diagramm (rechtes Bild) mittels eines Kriteriums für die Geschwindigkeit ( $v=85$  km/h) oder für die Dichte ( $k=25$  Kfz/km/Fst)

In beiden Fällen entstehen durch die Abgrenzung zwei durch Geraden voneinander abgetrennte Bereiche. In den beiden Diagrammen sind die Grenzwerte eingezeichnet, wie sie vom HBS-Entwurf für die Unterteilung von stabilem und instabilem Bereich mittels des Geschwindigkeitskriteriums ( $v=85$  km/h) oder des Dichtekriteriums ( $k=25$  Kfz/km/Fst) gegeben werden (KÜHNE 1991 in HBS-Entwurf 1998). In der Endfassung des HBS wird diese Grenze nicht mehr angegeben, sondern ein Bereich  $80 < v < 100$  km/h, in dem der Verkehr vom stabilen in den instabilen Zustand wechselt (HBS 2001). Im Rahmen dieser Untersuchung kann aufgrund der Betrachtung zahlreicher q-v-Diagramme das bisherige Grenzkriterium  $v = 85$  km/h bestätigt werden.

Bei Betrachtung der beiden Diagramme von Abb. 8-6 zeigt sich, dass die Abgrenzung mit dem Geschwindigkeitskriterium eine sinnvollere Bereichseinteilung ergibt als das Dichtekriterium. Im q-k-Diagramm wird durch das Geschwindigkeitskriterium der kompakte lineare Ast des stabilen Bereichs von dem eher flächigen Bereich des instabilen Verkehrs deutlich unterschieden. Dies ist mit einem festen Wert für die Dichte nicht möglich. Auch im q-v-Diagramm zeigt sich die bessere Eignung des Geschwindigkeitskriteriums zur Abgrenzung der beiden Bereiche.

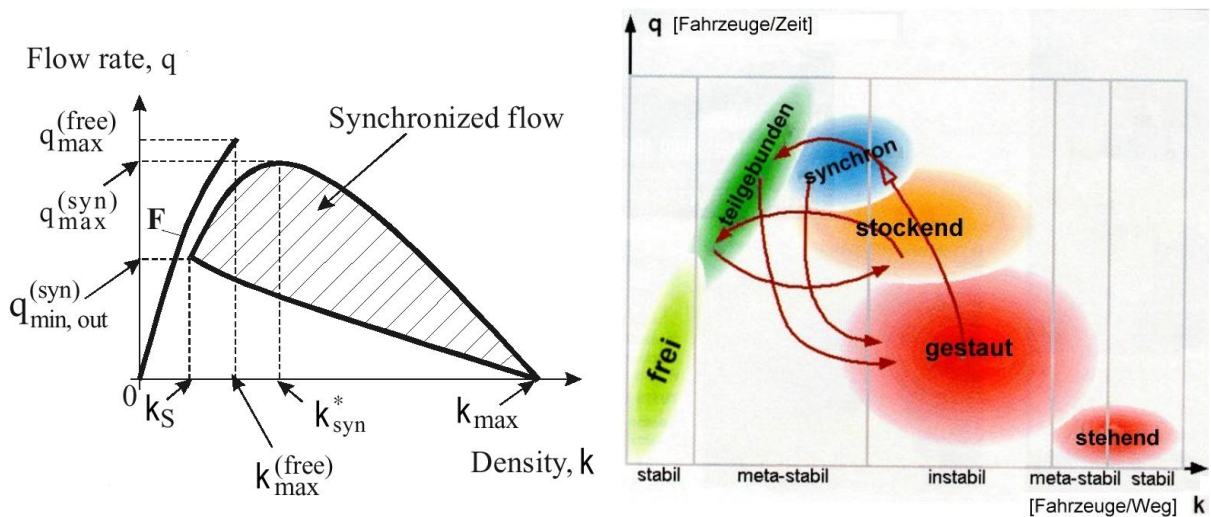
### **Abgrenzung in freien und synchronisierten Verkehr nach KERNER (2000)**

Das linke Bild in Abb. 8-7 zeigt die Unterteilung in *freien* und *synchronisierten* Verkehr nach KERNER (2000). Als Unterscheidungsmerkmal dient dabei das Kriterium, ob die Verkehrsteilnehmer noch überholen können oder nicht. Im synchronisierten Verkehr bestehen kaum Überholmöglichkeiten mehr, der Verkehrsablauf ist auf allen Fahrstreifen gleich, d.h. synchron. Wie in Abb. 8-4 bereits dargestellt, gibt es im synchronisierten Verkehr einige charakteristische Werte für den Verkehrsfluss, z.B. die Verkehrsstärke der Stauauflösung. Weiterhin gibt es im synchronisierten Verkehr Grenzen für die minimale und maximale Verkehrsstärke.

Innerhalb des synchronisierten Verkehrs unterscheidet KERNER (2000) nach

- Verkehr zeitlich stationär und homogen: Geschwindigkeit und Verkehrsstärke sind über mehrere Minuten konstant
- Verkehr zeitlich stationär, aber inhomogen: Geschwindigkeit über mehrere Minuten konstant, aber Verkehrsstärke schwankend
- Verkehr nicht stationär: Geschwindigkeit und Verkehrsstärke stark schwankend

Für die Abgrenzung der einzelnen Bereiche werden keine quantitativen Angaben gegeben.



**Abb. 8-7: Verschiedene Einteilungen der Verkehrszustände im Fundamentaldiagramm und Übergänge zwischen den Zuständen**

**Links: freier und synchroner Verkehr nach KERNER (2000)**

**Rechts: mehrere Bereiche nach KIM und KELLER (2001)**

### Einteilung in mehrere Bereiche nach KIM und KELLER (2001)

Eine sehr detaillierte Einteilung der Verkehrszustände wird in der Untersuchung von KIM und KELLER (2001) vorgenommen (rechtes Bild von Abb. 8-7). In Abhängigkeit von verschiedenen Kriterien, die aus einer Kombination von Messungen von Einzelfahrzeugdaten und aggregierten Verkehrsflussdaten bestehen, werden sechs Verkehrszustände unterschieden:

- freier Verkehr: stationärer und stabiler Verkehrsfluss, deutliche Unterschiede zwischen Fahrstreifen
- teilgebundener Verkehr: *meta-stabiler* Zustand, Verkehrsteilnehmer in Bewegungsfreiheit stark eingeschränkt
- synchroner Verkehr: Geschwindigkeiten auf allen Fahrstreifen gleich und etwas geringer als im teilgebundenen Verkehr, aber immer noch hoch
- stockender Verkehr: niedrige, extrem schwankende Geschwindigkeit bei relativ hoher und nur kaum schwankender Verkehrsstärke, Geschwindigkeit und Verkehrsstärke sind nur gering korreliert
- gestauter Verkehr: niedrige Geschwindigkeit und sehr niedrige Verkehrsstärke, stromaufwärts laufende Schockwellen
- stehender Verkehr: Geschwindigkeit und Verkehrsstärke nahezu null

Da im Rahmen dieser Untersuchung keine Einzelfahrzeugdaten vorliegen, kann diese detaillierte Unterteilung nicht vorgenommen werden.

## Abgrenzung von Zustandsformen im Rahmen der Datenbasis

Von der vorhandenen Datenbasis wurden die Messdaten des MQ 316 exemplarisch untersucht, um das Auftreten der oben beschriebenen Zustandsformen des Verkehrsflusses zu überprüfen. Von dem gesamten Zeitraum sind die deutlichsten Ausprägungen des Verkehrsflusses in Abb. 8-8 auszugsweise dargestellt.

Neben dem Bereich des hier nicht interessierenden freien Verkehrsfluss bei geringer Verkehrsstärke können anhand der Messdaten des MQ 316 folgende Zustandsformen unterschieden werden (Abb. 8-8):

- teilgebundener Verkehrsfluss

Der obere Bereich des stabilen Asts im q-k-Diagramm stellt den teilgebundenen Verkehr dar. Hier zeigen sich maximale Verkehrsstärken (bis zu 100 Kfz/min) bei einem hohen Geschwindigkeitsniveau von 100 – 120 km/h. Dieser Bereich ist streng genommen kein stabiler, sondern ein meta-stabiler Bereich, da kleine Störungen zu einem Umschlagen des Verkehrs führen können.

- synchroner Verkehrsfluss

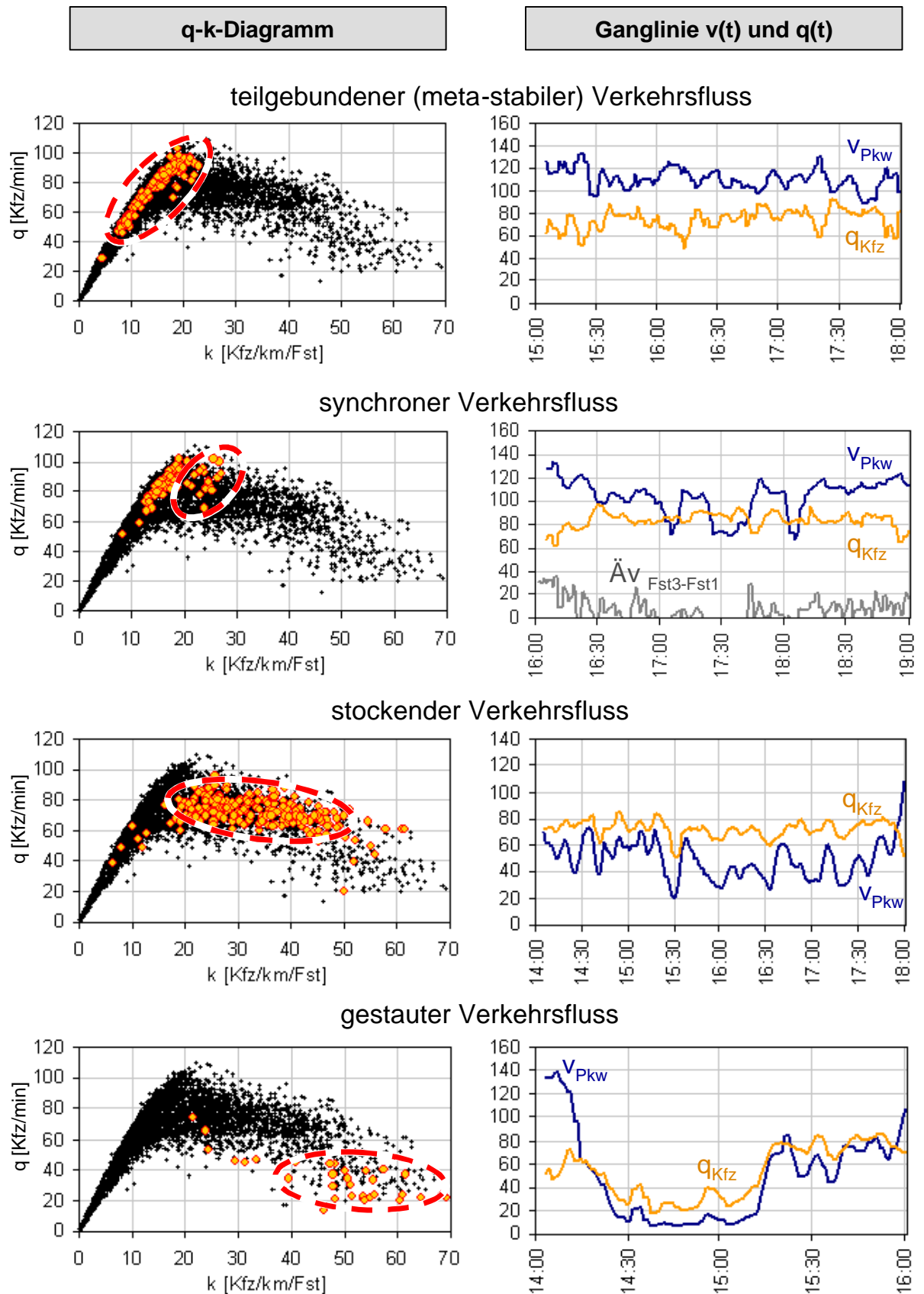
Der von KERNER (2000) beschriebene synchrone Verkehr tritt hier ebenfalls auf. Dieser Begriff soll aber nicht für den ganzen Bereich des instabilen Verkehrs verwendet werden, sondern zur besseren Begriffsabgrenzung in Analogie zu KIM und KELLER (2001) nur für den Zustand mit hohem Geschwindigkeitsniveau. Dies entspricht dem von KERNER bezeichneten Verkehrszustand mit hoher und gering schwankender Verkehrsstärke und Geschwindigkeit. Der synchrone Verkehr tritt zeitlich selten auf.

- stockender Verkehrsfluss

Aufgrund der enormen Verkehrsbelastung wird in dem betrachteten Streckenabschnitt häufig stockender Verkehr angetroffen. Die in KIM und KELLER (2001) beschriebenen Eigenschaften der wenig schwankenden, hohen Verkehrsstärke und der stark schwankenden, niedrigen Geschwindigkeiten können bestätigt werden. Der von KERNER (2000) beschriebene Zustand mit stationärer Geschwindigkeit und schwankender Verkehrsstärke konnte nicht beobachtet werden. Beim stockenden Verkehr handelt es sich häufig um „Staus aus dem Nichts“.

- gestauter Verkehrsfluss

Nach KIM und KELLER (2001) kann ein Bereich abgegrenzt werden, der sich durch außerordentlich niedrige Verkehrsstärke und Geschwindigkeit auszeichnet. Dieser Bereich entsteht bei Blockaden oder blockadeähnlichen Vorkommnissen der Strecke, die stark kapazitätsmindernd wirken.



**Abb. 8-8:** Abgrenzung der Zustandsformen des Verkehrsflusses im  $q$ - $k$ -Diagramm und Veranschaulichung mittels Ganglinie (Daten des MQ 316 der A9 an verschiedenen Tagen innerhalb des Messzeitraums 27.07.-09.08.2000)

## 8.2.2 Phasenübergänge im Verkehrsfluss

Nachdem die verschiedenen Phasen des Verkehrsflusses dargestellt und analysiert wurden, wird nun auf aktuelle Untersuchungen zu Phasenübergängen eingegangen.

### **FERRARI (1991) bzw. HOOPS et. al. (2000)**

Aufgrund des thematischen Zusammenhangs werden die folgenden Veröffentlichungen gemeinsam beschrieben.

FERRARI (1991) stellt ein Verfahren zur Messung der Instabilität eines Verkehrsflusses vor. Mit diesem Verfahren sollen verkehrsbeeinflussende Maßnahmen, wie Geschwindigkeitsbegrenzungen, rechtzeitig genug geschaltet werden, um den Verkehrsfluss zu stabilisieren und ein Umschlagen in den instabilen Bereich zu verhindern. Das Verfahren misst die Zeitlückenverteilung von 50 Einzelfahrzeugen und berechnet daraus ein Maß PHI für die Stabilität des Verkehrsflusses. In Abhängigkeit des Auftretens von Störungen im Verkehrsfluss wird die Geschwindigkeitsbegrenzung T100 oder T80 geschaltet. Die Störungen werden als Einbruch der Geschwindigkeit um eine bestimmte Differenz definiert. Als Differenzgeschwindigkeit werden Stufen von  $\Delta v = 20, 40, 60, 80$  und  $>80$  km/h verwendet. In Deutschland wird das Ferrari-Verfahren an der SBA der A1 eingesetzt.

HOOPS et. al. (2000) untersuchten im Rahmen eines Forschungsprojekts des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) die Möglichkeiten der Störfallerkennung im Verkehrsablauf auf Autobahnen. Hierzu wurden neben anderen Verfahren auch das Ferrari-Verfahren auf seine Wirksamkeit hin analysiert. Ein Vergleich von zwei Zeiträumen, bei denen einmal das Verfahren im Blindbetrieb (d.h. Prognose von Störungen, aber kein Erlass von Schaltzuständen) und einmal im wirklichen Betrieb lief (also Erlass von Schaltzuständen) ergab eine wesentlich geringere Zahl von Geschwindigkeitseinbrüchen im Zeitraum des Betriebs. Dies ist ein Hinweis, dass die Schaltung von Geschwindigkeitsbegrenzungen Zusammenbrüche des Verkehrs vermeiden kann.

### **KÜHNE und ANSTETT (1997)**

Die Forschungsarbeit von KÜHNE und ANSTETT (1997) betrachtet die Dynamik des Verkehrsflusses mit dem Ziel, diejenigen Streckenabschnitte auf Autobahnen zu ermitteln, die besonders häufig Instabilitäten im Verkehrsfluss aufweisen. Die Methode des Verfahrens besteht darin, die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs in Abhängigkeit der Verkehrsstärke zu ermitteln. Diese Wahrscheinlichkeiten ermöglichen es, verschiedene Querschnitte im Hinblick auf Instabilitäten zu vergleichen.

Folgende Merkmale kennzeichnen das Verfahren:

- Messwernerfassung im 1-min-Intervall, anschließend gleitende Mittelwertbildung von Verkehrsstärke und Geschwindigkeit über einen Zeitraum von fünf Minuten
- Absinken der Geschwindigkeit um  $\Delta v = 15$  km/h bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von  $v_1 < 100$  km/h

Wird ein derartiger Verkehrszusammenbruch erkannt, so wird der Verkehrsstärke, die zum Beginn des Verkehrszusammenbruchs herrschte, ein Verkehrszusammenbruch zugewiesen. Die summierten Verkehrszusammenbrüche werden auf die summierten Verkehrsstärken bezogen und damit die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs je Verkehrsstärke berechnet. Schließlich wird daraus eine Funktion für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Verkehrszusammenbrüchen in Abhängigkeit der Verkehrsstärke gegeben und darauf basierend ein Ansatz zur dynamischen Beschreibung der Kapazität entwickelt.

#### **LORENZ und ELEFTERIADOU (2000)**

Basierend auf Überlegungen zur probabilistischen Natur des Verkehrsablaufs wurde in einer Forschungsarbeit der University of Pennsylvania (USA) der Verkehrsfluss an zwei Messstellen eines Highways auf charakteristische Verkehrszusammenbrüche hin untersucht. Dabei wird von einem Zwei-Phasen-Modell des Verkehrsflusses ausgegangen, das den Verkehr in die beiden Phasen „uncongested“ und „congested“ unterteilt. Die Abgrenzung erfolgt mit dem Geschwindigkeitskriterium  $v = 90$  km/h. Als signifikanter Verkehrszusammenbruch gilt das Abfallen der Geschwindigkeit für mehr als 5 Minuten unter die Grenze von 90 km/h. Eine Parameterstudie wurde zur Länge des Zeitintervalls unternommen, über das die Verkehrsstärke gemittelt wurde. Bei einer Betrachtung der Intervalllängen 20 s, 1, 5 und 15 min zeigte sich das 5-min-Intervall als am besten geeignet. Als zugehörige Verkehrsstärke zum Zusammenbruch wurde die Verkehrsstärke unmittelbar vor dem Zusammenbruch genommen. Wie in der Arbeit von KÜHNE und ANSTETT (1997) wurden die Verkehrsstärken bei dem Zusammenbruch auf die Anzahl der Verkehrsstärken ohne Zusammenbruch bezogen und damit die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit berechnet.

### **8.3 Methodik zur Untersuchung der Stabilität eines Verkehrsflusses**

#### **8.3.1 Definition eines Verkehrszusammenbruchs**

Basierend auf Literaturangaben und auf den eigenen Untersuchungen zu den Zustandsformen des Verkehrsflusses wird im folgenden eine Methode zur Beschreibung der Stabilität eines Verkehrsflusses aufgebaut. Die Methode soll eine eventuelle Stabilisierungswirkung von SBA und die damit verbundenen Reisezeitersparnisse für die Verkehrsteilnehmer messen und quantifizieren können. Die Restriktionen der vorliegenden Datenbasis müssen insofern berücksichtigt werden, als dass die Messwerte zum 1-min-Intervall aggregiert vorliegen. Eine Zuhilfenahme von Einzelfahrzeugdaten zur Abgrenzung der Phasen des Verkehrsflusses ist mit der vorliegenden Datenbasis nicht möglich.

Von den zahlreichen möglichen Phasen und Phasenübergängen des Verkehrsflusses sind die Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehr von besonderem Interesse, da sie für den Verkehrsteilnehmer Reisezeitverluste bedeuten. Eine nähere Unterscheidung, welche der verschiedenen Phasen sich nach dem Übergang im instabilen Verkehr einstellt, ist von untergeordneter Bedeutung. Die hauptsächliche Wirkungsrichtung von SBA wird bei der Reduktion der Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehr vermutet. Im zusammengebrochenen Verkehr können SBA wenig Wirkung ausüben.

Wie in Kapitel 8.2.1 in Abb. 8-6 und Abb. 8-7 dargestellt, hat sich zur Abgrenzung von stabilem und instabilem Verkehr ein Geschwindigkeitskriterium als vorteilhaft erwiesen. Ein Phasenübergang vom stabilen in den instabilen Verkehr zeigt sich durch das Absinken der Geschwindigkeit unterhalb eines festgelegten Grenzwerts. Um die Einflüsse von zufälligen Schwankungen im Verkehrsablauf auszufiltern, müssen weitere Kriterien vorgesehen werden, die zufällige Schwankungen im Verkehrsfluss von signifikanten Einbrüchen im Geschwindigkeitsniveau unterscheiden können. Ein Element dazu ist die Mittelung der Messwerte über einen bestimmten Zeitraum.

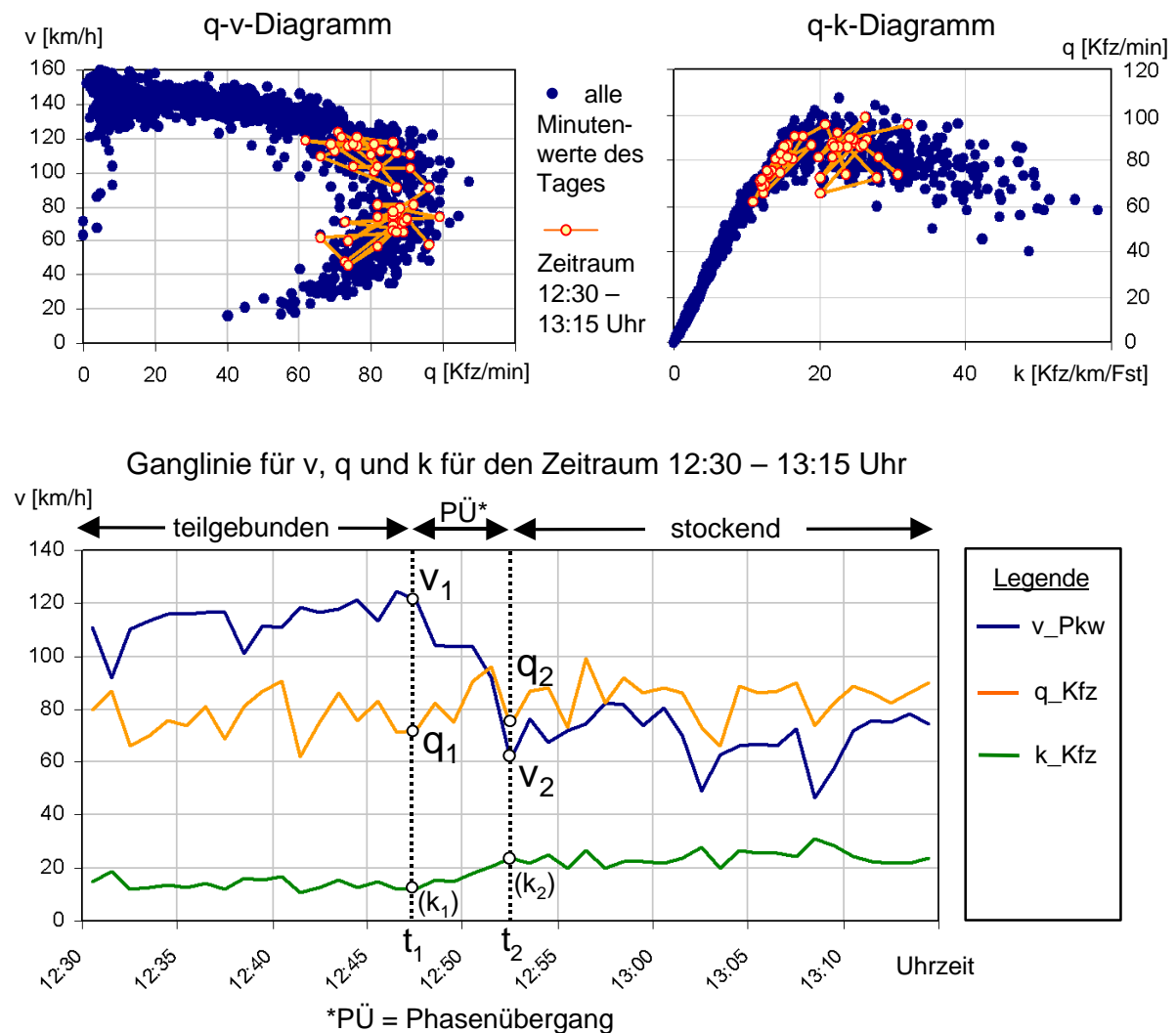


## Prinzipielle Methodik

Der prinzipielle Aufbau der Untersuchungsmethode ist in Abb. 8-9 anhand der Messdaten eines knapp zweistündigen Zeitraums dargestellt. Das Auftreten eines Geschwindigkeitsabfalls um mindestens  $\Delta v$  innerhalb eines Zeitraums  $\Delta t$  bei Vorhandensein einer Mindestgeschwindigkeit  $v_1$  und einer Maximalgeschwindigkeit  $v_2$  wird als Kriterium für einen Phasenübergang vom stabilen in den instabilen Verkehrsfluss verwendet. Bei einem derartigen Phasenübergang wird im folgenden von einem Verkehrszusammenbruch gesprochen.

### Phasenübergang vom teilgebundenen in den stockenden Verkehr

(A9 - MQ 316, Freitag 04.08.2000)



**Abb. 8-9:** Darstellung eines Phasenübergangs vom teilgebundenen in den stockenden Verkehr (A9 – MQ 316, Freitag 04.08.2000, 1-min-Intervall)

Alle verkehrlichen Kenngrößen werden mit einem gleitenden Mittelwert über 5 Minutenintervalle gemittelt, um zufällige Schwankungen im Verkehrsfluss auszufiltern. Weiterhin muss eine Mindestverkehrsstärke vorliegen, um unbedeutende Ereignisse (z.B. langsam fahrendes Fahrzeug in den Nachtstunden) auszuschließen.

Als Ergebnis wird die Verkehrsstärke  $q_1$  festgehalten, die die Verkehrsstärke zum Zeitpunkt des Verkehrszusammenbruchs repräsentiert. Der Betrag des Geschwindigkeitseinbruchs ist von untergeordneter Bedeutung, wie Sensitivitätsanalysen ergaben (KÜHNE und ANSTETT 1997). Jedem Verkehrszusammenbruch wird also eine Verkehrsstärke zugewiesen. Diese Verkehrsstärken werden in Klassen zusammengefasst und durch die Anzahl der insgesamt gemessenen Verkehrsstärken dividiert. Damit wird das Auftreten der Verkehrszusammenbrüche auf das Auftreten der Verkehrsstärken bezogen und die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs je Verkehrsstärkeklasse berechnet. Dies filtert den Einfluss einer unterschiedlichen Verteilung von Verkehrsstärken heraus. Die unterschiedliche Verteilung von Verkehrsstärken ist aufgrund der zufälligen und systematischen Schwankungen im Verkehrsfluss bei einem Vergleich verschiedener Querschnitte oder Zeiträume immer vorhanden und betrifft auch Querschnitte, die aufsummiert über den ganzen Tag die gleiche Verkehrsbelastung aufweisen. Mit der Normierung der Verkehrszusammenbrüche auf die Verteilung der Verkehrsstärken können verschiedene Querschnitte verglichen werden. Natürlich darf trotzdem die Problematik der Vergleichbarkeit von Weg-, Umfeld- und Verkehrsbedingungen nicht vergessen werden (siehe hierzu auch Kapitel 5 und 6).

Die beschriebene Methode unterscheidet die Verkehrszusammenbrüche nicht danach, ob sie aus Verkehrsüberlastungen oder aus anderen Gründen entstanden sind. Es erscheint auf den ersten Blick als unbefriedigend, da zur Bewertung der Stabilität eines Verkehrsflusses nur die Zusammenbrüche eine Rolle spielen, welche als Folge einer Verkehrsüberlastung aufgetreten sind. Aussagen zu den Gründen von Verkehrszusammenbrüchen sind aufgrund der aggregierten Datenbasis ohne Vorhandensein weiterer Kenntnisse (wie z.B. Videoaufzeichnungen des Verkehrsflusses) kaum möglich. Die räumlich-zeitliche Betrachtung zahlreicher Ganglinien über die vorhandenen 14-Tages-Zeiträume zeigt jedoch, dass an hochbelasteten Autobahnabschnitten die Zusammenbrüche aufgrund von Verkehrsüberlastung sehr viel häufiger vorkommen als Zusammenbrüche aufgrund einer Kapazitätsreduktion.

### 8.3.2 Kriterien zur Abgrenzung eines Verkehrszusammenbruchs

Von entscheidender Bedeutung bei dieser Methode ist die richtige Festlegung der Schwellwerte, mit denen die signifikanten Verkehrszusammenbrüche von den zufälligen Schwankungen im Verkehrsfluss abgegrenzt werden. Im folgenden werden die Schwellwerte festgelegt, indem Erfahrungen aus früheren Untersuchungen zusammengestellt und Parameterstudien durchgeführt werden.

#### Länge des Zeitintervalls und Mittelwertbildung

In der Studie von LORENZ und ELEFTERIADOU (2000) wurde der Einfluss verschieden langer Zeitintervalle bei der Betrachtung von Verkehrszusammenbrüchen analysiert. Es zeigte sich, dass mit zunehmender Länge des Zeitintervalls die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit ansteigt, da ein Verkehrsfluss mit hoher Verkehrsstärke nur eine begrenzte Zeit aufrecht erhalten werden kann. Aus den untersuchten Zeiträumen des 1-min-, 5-min- und 15-min-Intervalls stellte sich die Verwendung des 5-min-Intervalls als zweckmäßiger Kompromiss zwischen einer hohen zeitlichen Auflösung und einem Ausfiltern von zufälligen Schwankungen heraus. Das 5-min-Intervall wurde ebenso in der Studie von KÜHNE und ANSTETT (1997) verwendet. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird das Zeitintervall zwischen Vorher-Zustand und Nachher-Zustand auf  $\Delta t = 5$  min gesetzt. Um einzelne, zufällige Schwankungen auszusortieren, werden die Kenngrößen Geschwindigkeit ( $v_{PKW}$ ) und Verkehrsstärke ( $q_{Kfz}$ ) des Verkehrsflusses mit einem gleitenden Mittelwert geglättet. Der gleitende Mittelwert wird für jedes Minutenintervall über einen Umgebungszeitraum von fünf Minuten erstellt.

#### Geschwindigkeitseinbruch

In der Studie von LORENZ und ELEFTERIADOU (2000) wurde kein Mindestwert für den Geschwindigkeitsabfall verwendet. Es genügte ein Abfall der Geschwindigkeit unter einen bestimmten Schwellwert. Die Untersuchung von KÜHNE und ANSTETT (1997) verwendete einen Schwellwert von  $\Delta v > 15$  km/h für den Geschwindigkeitsabfall, um signifikante Verkehrszusammenbrüche von zufälligen Schwankungen im Verkehrsfluss abzugrenzen. Dieser Wert wurde in einer eigenen Parameterstudie für die Werte  $v > 10, 15, 20, 25, 30, 35$  und  $40$  km/h variiert und als geeignet bestätigt.

#### Vorher-Geschwindigkeit $v_1$ und Nachher-Geschwindigkeit $v_2$

Die Wahl der Schwellwerte für  $v_1$  und  $v_2$  ist von großer Bedeutung für die richtige Abgrenzung der Phasenübergänge. LORENZ und ELEFTERIADOU (2000) verwendeten denselben Schwellwert von  $v_1 = v_2 = 90$  km/h, um den stabilen Bereich und den instabilen Bereich abzugrenzen, d.h. im Vorher-Zustand musste eine Geschwindigkeit  $v_1 > 90$  km/h und im Nachher-Zustand eine Geschwindigkeit von  $v_2 < 90$  km/h vorhanden sein um einen Verkehrszusammenbruch zu detektieren. Die Wahl von

90 km/h wird unter anderem mit dem Übergang vom Level-of-Service E zu F gemäß dem HCM begründet. Die Untersuchung von KÜHNE und ANSTETT (1997) verwendet nur einen Schwellwert für die Vorher-Geschwindigkeit ( $v_1 < 100$  km/h) um sicherzustellen, dass der Phasenübergang innerhalb des teilgebundenen Verkehrs stattfindet.

In eigenen Parametervariationen wurde festgestellt, dass die Verwendung eines Vorher- und eines Nachher-Schwellwerts notwendig ist, um einen Phasenübergang korrekt zu erkennen. Wird nur eine Maximalgeschwindigkeit als Nachher-Schwellwert verwendet, so ist nur sichergestellt, dass ein Phasenübergang in den instabilen Bereich oder innerhalb des instabilen Bereichs stattfindet. Der Phasenübergang muss jedoch nicht zwingend aus dem stabilen Bereich heraus stattfinden.

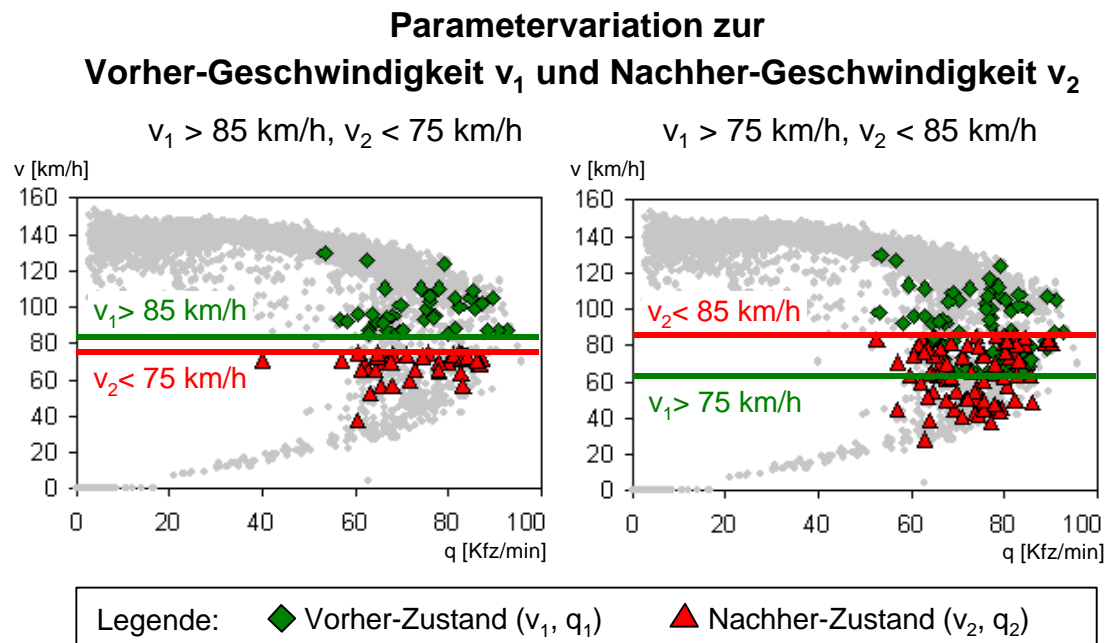
Im Rahmen dieser Untersuchung wurde daher sowohl ein Schwellwert für die Mindestgeschwindigkeit im Vorher-Zustand als auch für die Maximalgeschwindigkeit für den Nachher-Zustand angewandt. Ausgangsbasis für die Wahl der Schwellwerte sind die Angaben für die Verkehrsqualitätsstufe E des HBS, innerhalb derer der Übergang vom stabilen in den instabilen Verkehr stattfindet. Für die Abgrenzung der Stufe E finden sich in dem HBS-Entwurf (1994) andere Angaben ( $75 < v < 85$  km/h) als in der aktuellen Fassung des HBS (2001), bei der ein Bereich von  $80 < v < 100$  km/h angegeben wird. In einer Parameterstudie wurden basierend auf diesen Angaben die Schwellwerte für Vorher- und Nachher-Zustand in verschiedenen Stufen variiert und die Ergebnisse analysiert.

Aus den zahlreichen Untersuchungen und Einzelergebnissen, die zur Entscheidungsfindung der Wahl der Schwellwerte beitragen, sind in der Abb. 8-10 die Ergebnisse für zwei verschiedene Schwellwerte in Form zweier q-v-Diagramme dargestellt für die Fälle:

- linkes Diagramm: Vorher-Zustand:  $v_1 > 85$  km/h, Nachher-Zustand:  $v_2 < 75$  km/h
- rechtes Diagramm: Vorher-Zustand:  $v_1 > 75$  km/h, Nachher-Zustand:  $v_2 < 85$  km/h

Im rechten Diagramm sind die Schwellwerte also großzügiger gewählt und es werden mehr Verkehrszusammenbrüche erkannt.

In beiden q-v-Diagrammen von Abb. 8-10 sind die detektierten Verkehrszusammenbrüche mit ihren verkehrlichen Kenngrößen im Vorher-Zustand ( $v_1, q_1$ ) und im Nachher-Zustand ( $v_2, q_2$ ) des Phasenübergangs eingezeichnet. Für eine bessere Veranschaulichung wurden alle Messwerte des betrachteten 14-Tages-Zeitraums in den q-v-Diagrammen grau hinterlegt.



**Abb. 8-10: Parametervariation zu den Kriterien  $v_1$  und  $v_2$  zur Abgrenzung der Verkehrszusammenbrüche (beispielhafte Darstellung der Ergebnisse am MQ 316)**

Man erkennt in beiden Diagrammen, dass die Zusammenbrüche als Punktwolke in einem Bereich von ca. 60 Kfz/min bis hin zur maximalen Verkehrsstärke auftreten. Der Unterschied zwischen den beiden Diagrammen besteht darin, dass die striktere Wahl der Schwellwerte im linken Diagramm zu einer deutlicheren Abgrenzung des stabilen und des instabilen Bereichs führt. Umgekehrt führt die Wahl großzügigerer Kriterien im rechten Diagramm zu einem gewissen Überlappen beider Bereiche. Es gibt also einen Zwischenbereich, der sowohl die Kenngrößen für den Verkehrsfluss enthält, wie sie zu Beginn bzw. zu Ende des Verkehrszusammenbruchs vorkommen. Mittels Betrachtung der Verkehrszusammenbrüche anhand von zahlreichen Ganglinien wurde festgestellt, dass eine gewisse Überlappung zur Detektion von Verkehrszusammenbrüchen besser geeignet ist, als die strikte Trennung der Bereiche. Dies resultiert daher, dass sich stabiler und instabiler Bereich nicht strikt voneinander trennen lassen, sondern beide Bereiche fließend ineinander übergehen.

Als Ergebnis der Parameterstudie werden für die folgenden Untersuchungen als Schwellwerte für Vorher-Zustand bzw. Nachher-Zustand gewählt:

- Minimalgeschwindigkeit für den Vorher-Schwellwert:  $v_1 > 75 \text{ km/h}$
- Maximalgeschwindigkeit für den Nachher-Schwellwert:  $v_2 < 85 \text{ km/h}$

### 8.3.3 Exemplarische Anwendung der Untersuchungsmethode

Zur Veranschaulichung wird die Untersuchungsmethodik exemplarisch an einem 14-Tages-Zeitraum des MQ 316 der A9 angewandt mit den bei der Parameterstudie gewählten Schwellwerten  $v > 15$  km/h,  $v_1 > 75$  km/h,  $v_2 < 85$  km/h. Der gewählte Querschnitt liegt an einer dreistreifigen Richtungsfahrbahn mit hohen Verkehrsbelastungen und ist nicht mit einer Streckenbeeinflussungsanlage ausgestattet.

Die Ergebnisse sind in Abb. 8-11 auf der nächsten Seite zusammengestellt. Tabellarisch dargestellt sind die Mittelwerte für alle detektierten Verkehrszusammenbrüche des 14-Tage-Zeitraums für den Verkehrsfluss im Vorher- und im Nachher-Zustand. Grafisch sind in Form einer Ganglinie bzw. als q-v- und q-k-Diagramm die Verkehrszusammenbrüche über einen ausgewählten 8-h-Zeitraum von 12 – 20 Uhr am Freitag, 04.08.2000 dargestellt.

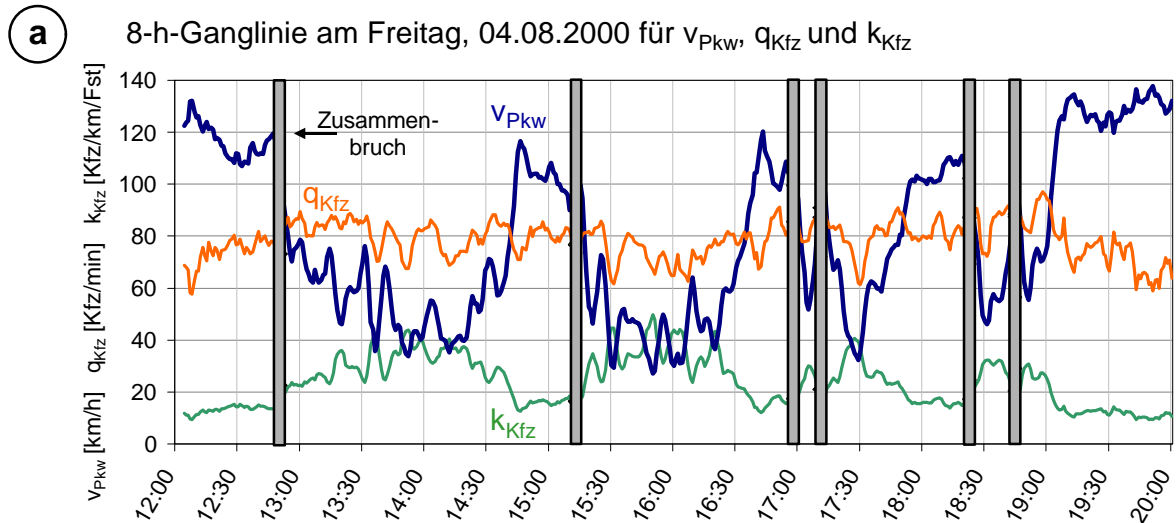
#### Interpretation der Verkehrszusammenbrüche des 8-h-Zeitraums

In dem 8-h-Zeitraum herrscht durch Feierabendverkehr am MQ 316 auf der Richtungsfahrbahn der A9 von München nach Nürnberg eine über die acht Stunden konstant sehr hohe Verkehrsbelastung mit einem Maximalwert von 107 Kfz/min bzw. 5140 Kfz/h. Aus den Umfeldmessungen der SBA der gegenüberliegenden Fahrbahn ist bekannt, dass die Umfeldbedingungen trocken waren. Durch die Betrachtung des stromabwärts liegenden MQ 316B kann geschlossen werden, dass in dem Zeitraum keine kapazitätsreduzierenden Umstände vorlagen.

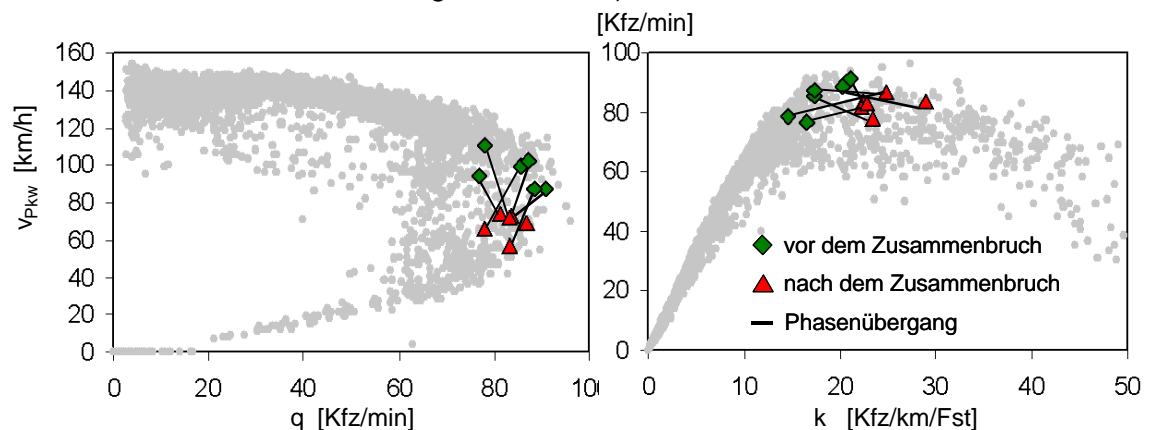
Gemäß den gewählten Kriterien werden sechs Verkehrszusammenbrüche detektiert. Der Verkehr wechselt innerhalb des 8-h-Zeitraums mehrmals zwischen stabilem und instabilem Bereich hin und her. Diese Wechsel sind in der Ganglinie von Abb. 8-11 eingezeichnet und deutlich zu erkennen. Im q-v- und q-k-Diagramm sind die Verkehrszusammenbrüche mit ihren Vorher- und Nachher-Werten eingezeichnet. Zu erkennen ist, dass fünf Zusammenbrüche in der Verkehrsqualitätsstufe E entstehen und einer in der Stufe D. Daraus ist zu erkennen, dass auch bei einem höheren Geschwindigkeitsniveau im teilgebundenen Verkehr ein Verkehrszusammenbruch auftreten kann. Die Verkehrsstärken verteilen sich in einem Bereich von 75 – 90 Kfz/min. Verkehrszusammenbrüche treten also, wie oben bereits erwähnt, auch weit unterhalb der Kapazitätsgrenze auf. Hier zeigt sich deutlich die stochastische Charakteristik des Verkehrsflusses. Es existiert kein fester Grenzwert für die Verkehrsstärke, oberhalb derer der Verkehr von stabil auf instabil zwangsläufig umschlägt.

## Zusammenbrüche und Phasenübergänge im Verkehrsfluss

Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse am MQ 316  
für die gewählten Kriterien  $v_1 > 75$  km/h,  $v_2 < 85$  km/h und  $\Delta v > 15$  km/h



**b** q-v-Diagramm und q-k-Diagramm (Verkehrszusammenbrüche dargestellt für den 8-h-Zeitraum des Freitag, 04.08.2000)



**c** Quantitative Darstellung von Mittelwerten aus allen Verkehrszusammenbrüchen innerhalb des 14-Tages-Zeitraums:

	Mittel- und Extremwerte für Vorher- bzw. Nachher						Differenz		
	q1	q2	v1	v2	k1	k2	q1-q2	v2-v1	k1-k2
	Kfz/min		km/h		Kfz/km/Fst		Kfz/min	km/h	Kfz/km/Fst
Mittel	73,9	73,3	95,4	71,2	16,1	21,1	- 0,6	- 24,2	+ 5,0
Max	92,8	90,4	129,7	85,0	23,1	35,8	+12,8	- 58,6	+ 12,6
Min	53,0	52,4	75,1	45,5	8,9	12,9	- 14,8	- 15,0	+ 0,3

**Abb. 8-11:** Verkehrszusammenbrüche für den 14-Tages-Zeitraum des MQ 316 der A9 für die Kriterien  $v_1 > 75$  km/h,  $v_2 < 85$  km/h und  $v > 15$  km/h:

- Beispielhafte Veranschaulichung der Verkehrszusammenbrüche anhand einer 8-h-Ganglinie für Freitag, 04.08.2000
- Beispielhafte Veranschaulichung der Phasenübergänge innerhalb des 8-h-Zeitraums im q-v- und q-k-Diagramm
- Ergebnisse für Mittel- und Extremwerte sowie der Differenzwerte für den Gesamtzeitraum

## Diskussion der Verkehrszusammenbrüche des 14-Tages-Zeitraums

Innerhalb des untersuchten 14-Tage-Zeitraums traten am MQ 316 insgesamt 55 Verkehrszusammenbrüche auf. Die Mittel- und Extremwerte für den Vorher- bzw. Nachher-Zustand und für die Differenz sind in Tabelle C in Abb. 8-11 angegeben.

Bei der Betrachtung der Verkehrsstärke (als Summenwert über die drei Fahrstreifen) fällt auf, dass diese im Mittel nur um 0,6 Kfz/min absinkt, also fast gleich bleibt. Ein Zusammenbruch der Geschwindigkeit geht bei den „Staus-aus-dem-Nichts“ also meistens nicht mit einer Änderung der Verkehrsstärke einher. Die Verkehrsstärke kann bei einem Zusammenbruch sowohl zu- als auch abnehmen oder gleich bleiben. Die Vorher-Verkehrsstärken  $q_1$  verteilen sich ähnlich wie die Nachher-Verkehrsstärken  $q_2$  in einem Bereich von ca. 50 – 90 Kfz/min. Es gibt vereinzelte Zusammenbrüche mit niedriger Verkehrsstärke, bei denen zu vermuten ist, dass sie aus Sonderereignissen entstanden sind und nicht durch eine Verkehrsüberlastung. Diese vereinzelt Fälle spielen nach der Zusammenfassung in Klassen keine Rolle mehr (Kapitel 8.3.4) und verfälschen das Ergebnis nicht.

Die Abnahme der Geschwindigkeit reicht von minimal 15 km/h (also dem Schwellwert) bis hin zu maximal ca. 60 km/h. Im Schnitt fällt die Geschwindigkeit um 25 km/h ab. Die Vorher-Geschwindigkeit liegt im Mittel mit  $v_1 = 95$  km/h innerhalb der Verkehrsqualitätsstufe E gemäß der neuen HBS-Definition. Die Definition der Verkehrsqualitätsstufe E mit „Gefahr eines Verkehrszusammenbruchs“ sowie „Wechsel von Stabilität zur Instabilität“ kann mit diesen Ergebnissen bestätigt werden. Ebenso kann bestätigt werden, dass die Anhebung der Geschwindigkeitsgrenzen der Qualitätsstufe E gegenüber dem HBS-Entwurf von 1994 (vgl. Tabelle 3-1, Seite 39) gerechtfertigt ist.

Entsprechend der Fundamentalbeziehung zwischen  $v, q$  und  $k$  muss bei einem Abfall der Geschwindigkeit bei gleichbleibender Verkehrsstärke ein Anstieg der Verkehrsdichte die Folge sein. Dies zeigt sich in dem durchschnittlichen Ansteigen der Verkehrsdichte um 5 Kfz/km/Fst. Bemerkenswert niedrig erscheint die Verkehrsdichte von  $k_1 = 16,1$  Kfz/km/Fst als mittlerer Wert vor dem Verkehrszusammenbruch. Hierbei ist zu beachten, dass die Verkehrsdichte gemittelt über die drei Fahrstreifen dargestellt ist. Entsprechend der unterschiedlichen Auslastung der Fahrstreifen ist die Verkehrsdichte auf dem linken Fahrstreifen höher als dieser Wert. Eine detaillierte Analyse wird zeigen, bei welchen Verkehrsdichten die Verkehrszusammenbrüche entstehen (Kapitel 8.5).

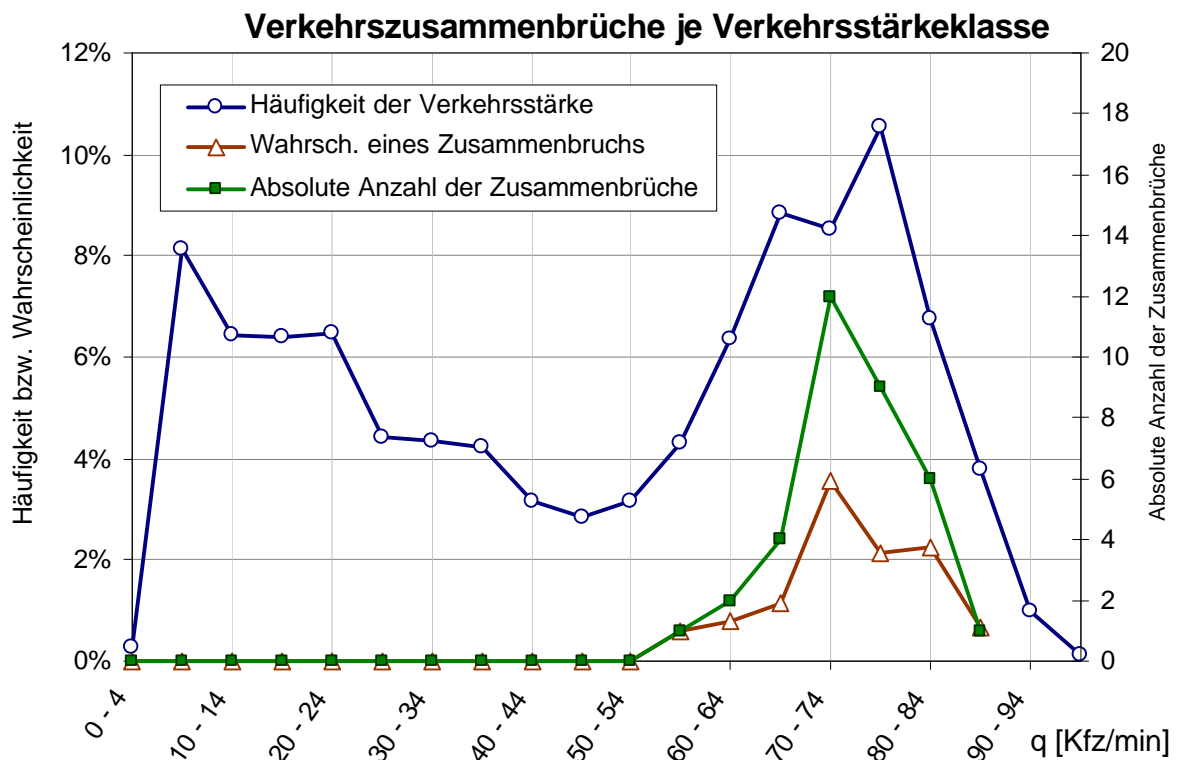


### 8.3.4 Berechnung von Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten

Jedem Verkehrszusammenbruch ist eine Verkehrsstärke  $q_1$  des Vorher-Zustands, also die Verkehrsstärke bei der der Zusammenbruch eintrat, zugeordnet. Diese Verkehrsstärken werden in Klassen zusammengefasst, wobei auf die in Kapitel 7.2 vorgenommene Klasseneinteilung zurückgegriffen wird. Daraus entsteht eine Angabe für die absolute Anzahl von Verkehrszusammenbrüchen je Verkehrsstärkeklasse.

Wie im vorigen Kapitel kurz beschrieben, wird die absolute Zahl von Zusammenbrüchen erst im Zusammenhang mit der Anzahl der aufgetretenen Intervalle mit dieser Verkehrsstärken aussagekräftig. Aus diesem Grund wird die Verteilung der Verkehrsstärken auf die Verkehrsstärkeklassen über den gesamten 14-Tages-Zeitraum berechnet. Schließlich wird für jede Verkehrsstärkeklasse die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs berechnet, in dem die Anzahl der Zusammenbrüche durch die Anzahl der Intervalle dividiert wird.

Das Ergebnis einer derartigen Auswertung ist in der folgenden Abbildung für den MQ 311a Nbg dargestellt:



**Abb. 8-12:** Verkehrszusammenbrüche in Abhängigkeit der Verkehrsstärkeklasse (Darstellung der Ergebnisse für den dreistreifigen MQ 311a der A9)

Bei der Häufigkeit der Verkehrsstärke (als Summenwert über die drei Fahrstreifen) zeigt sich eine zweigipfelige Verteilung, d.h. ein Maximum im Bereich niedriger Verkehrsstärken und ein Maximum im Bereich hoher Verkehrsstärken. Das Maximum im Bereich niedriger Verkehrsstärken resultiert aus der großen Anzahl von Nachtstunden mit geringer Verkehrsstärke. Das Maximum im Bereich hoher Verkehrsstärken entsteht durch die häufigen Zeiten mit hoher Verkehrsbelastung in der Vormittags- und Nachmittagsspitze, sowie durch hohe Verkehrsstärken im Freizeitverkehr an Wochenenden. Da die Übergänge zwischen schwachem und starkem Verkehr relativ kurz sind treten Intervalle mit mittlerer Verkehrsstärke selten auf (siehe z.B. die Tagesganglinie in Abb. 4-1, Seite 74).

Die absolute Anzahl der Verkehrszusammenbrüche spielt erst oberhalb einer Verkehrsstärke von 60 Kfz/min eine Rolle. Sie erreicht anschließend ein Maximum und fällt bei den höchsten Verkehrsstärken wieder ab. Das Abfallen dieser Kurve bei hohen Verkehrsstärken ist unter anderem auf das seltenere Vorkommen der hohen Verkehrsstärken zurückzuführen. Die Kurve der absoluten Anzahl der Verkehrszusammenbrüche hat allerdings nur eine geringe Aussagekraft.

Eine Betrachtung der Kurve der Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs zeigt ebenso erst ab ca. 60 Kfz/min ein Ansteigen, anschließend das Erreichen eines Maximalwerts und bei den höchsten Verkehrsstärken wieder ein Abfallen. Aufgrund der Normierung auf die Anzahl der Intervalle kann dieses Absinken nicht durch die zeitlich seltener vorkommenden höchsten Verkehrsstärken begründet sein. Als Erklärung kann in Frage kommen, dass der Verkehrsfluss bei den niedrigeren Verkehrsstärken unruhiger ist als im Bereich der höchsten bis maximalen Verkehrsstärke und somit ein Zusammenbruch eher eintritt. Dies korrespondiert mit der in Kapitel 5.2.1 festgestellten Selbstorganisation des Verkehrsflusses bei hohen Verkehrsbelastungen.

Für einen gewissen Bereich der Maximalverkehrsstärken kann aufgrund der Begrenztheit des Untersuchungszeitraums allerdings keine Aussage getroffen werden, da hier zu wenige Messwerte für eine Absicherung vorliegen. Als Grenze wurde festgelegt, dass innerhalb eines Intervalls mindestens 50 Messwerte vorliegen müssen, um die Angabe einer Zusammenbruchswahrscheinlichkeit zu rechtfertigen.

Der Wert für die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit ist eine anschauliche Größe. Der Wert von ca. 2% für die Verkehrsstärkeklasse von 80-84 Kfz/min für den MQ 311a bedeutet zum Beispiel: Tritt diese Verkehrsstärke (als Mittelwert über 5 Minuten) auf, so beträgt die Wahrscheinlichkeit 2%, dass anschließend ein Verkehrszusammenbruch gemäß den definierten Randbedingungen folgt.

## 8.4 Vergleich der Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten verschiedener Querschnitte

### 8.4.1 Einfluss der Verkehrsbelastung

Die Untersuchungen zur Kapazität (Kapitel 5) und zur Homogenität des Verkehrsflusses (Kapitel 7) haben gezeigt, dass die Verkehrsbelastung einen Einfluss auf die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit hat (wie bereits verwendet, bedeutet in diesem Zusammenhang der Begriff Verkehrsbelastung die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke während des 14-Tages-Untersuchungszeitraums).

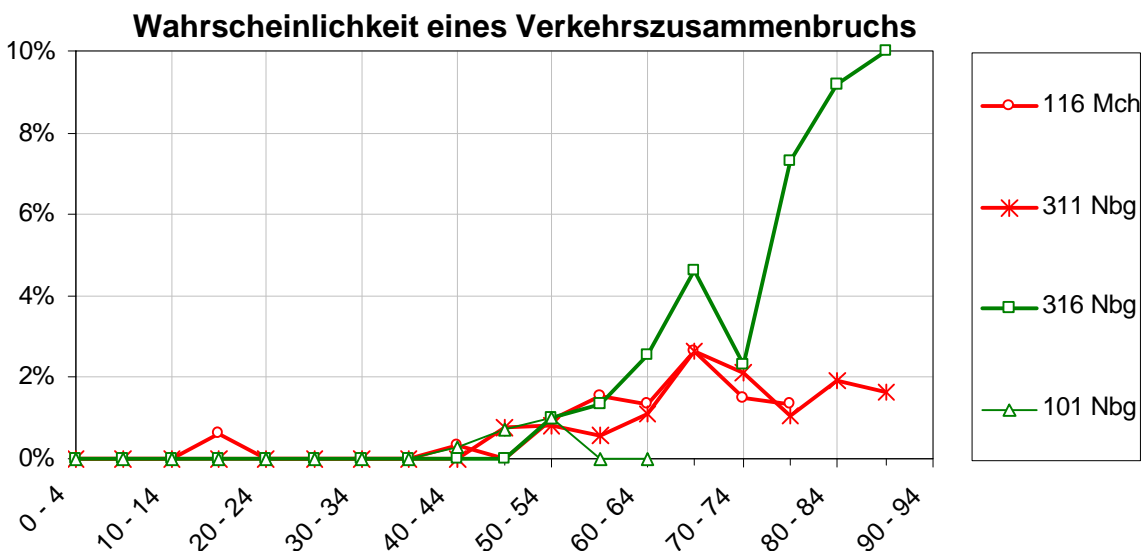
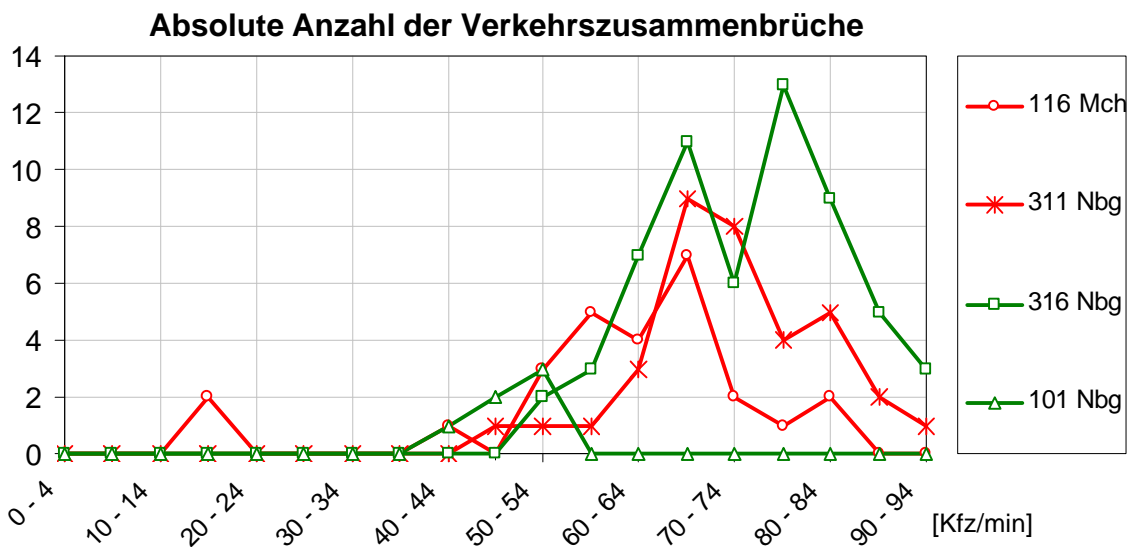
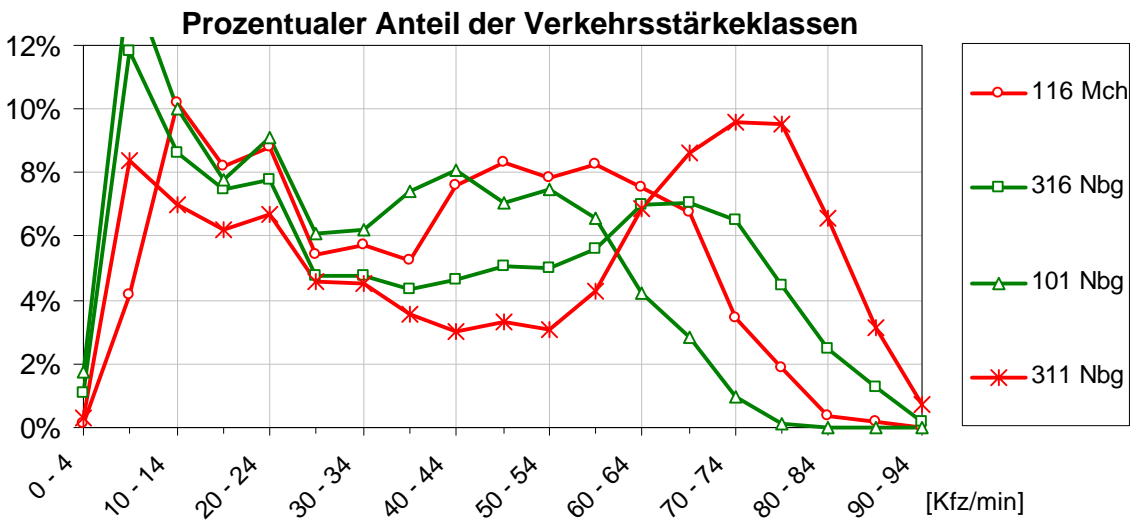
Im folgenden wird die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit an vier dreistreifigen, sehr unterschiedlichen Querschnitten der A9 angewandt ermittelt, um den Einfluss der Verkehrsbelastung zu quantifizieren. Diese vier Querschnitte bestehen aus

- einem verkehrlich gering belasteten Querschnitt, der beinahe keine Stauzustände aufweist: Ohne-SBA-Querschnitt MQ 101 mit 14-Tages-DTV = 46.100 Kfz/Tag
- zwei verkehrlich stark belasteten Querschnitten, die beide Stauzustände aufgrund von Verkehrsüberlastungen aufweisen:  
Mit-SBA-Querschnitt MQ 116 Mch mit 14-Tages-DTV = 57.500 Kfz/Tag  
Ohne-SBA-Querschnitt MQ 316 Nbg mit 14-Tages-DTV = 58.000 Kfz/Tag
- einem verkehrlich sehr stark belasteten Querschnitt, ebenfalls mit deutlichen Stauzuständen: Mit-SBA-Querschnitt MQ 311 Nbg mit 14-Tages-DTV = 69.500 Kfz/Tag

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den drei Diagrammen von Abb. 8-13 dargestellt.

Das obere Diagramm zeigt die Verteilung der Verkehrsstärken der vier Messquerschnitte. Der weniger belastete MQ 101 Nbg weist entsprechend der geringen Verkehrsbelastung kaum Intervalle mit hohen Verkehrsstärken auf. Der am stärksten belastete Querschnitt MQ 311 Nbg enthält zahlreiche Intervalle mit sehr hohen Verkehrsstärken. Ein Vergleich des MQ 116 mit dem MQ 316 zeigt, dass der MQ 316 Nbg bei gleicher Verkehrsbelastung ausgeprägtere Verkehrsspitzen besitzt.

Im mittleren Diagramm ist die absolute Anzahl von Verkehrszusammenbrüchen der vier Querschnitte dargestellt. Der gering belastete Querschnitt MQ 101 Nbg zeigt fast keine Verkehrszusammenbrüche. Die anderen drei Querschnitte zeigen einen Anstieg der Zusammenbrüche mit zunehmender Verkehrsstärke bis hin zu einem Maximum im Bereich hoher Verkehrsstärken, allerdings einen Rückgang der absoluten Anzahl der Zusammenbrüche im Bereich der maximalen Verkehrsstärke.



**Abb. 8-13: Vergleich von vier dreistreifigen Querschnitten der A9 mit verschiedener Verkehrsbelastung im Hinblick auf Verkehrsstärkeverteilung (Summenwert über die drei Fahrstreifen), absolute Anzahl bzw. Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs**

<b>Ohne SBA:</b>	<b>101 Nbg:</b> DTV 46.100 Kfz/d	<b>316 Nbg:</b> DTV 58.000 Kfz/d
<b>Mit SBA:</b>	<b>116 Mch:</b> DTV 57.500 Kfz/d	<b>311 Nbg:</b> DTV 69.500 Kfz/d

Im unteren Diagramm von Abb. 8-13 ist die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit, also die absolute Anzahl der Zusammenbrüche bezogen auf die Anzahl der Messwerte im jeweiligen Intervall der Verkehrsstärkeklasse, für die vier Querschnitte dargestellt. Gemäß der geringen Zahl der Zusammenbrüche des MQ 101 Nbg ist auch die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit sehr gering. Es ist davon auszugehen, dass an diesem Querschnitt keine Verkehrszusammenbrüche auftreten, die durch Verkehrsüberlastungen bedingt sind. Wie bei der Betrachtung der Kapazität (Kapitel 5.2.1) kann dieser Querschnitt aufgrund der fehlenden Überlastung keine Aussage zur Zusammenbruchswahrscheinlichkeit liefern.

Ein Vergleich der Werte für die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit der verkehrlich vergleichbar belasteten Querschnitte MQ 116 Mch und MQ 316 Nbg zeigt, dass der unbeeinflusste MQ 316 eine deutlich höhere Zusammenbruchswahrscheinlichkeit als der MQ 116 Mch aufweist (Abb. 8-13). Da bei der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit der Einfluss der unterschiedlichen Verteilung der Verkehrsstärken ausgefiltert ist, müssen streckencharakteristische Gründe die Ursache sein. Die Unterschiede der beiden Richtungsfahrbahnen der A9 wurden bereits analysiert (Kapitel 5.2.1) und sind als sehr gering anzusehen. Die Weg-, Umfeld- und Verkehrsbedingung der beiden Streckenabschnitte sind gut vergleichbar. Dies zeigt sich auch darin, dass die maximale Verkehrsstärke beinahe gleich ist.

Für die höhere Zusammenbruchswahrscheinlichkeit am MQ 316 Nbg können auch keine Besonderheiten des Verkehrsflusses der Grund sein, wie aus der Betrachtung der Ganglinien des gesamten Zeitraums geschlossen werden kann. Weiterhin zeigt eine Betrachtung der Lage im Netz (Lageplan im Anhang), dass für den MQ 316 Nbg eher günstigere Bedingungen für den Verkehrsfluss vorliegen als für den MQ 116 Mch, da er an der vom Ballungsraum wegführenden Richtungsfahrbahn der A9 liegt. Dies bedeutet, dass die Verkehrsstärke an jeder Anschlussstelle etwas abnimmt und somit weniger rückwärtige Störungen auf den Verkehrsfluss einwirken als an der Richtungsfahrbahn der A9 Richtung München, bei der bei jeder Anschlussstelle die Verkehrsstärke zunimmt.

Es zeigt sich, dass die Unterschiede in der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit durch eine Stabilisierungswirkung des Verkehrsflusses am MQ 116 durch die SBA bedingt sind. Die Betrachtung der Werte für den Mit-SBA-Querschnitt 311 Nbg bestätigt dies. Dieser auf der gleichen Richtungsfahrbahn wie der MQ 316 Nbg liegende Messquerschnitt weist trotz der sehr hohen Verkehrsbelastung eine geringe Zusammenbruchswahrscheinlichkeit auf, die mit der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit des MQ 116 Mch vergleichbar ist. Damit liegen deutliche Hinweise für eine Stabilisierungswirkung von SBA vor. In den folgenden Kapiteln wird dies weiter untersucht.

### 8.4.2 Vergleich Mit-SBA- und Ohne-SBA-Querschnitte der A9 und der A8 Ost

Im Rahmen des vorliegenden Datensatzes ist ein Vergleich von Mit-SBA- und Ohne-SBA-Querschnitten unter ähnlichen Weg-, Umfeld- und Verkehrsbedingungen nur an der A9 möglich (Kapitel 5.2.1). An dieser Strecke liegen Messwerte von 11 Mit-SBA-Querschnitten und 10 Ohne-SBA-Querschnitten vor. Einige dieser Querschnitte sind nicht verkehrlich überlastet und werden daher wie bei der Vorgehensweise der Kapazitätsbestimmung von den weiteren Betrachtungen aussortiert. Damit verbleibt für die Untersuchung der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit an der A9 folgende Datenbasis:

- 10 Querschnitte mit SBA: MQ 105, 113, 115, 116, 201, 207, 208 und 210 Richtung München sowie MQ 311 und 311a Richtung Nürnberg
- 3 Querschnitte ohne SBA: MQ 311c, 316, 316b Richtung Nürnberg

Die Mit-SBA-Querschnitte der A8 Ost Brunenthal – Bad Aibling werden ebenso untersucht. An dieser Strecke liegen Messwerte von 13 beeinflussten Querschnitten mit Verkehrsüberlastung vor. Die Vergleichbarkeit dieser Querschnitte mit den Ohne-SBA-Querschnitten der A9 muss allerdings kritischer gesehen werden.

Für alle Querschnitte werden gemäß der in Kapitel 8.3 beschriebenen Methodik die Verkehrszusammenbrüche detektiert und daraus die Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten berechnet. Es werden die Schwellwerte verwendet, die sich bei der Parameterstudie (Kapitel 8.3.2) als vorteilhaft erwiesen haben, um einen Phasenübergang vom stabilen in den instabilen Verkehr zu detektieren ( $v = 15$  km/h,  $v_1 = 75$  km/h und  $v_2 = 85$  km/h). Die Ergebnisse der Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten der einzelnen Querschnitte werden in der jeweiligen Verkehrsstärkeklasse mit einem gewichteten Mittelwert zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 8-1 im Vergleich.

Die Betrachtung aller drei Querschnitts-Gruppen von Tabelle 8-1 zeigt, dass bis zu einer Verkehrsstärke von ca. 60 Kfz/min die Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten in allen drei Gruppen gering sind. Oberhalb davon steigen die Werte für die beiden Mit-SBA-Gruppen auf maximal 2 %, bei der Ohne-SBA-Gruppe steigen sie deutlich stärker bis auf 10 % an. Damit wird deutlich, dass die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit des Verkehrsflusses bei den Ohne-SBA-Querschnitten einiges höher ist als bei den Mit-SBA-Querschnitten. Ergebnisse liegen nur bis zur Verkehrsstärkeklasse 85 – 89 Kfz/min vor, da für die Verkehrsstärkeklassen oberhalb zu wenige Messwerte für signifikante Aussagen vorliegen.

Verkehrsstärkeklasse	Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs		
	A9 München - Nürnberg		A8 Ost Brunnth.–Bad Aib.
	mit SBA	ohne SBA	mit SBA
Kfz/min			
0 - 4	0,0 %	0,0 %	0,0 %
5 - 9	0,0 %	0,0 %	0,0 %
10 - 14	0,0 %	0,0 %	0,0 %
15 - 19	0,1 %	0,2 %	0,1 %
20 - 24	0,1 %	0,0 %	0,1 %
25 - 29	0,0 %	0,0 %	0,1 %
30 - 34	0,1 %	0,0 %	0,2 %
35 - 39	0,3 %	0,0 %	0,3 %
40 - 44	0,2 %	0,0 %	0,3 %
45 - 49	0,3 %	0,2 %	0,7 %
50 - 54	0,6 %	1,1 %	0,5 %
55 - 59	0,9 %	1,0 %	0,7 %
60 - 64	1,0 %	1,9 %	0,8 %
65 - 69	1,3 %	2,9 %	1,3 %
70 - 74	1,7 %	1,7 %	1,5 %
75 - 79	1,7 %	4,8 %	1,6 %
80 - 84	2,1 %	9,2 %	3,5 %
85 - 89	1,2 %	10,0 %	1,4 %

**Tabelle 8-1: Vergleich der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit der Gruppe der Mit-SBA- und der Ohne-SBA-Querschnitte der A9 und der Gruppe der Mit-SBA-Querschnitte der A8 Ost**

Wie bereits in Kapitel 5.2.1 und im Kapitel 8.4.1 dargelegt, sind die für den Verkehrsfluss relevanten Weg-, Umfeld- und Verkehrsbedingungen insbesondere bei den beiden Querschnitts-Gruppen der A9 sehr ähnlich. Einzig die Betriebsweise unterscheidet sich insofern, als dass eine SBA vorhanden ist oder nicht.

Aus dieser Betrachtung von zahlreichen Querschnitten ergibt sich die Schlussfolgerung, dass der störungsfreiere Verkehrsfluss auf eine Stabilisierungswirkung von SBA zurückzuführen ist. SBA können also den Verkehrsfluss im Sinne einer Verschiebung des Phasenübergangspunkts in Richtung stabiler Verkehr beeinflussen.

Dadurch entsteht wegen des höheren Geschwindigkeitsniveaus im stabilen Verkehr ein Reisezeitgewinn für die Verkehrsteilnehmer. Dieser Nutzen wird in Kapitel 9.4.3 für typische Fälle durch Anwendung eines Bewertungsverfahrens monetarisiert.

## 8.5 Analyse der Wirkungsweise von Streckenbeeinflussungsanlagen

Die festgestellte Stabilisierungswirkung des Verkehrsflusses durch SBA wird im folgenden auf ihren Wirkungsmechanismus hin untersucht. Dazu wird der Verkehrsfluss zum Zeitpunkt des Entstehens der Verkehrszusammenbrüche näher betrachtet.

Grundsätzlich ist es möglich, dass es Auswirkungen von SBA auf das Fahrverhalten gibt, die mit einer Messung des Verkehrsablaufs weder durch eine makroskopische Betrachtung (z.B. die Kapazität) noch durch eine mikroskopische Betrachtung (z.B. von Folgezeitlücken) bestimmt werden können. Dies ist dann der Fall, wenn ein Verkehrsteilnehmer auf die Anzeigen einer SBA nicht mit einer Änderung der Fahrweise reagiert, sondern mit einer Erhöhung der Aufmerksamkeit. Damit verbunden könnte eine Erhöhung der Stabilität eines Verkehrsflusses sein. Diese Änderung der Eigenschaft eines Verkehrsflusses kann allerdings durch Messungen von außen nicht festgestellt werden.

Indizien für eine derartige Wirkungsweise von SBA gibt die Befragung von Verkehrsteilnehmern zur Wahrnehmbarkeit und Akzeptanz von Wechselverkehrszeichen an Autobahnen (FÄRBER UND FÄRBER 2000). Die Untersuchung zeigt, dass ein Großteil der Verkehrsteilnehmer (90 % der Befragten) die Anzeigen schnell erkennt, richtig interpretiert und auch als sinnvoll bewertet, um Unfälle und Staus zu verhindern. Allerdings setzt nur ca. ein Drittel der Befragten die Anzeigen in eine konkrete Reaktion um. Es ist daher anzunehmen, dass eine Vielzahl von Verkehrsteilnehmern sich zwar nicht strikt an die Anordnungen der Geschwindigkeitsbegrenzungen hält, aber eine erhöhte Aufmerksamkeit für kritische Situationen besitzt.

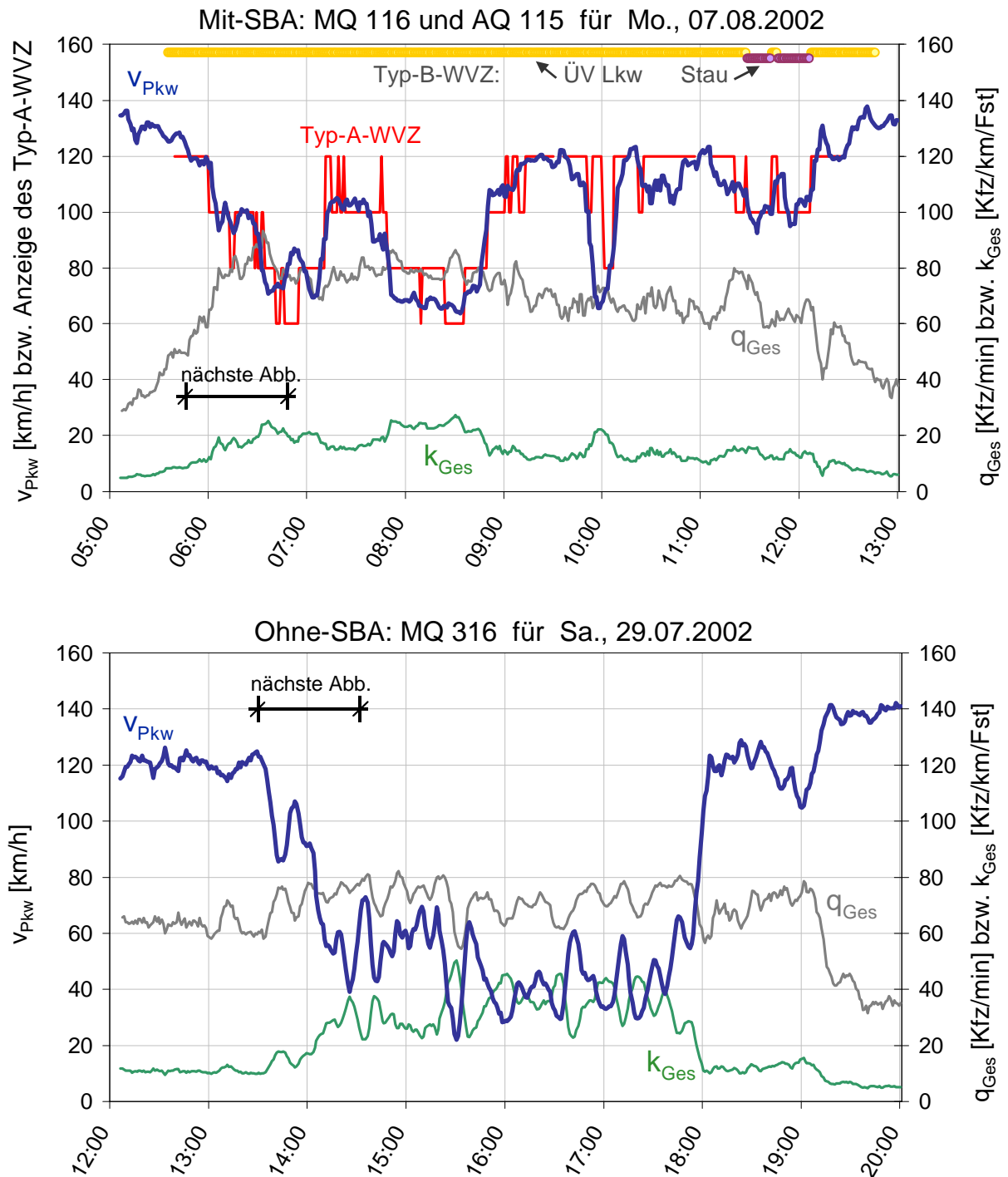
Diese Interpretation erklärt möglicherweise die festgestellten Stabilisierungseffekte. Im Rahmen dieser Untersuchung können diese Vermutungen aber nicht weiter bestätigt werden, da sie über eine Messung des Verkehrsablaufs nicht analysiert werden können.

### Vergleich zweier Querschnitte

Im folgenden wird der Verkehrsfluss zweier dreistreifiger Querschnitte, eines beeinflussten Querschnitts (MQ 116) und eines unbeeinflussten Querschnitts (MQ 316) miteinander verglichen. Dazu ist in Abb. 8-14 der Verkehrsfluss exemplarisch für einen ausgewählten 8-h-Zeitraum mit den Kenngrößen Geschwindigkeit, Verkehrsstärke und Verkehrsdichte im Gesamtquerschnitt dargestellt. In Abb. 8-15 erfolgt eine nähere Betrachtung, indem der Verkehrsfluss über einen 1-h-Zeitraum für den linken und den rechten Fahrstreifen dargestellt ist. Die ausgewählten Zeiträume stellen in exemplarischer Weise das verkehrsstärkebedingte Einbrechen des Geschwindigkeitsniveaus dar, wie sie an dem jeweiligen Querschnitt in dieser Form innerhalb des untersuchten 14-Tages-Zeitraum mehrmals auftreten.



## 8-h-Ganglinie zweier Querschnitte im Vergleich



**Abb. 8-14:** 8-h-Ganglinie des beeinflussten MQ 116 und des unbeeinflussten MQ 316 im Vergleich (dreistreifige Querschnitte)

Darstellung der Kenngrößen Geschwindigkeit, Verkehrsstärke und Verkehrsdichte als Mittelwerte über die Richtungsfahrbahn

## 1-h-Ganglinie zweier Querschnitte im Vergleich

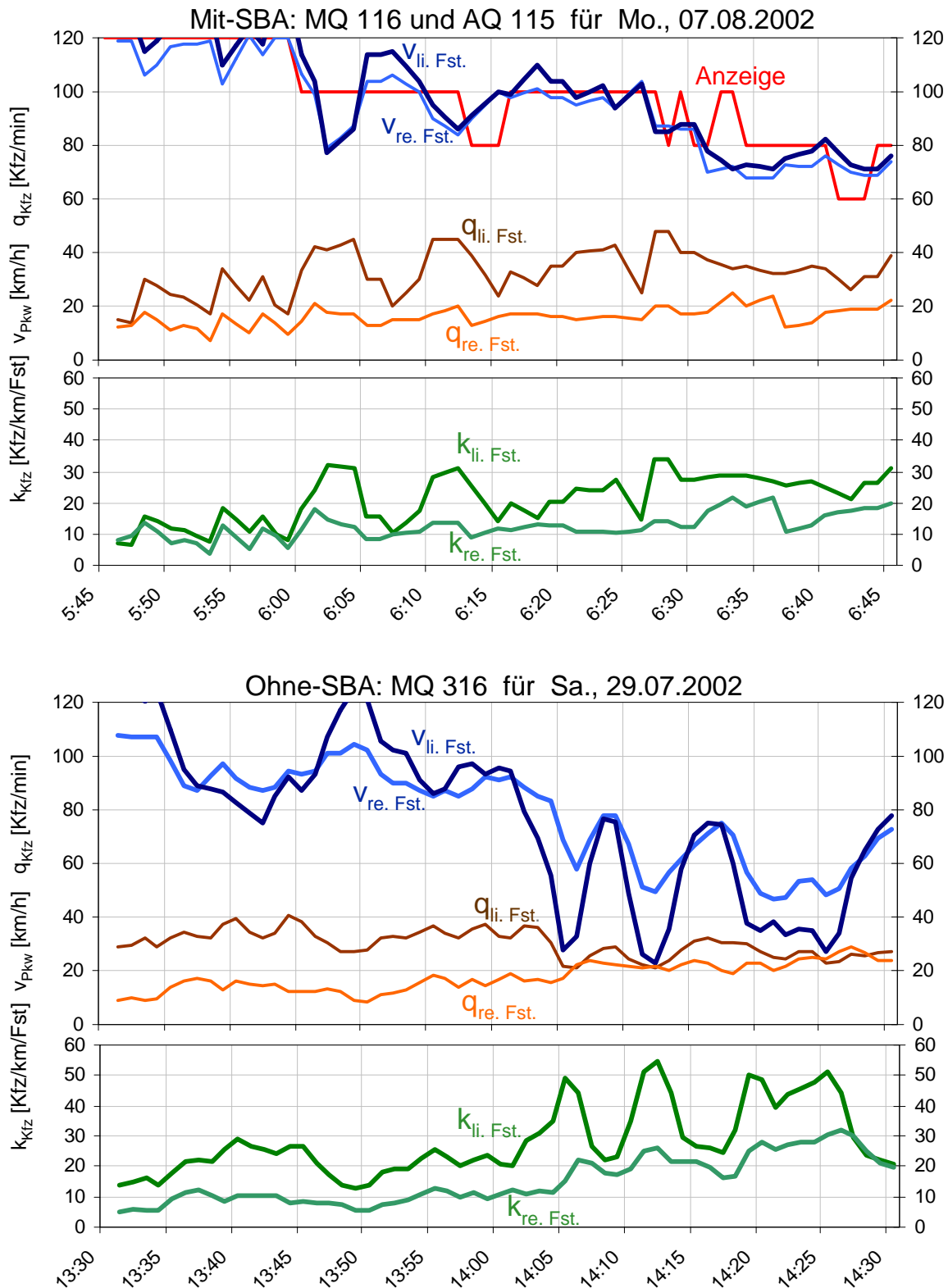


Abb. 8-15: 1-h-Ganglinie des beeinflussten MQ 116 und des unbeeinflussten MQ 316 im Vergleich (dreistreifige Querschnitte)

Darstellung der Kenngrößen für Geschwindigkeit, Verkehrsstärke und Verkehrsdichte für den linken und rechten Fahrstreifen im Vergleich

Bei der Betrachtung des Verkehrsgeschehens über den 8-h-Zeitraum in Abb. 8-14 erkennt man, wie bei beiden Querschnitten die Verkehrsstärke ansteigt und schließlich zu einem Einbruch des Geschwindigkeitsniveaus führt. Dieser Einbruch geschieht jedoch in unterschiedlicher Weise: Während am unbeeinflussten MQ 316 ein Verkehrszusammenbruch erfolgt (der auch die Kriterien gemäß der Untersuchungsmethodik erfüllt), geschieht am beeinflussten Querschnitt MQ 116 nur ein Absinken der Geschwindigkeit auf ein tiefer liegendes Niveau.

Betrachtet man die Anzeige des Typ-A-WVZ - also der angezeigten Geschwindigkeitsbegrenzung - am beeinflussten Querschnitt, so zeigt sich, wie der Verkehrsfluss in unterschiedlicher Weise beeinflusst wird. Insgesamt ist die Reaktion der SBA auf Veränderungen im Verkehrsgeschehen innerhalb dieses Zeitraums überwiegend gut, wenn auch zu manchen Zeitpunkten zu verzögert geschaltet wird und damit unpassende Schaltzustände entstehen. Dies bewirkt, dass zeitweise die Geschwindigkeitsbeschränkung höher und zeitweise niedriger liegt als die durchschnittliche Geschwindigkeit. Aufgrund der hohen Verkehrsstärke ist über den gesamten Zeitraum ein LKW-Überholverbot geschaltet.

Die detailliertere Darstellung von Abb. 8-15 ermöglicht eine nähere Betrachtung des Verkehrsflusses für einen 1-h-Zeitraum. Hier sind die Kenngrößen des Verkehrsflusses vergleichend für den linken und rechten Fahrstreifen dargestellt. Man erkennt, wie zu Beginn des Zeitraums beim stabilen Verkehrsfluss an beiden Querschnitten ähnliche Werte für die Verkehrsstärke ( $q_{\text{linkerFst.}} = 35-40$  Kfz/min und  $q_{\text{rechterFst.}} = 15-20$  Kfz/min) und die Verkehrsdichte ( $k_{\text{linkerFst.}} = 20-25$  Kfz/km/Fst. und  $k_{\text{rechterFst.}} = 10-15$  Kfz/km/Fst) auftreten. Bei beiden Kenngrößen liegen die Werte des linken Fahrstreifens deutlich über dem rechten Fahrstreifen. Auf dem linken Fahrstreifen fahren also deutlich mehr Fahrzeuge als auf dem rechten Fahrstreifen. Wie in Kapitel 7.3 ausführlich dargelegt, stellt dies den Normalfall dar.

Die Betrachtung der Geschwindigkeit zeigt, dass beide Querschnitte auf einem vergleichbaren Niveau von 90 – 110 km/h liegen. Während jedoch am MQ 116 ein sehr ähnliches Geschwindigkeitsverhalten von linkem und rechtem Fahrstreifen zu erkennen ist, ist am MQ 316 ein starkes Schwanken der Geschwindigkeit auf dem linken Fahrstreifen zu beobachten. Dies führt zeitweise zu einem Umkehren der normalen Geschwindigkeitsverhältnisse, wenn die Geschwindigkeit des linken Fahrstreifens unter die des rechten Fahrstreifens sinkt.

Der Ablauf des Geschwindigkeitseinbruchs ist an den Querschnitten sehr unterschiedlich. Am MQ 116 fällt die Geschwindigkeit langsam ab und stabilisiert sich in einem Bereich von 70 – 80 km/h. Das Verhältnis von Geschwindigkeit, Verkehrsstärke und Verkehrsdichte zwischen linkem und rechtem Fahrstreifen verbleibt wie im stabilen Verkehrsflusses, d.h. Geschwindigkeit, Verkehrsstärke und Verkehrsdichte bleiben auf dem linken Fahrstreifen höher als auf dem rechten Fahrstreifen.

Am MQ 316 stellt sich der Geschwindigkeitseinbruch anders dar. Um 14 Uhr ergibt sich ein schneller Abfall der Geschwindigkeit, der vom linken Fahrstreifen ausgeht. Am rechten Fahrstreifen tritt dieser Abfall verzögert und weniger stark auf. Zu diesem Zeitpunkt wächst die Verkehrsdichte auf dem linken Fahrstreifen enorm an. Für eine kurze Zeit herrscht an dem Querschnitt ein Zustand, der entgegengesetzt zu den gewöhnlichen Verhältnissen ist, da die Geschwindigkeit auf dem linken Fahrstreifen niedriger ist als die auf dem rechten Fahrstreifen. Zeitweise fließt auf dem rechten Fahrstreifen der Verkehr noch, während er auf dem linken Fahrstreifen fast zum Erliegen gekommen ist. Dieser Vorgang wiederholt sich mehrere Male, es herrscht über mehrere Stunden ein „Stop-and-go“-Verkehr vor. Der Verkehrsfluss des MQ 316 ist im Vergleich zum Verkehrsfluss am MQ 116 für die Verkehrsteilnehmer unangenehmer und mit Reisezeitverlusten behaftet.

Aus diesen Beobachtungen lässt sich ein Wirkungsmechanismus der SBA ableiten: Verkehrszusammenbrüche (und damit die „Staus aus dem Nichts“) gehen vom linken Fahrstreifen aus und entstehen aus den großen Schwankungen von Geschwindigkeit und Verkehrsdichte. Die SBA reduziert diese Schwankungen und führt zu einem gleichmäßigeren Verkehrsfluss. Dadurch können Verkehrszusammenbrüche, die aufgrund einer Verkehrsüberlastung auftreten, verhindert werden, womit Reisezeitgewinne, Sicherheitsgewinne sowie ein angenehmer Verkehrsablauf entstehen. Anstelle eines Verkehrszusammenbruchs tritt ein Absinken der Geschwindigkeit auf ein niedrigeres Niveau ein. Der Verkehrsfluss geht in einen Zustand mit sehr gleichmäßigem Verkehrsfluss über. Dieser Verkehrszustand wird im folgenden untersucht.

An dieser Stelle sei nochmals betont, dass diese Aussagen aus der Betrachtung eines Einzelereignisses je Querschnitt gewonnen wurden. Da sich im Verlauf des 14-Tage-Zeitraums das jeweilig beschriebene Verhalten des Verkehrsflusses in ähnlicher Weise mehrfach wiederholt (aus Platzgründen nicht dargestellt), handelt es sich bei dem betrachteten Ausschnitt um ein repräsentatives Verhalten.

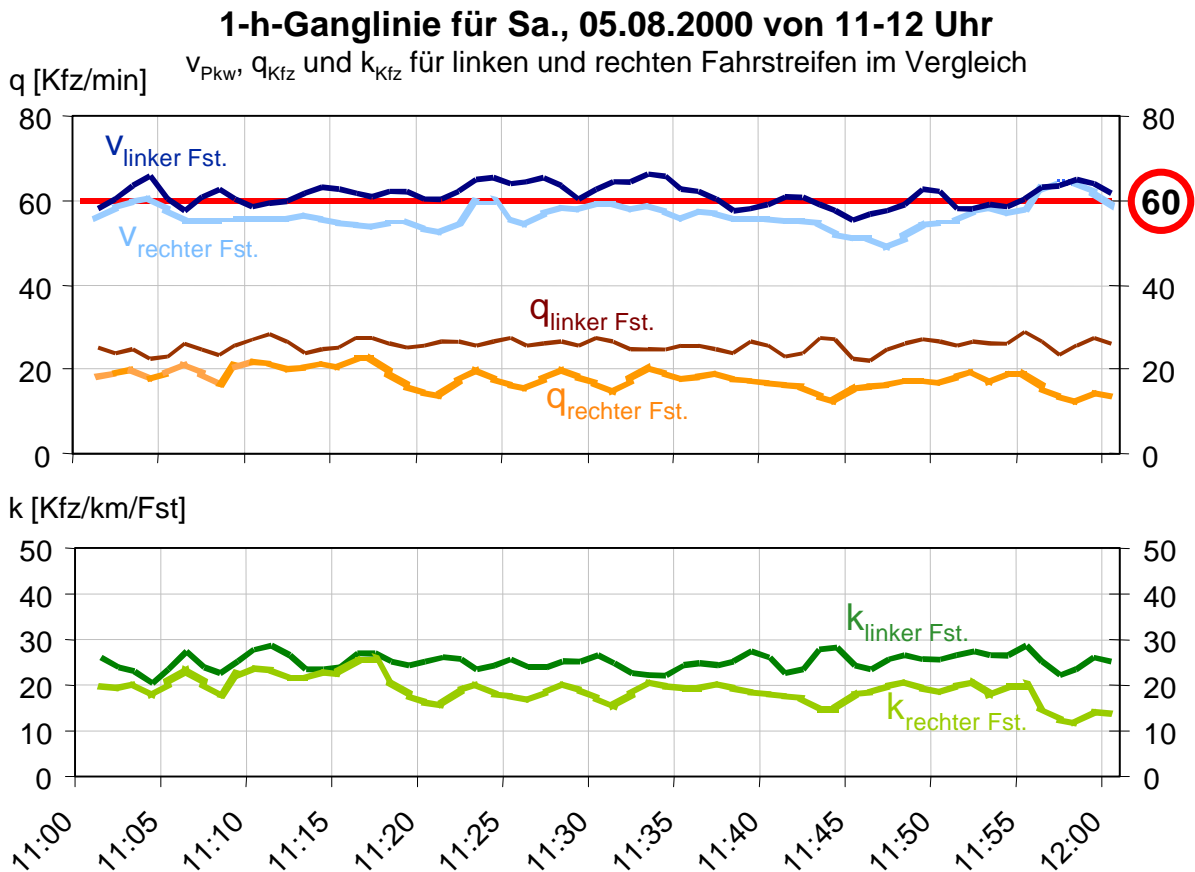
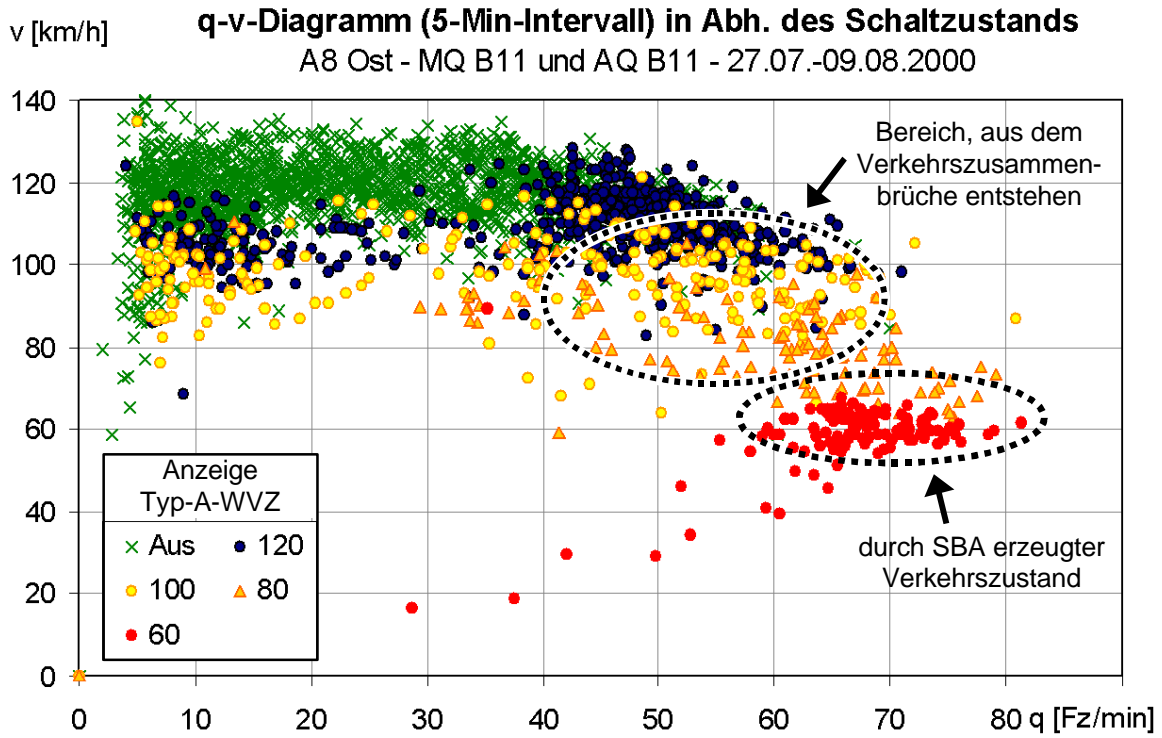
### **Besondere Zustandsform des Verkehrsflusses an der beeinflussten Strecke**

Eine nähere Betrachtung gilt dem Verkehrszustand, der nach einem verkehrsstärkebedingten Einbruch der Geschwindigkeit an Mit-SBA-Querschnitten beobachtet werden konnte. Dieser Verkehrszustand besteht aus einem zeitlich und räumlich außerordentlich gleichmäßigen Verkehrsfluss auf einem Geschwindigkeitsniveau von 60 – 70 km/h. Er konnte im Rahmen der vorliegenden Datenbasis an einigen Mit-SBA-Querschnitten jeweils an mehreren Tagen und für bis zu vier Stunden in Folge beobachtet werden.

In Abb. 8-16 ist ein typisches Beispiel anhand der Messdaten des MQ B11 der A8 Ost ein besonders deutliches Auftreten dieses Verkehrsflusses dargestellt. Man erkennt im q-v-Diagramm, wie sich im Bereich sehr hoher Verkehrsstärken bei einer angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkung von 60 km/h eine Punktwolke im Bereich 60 – 70 km/h ausbildet. Wird ein Ausschnitt aus diesem Zeitraum, der diese Punktwolke darstellt, als Ganglinie für linken und rechten Fahrstreifen dargestellt, so zeigt sich ein zeitlich und räumlich ungewöhnlich gleichmäßiger Verkehrsablauf.

Es dürfte sich dabei um eine besondere Form des in früheren Untersuchungen beschriebenen „synchronen Verkehrs“ handeln. Dies ist ein Verkehrszustand, der zwischen dem stabilen und instabilen Bereich auftritt und als Besonderheit einen sehr gleichförmigen Verkehrsablauf auf allen Fahrstreifen aufweist. Das Auftreten dieses Verkehrszustands wurde in früheren Untersuchungen an unbeeinflussten Querschnitten allerdings nur für kurze Zeiträume von wenigen Minuten festgestellt. Für den synchronen Verkehr gibt es keine allgemeingültige Definition, dementsprechend wird er in verschiedenen Untersuchungen anders abgegrenzt. Bisher gibt es auch keine quantitative, sondern nur qualitative Angaben zur Abgrenzung. Dieser Verkehrszustand ist Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten (Kapitel 8.2.1).

Der hier vorliegende Verkehrszustand entspricht in vielen Aspekten dem von KERNER (1997) beschriebenen „homogenen Zustand synchronisierten Verkehrs“. Dieser wird von KERNER wie folgt definiert: „Beinahe sowohl stationärer als auch homogener Zustand, in dem die durchschnittliche Geschwindigkeit und die Verkehrsdichte in einem relativ langen Zeitintervall von 2-5 Minuten konstant sind“. Der hier vorliegende gleichförmige Verkehrszustand tritt allerdings über einen Zeitraum von bis zu vier Stunden auf, also wesentlich länger als an den bislang betrachteten Querschnitten ohne SBA.



**Abb. 8-16:** Durch die SBA erzeugter besonderer Verkehrszustand des synchronen Verkehrs (MQ B11, A8 Ost)

**Oben:** alle Messwerte des 14-Tages-Zeitraums als q-v-Diagramm

**Mitte und unten:** 1-h-Ganglinie über einen ausgewählten Zeitraum mit Darstellung von Geschwindigkeit, Verkehrsstärke und Verkehrsdichte auf dem linken und rechten Fahrstreifen

Eine Untersuchung der Verkehrszusammenbrüche zeigt, dass der durch die SBA bewirkte synchrone Verkehrszustand außerordentlich stabil ist. Die Untersuchung wurde mit abgesenkten Schwellwerten durchgeführt, da das Geschwindigkeitsniveau des synchronen Verkehrs unterhalb des für die bisherige Untersuchung mit 75 km/h definierten Schwellwerts liegt. Im synchronen Verkehr tritt kein einziger Verkehrszusammenbruch auf, diese entstehen ausschließlich aus einem Bereich deutlich oberhalb des synchronen Verkehrs (Abb. 8-16).

Bemerkenswert ist, dass der synchrone Verkehr sowohl an der Strecke der A9 als auch an der Strecke A8 Ost besonders deutlich an den beiden Wochentagen Samstag und Sonntag auftritt. Dies liegt nicht an Unterschieden in der Verkehrsstärke, da die Verkehrsstärke des werktäglichen Berufsverkehrs und des Freizeitverkehrs am Wochenende gleich hoch sind. Die Erklärung für dieses Phänomen ist vermutlich, dass der Freizeitverkehr eine höhere Befolgung der Geschwindigkeitsanzeigen als der Berufsverkehr aufweist. Der Grund könnte zum einen darin liegen, dass der Freizeitverkehr weniger im Zeitdruck ist und somit Geschwindigkeitsbeschränkungen eher akzeptiert. Zum anderen könnte der ortsunkundige Verkehrsteilnehmer eine Geschwindigkeitsüberwachung eher befürchten als der ortskundige Verkehrsteilnehmer und befolgt daher die Beschränkungen besser.

### **Zusammenfassung der Wirkungen von SBA**

Die Zufälligkeiten im Verkehrsfluss bzw. eventuell nicht bekannte Sondereinflüsse erfordern eine gewisse Vorsicht bei der ursächlichen Zuordnung von Beobachtungen auf die Wirkungsweise von SBA. Es ist immer zu bedenken, dass Verkehrszustand und Schaltzustand in einem Wechselspiel zwischen Verkehrsteilnehmer und SBA entstehen. D.h. der Verkehrszustand ist nicht unbedingt so, weil der Schaltzustand ihn erzeugt hat, sondern es kann sich ebenso umgekehrt verhalten, dass der Verkehrszustand einen bestimmten Schaltzustand ergibt.

Die beschriebenen Unterschiede bei den Verkehrszusammenbrüchen und bei dem Phänomen des gleichmäßigen Verkehrsflusses, die sich zwischen beeinflussten und unbeeinflussten Querschnitten darstellten, wurden durch Betrachtung zahlreicher Querschnitte zahlreicher Tage auf die Wirkung der SBA zurückgeführt. Der beschriebene besonders lange synchrone Verkehrsfluss zeigt sich mehrmals an verschiedenen Mit-SBA-Querschnitten, aber in keinem Fall an einem Ohne-SBA-Querschnitt. Ebenso zeigt sich der unruhige „Stop-and-go“-Verkehr mit einer Umkehrung der normalen Verkehrsverhältnisse nur an den Ohne-SBA-Querschnitten und nicht an den Mit-SBA-Querschnitten.

Aus diesen Erkenntnissen werden folgende zwei Wirkungen von SBA abgeleitet:

- SBA bewirken eine homogenere Geschwindigkeitsverteilung im stabilen Verkehrsablauf. Die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Fahrstreifen sowie die zeitlichen Geschwindigkeitsschwankungen sind geringer. Damit nimmt die Anzahl von Störungen im Verkehrsfluss und die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs ab. Der Verkehrsfluss wird stabiler.
- Beim Auftreten eines verkehrsstärkebedingten Einbruchs der Geschwindigkeit können SBA bewirken, dass der Verkehrsfluss nicht in einen „Stop-and-go“-Verkehr umschlägt, sondern in einen gleichmäßigen (synchronen) Verkehrsfluss mit einem Geschwindigkeitsniveau von 60 – 70 km/h und einer sehr hohen Verkehrsstärke übergeht. Dieser erzeugte Verkehrszustand ist sehr stabil und kann über lange Zeit andauern.

Eine Bewertung dieser Wirkungen erfolgt in Kapitel 9.4.3.

## **8.6 Optimierung der Stabilisierungswirkung von SBA**

Die in den vorigen Kapitel festgestellte Stabilisierung des Verkehrsflusses durch SBA wurde schon früher vermutet, aber bei der Konzeption von SBA nicht explizit als Wirkungsrichtung betrachtet. Es ist daher zu vermuten, dass bei den bestehenden Steuerstrategien ein Optimierungspotenzial vorhanden ist.

Die Betrachtung des Verkehrsflusses an zahlreichen Querschnitten jeweils über den 14-Tages-Zeitraum zeigt, dass in häufigen Fällen die Geschwindigkeitsanzeige der SBA eher dem Verkehrsfluss folgt, als ihn aktiv beeinflusst. Dies ist dann immer der Fall, wenn die SBA eine höhere Geschwindigkeit anzeigt, als tatsächlich gefahren wird. Unpassende Schaltungen können aus nicht optimalen Schwellwerten bei den Steuerungsalgorithmen entstehen (HOOPS et. al. 2000, HUBER 2002) und aus der generellen Schwierigkeit, durch die punktförmige Erfassung von Messwerten rechtzeitig Verkehrsstörungen zu erkennen. Schaltet die SBA die Geschwindigkeitsbeschränkungen und Warnhinweise zu spät, wird das Stabilisierungspotenzial nicht vollständig ausgenutzt.

Die Stabilisierungswirkung von SBA könnte durch frühzeitigere („präventive“) Schaltungen erhöht werden. Eine optimale Lösung wären Steuerungsalgorithmen, die Instabilitäten im Verkehrsfluss rechtzeitig erkennen und sofort das geeignete Schaltprogramm zu deren Verhinderung erlassen. Dies ist Gegenstand der aktuellen Forschung (STEINHOFF et. al. 2002, HOOPS et. al. 2000). Die Unterscheidung von bedeutenden Schwankungen von den zufälligen Schwankungen im Verkehrsfluss ist bislang aber noch nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit gelöst.



Ein Vorschlag für eine Verbesserung der Stabilisierungswirkung von SBA ist daher, die Schwierigkeiten, die bei der rechtzeitigen automatischen Schaltung von Geschwindigkeitsbeschränkung bestehen, in gewissen Fällen durch festzeitgesteuerte Algorithmen zu umgehen. Diese könnte als Ergänzung zu der verkehrsabhängigen Steuerung an Streckenabschnitten mit zyklischen Spitzen in der Verkehrsstärke geschaltet werden. Die zyklischen Spitzen könnten basierend auf früheren Erfahrungen (z.B. regelmäßig auftretender Berufsverkehr) vorhergesagt werden.

Im Unterschied zum momentan implementierten Harmonisierungsprogramm, das auf das Erreichen bestimmter Schwellwerte bei Verkehrsstärke und Geschwindigkeit basiert, kann ein Programm, das auf einer Festzeitsteuerung basiert, schon vor Erreichen der kritischen Verkehrsstärke aktiviert werden und seine Wirkung auf den Verkehrsfluss ausüben. Der angemessene Schaltzustand kann also schon bei oder vor Auftreten der Verkehrsspitze angezeigt werden, und nicht erst mit gewisser Zeitverzögerung. Es könnte sogar versucht werden, vor Erreichen der Verkehrsspitze durch restriktive Geschwindigkeitsbeschränkungen den Verkehrsfluss in den synchronen Verkehrszustand zu „zwingen“. Dies sollte allerdings erst dann geschehen, wenn eine hohe Verkehrsstärke und ein bereits niedrigeres Geschwindigkeitsniveau vorliegt, da sonst die generelle Akzeptanz der SBA bei den Verkehrsteilnehmern negativ beeinflusst wird. Aus diesem Grund wäre eine Kombination von Festzeitsteuerung und verkehrsabhängiger Steuerung besonders vielversprechend.

### **Beispiel für eine Kombination aus Festzeitsteuerung und Schwellwertsteuerung**

Am Beispiel des morgendlichen Berufsverkehrs wird ein Vorschlag für eine Erweiterung der konventionellen Steuerung dargestellt. Die Analyse des 14-Tages-Zeitraums des MQ 116 zeigt, dass an jedem Tag von Montag und Freitag ab 6 Uhr bereits ein starker Verkehr und ab 6:30 Uhr die maximale Verkehrsstärke auftritt. Die maximale Verkehrsstärke dauert in jedem Fall bis 9 Uhr, eine starke Verkehrsstärke bis 10 Uhr an.

Diese Regelmäßigkeiten im Verkehrsverhalten könnten genutzt werden, um festzeitgesteuert von 6:00 – 10:00 Uhr maximal T120 und von 6:30 Uhr bis 9:00 Uhr maximal T100 anzuzeigen. Zusätzlich würde das verkehrsabhängige Automatikprogramm zur Harmonisierung und Stauwarnung gemäß den Vorgaben der MARZ überlagert. Durch die Kombination würde erreicht, dass die restriktiven Anzeigen T60 und T80 nur dann, wenn sie notwendig sind, angezeigt werden. Tritt die Verkehrsstärkespitze später ein oder weniger stark als üblich, so wäre eine Anzeige von T120 oder T100 kein zu starker Eingriff in den Verkehrsfluss, da zu den Zeiträumen der Festzeitsteuerung auf jeden Fall eine sehr hohe Verkehrsstärke mit einem Geschwindigkeitsniveau deutlich unterhalb des freien Verkehrs vorherrscht.

Ein Schaltprogramm mit einer Kombination aus Festzeitsteuerung und Schwellwertsteuerung könnte somit folgendermaßen aussehen:

Bedingung	Anzeige		
	Typ-A-WVZ	Typ-B-WVZ	Typ-C-WVZ
Uhrzeit: 6 – 10 Uhr ↓	120	Z 101 StVO (Gefahr)	„Staugefahr“
Uhrzeit: 6:30 – 9 Uhr ↓	100	Z 101 StVO (Gefahr)	„Staugefahr“
Schwellwerte für q und v ↓	80	Z 124 StVO (Stau)	„Stau“
Schwellwerte für q und v gemäß MARZ	60	Z 124 StVO (Stau)	„Stau“

Hinweis: Die angegebenen WVZ werden gemäß der in der RWVZ vorgegebenen Reihenfolge wenn notwendig durch andere WVZ höherer Priorität ersetzt

**Tabelle 8-2: Vorschlag für kombinierte Festzeitsteuerung / Schwellwertsteuerung zur Stabilisierung des Verkehrsflusses**

Die angegebenen Uhrzeiten müssen an die örtlichen Gegebenheiten sehr genau angepasst werden. Hierbei besteht ebenso wie bei der Festlegung von Schwellwerten für die verkehrsabhängige Steuerung die Notwendigkeit, einen Kompromiss zwischen möglichst guter Wirkung und möglichst hoher Akzeptanz zu finden.

Eine Festzeitsteuerung von SBA ist selbstverständlich nur als Zusatz zu den vorhandenen verkehrsabhängigen Steuerungsstrategien denkbar, da andernfalls die Sinnhaftigkeit der Anzeigen für den Verkehrsteilnehmer entscheidend abnehmen würde. Noch mehr als die verkehrsabhängige Steuerung ist die Wirkung der Festzeitsteuerung als präventive Maßnahme zur Vermeidung von Stausituationen von der Akzeptanz der Verkehrsteilnehmer abhängig. Es ist anzunehmen, dass eine entsprechende Akzeptanz durch Aufklärungsarbeit bei den Verkehrsteilnehmern zu erreichen ist, da im morgendlichen Berufsverkehr wenig ortsunkundige Verkehrsteilnehmer unterwegs sind. Diese Aufklärungsarbeit könnte z.B. mittels Schildern neben der Autobahn („Stauvermeidung – machen Sie mit!“) erfolgen (weitere Vorschläge für Informationskampagnen siehe FÄRBER und FÄRBER 2000). Zusätzlich sollte die Geschwindigkeitsüberwachung intensiviert werden. Mittels einer begleitenden Untersuchung sollte eine Erfolgskontrolle im Hinblick auf die stauvermindernde Wirkung des Programms und die Akzeptanz der Verkehrsteilnehmer vorgenommen werden. Zeigen sich Erfolge in der Anwendung könnte auf die Implementierung evtl. störungsanfälliger Algorithmen zur Erkennung von Instabilitäten im Verkehr verzichtet werden, zumindest solange, bis eine ausgereifte Technologie zur Erfassung und Erkennung derselben zur Verfügung steht.

## **9 MONETÄRE BEWERTUNG DER WIRKUNGEN AUF DEN VERKEHRSABLAUF**

### **9.1 Auswahl einer geeigneten Bewertungsmethodik**

Die in Kapitel 5 bis 8 festgestellten Wirkungen von SBA müssen für den Eingang in eine Kosten-Nutzen-Analyse monetär bewertet werden.

Eine monetäre Bewertung der Wirkungen muss folgende zwei Schritte beinhalten:

- Überführung der ermittelten Wirkungen in monetäre Einheiten, d.h. Bewertung der nicht-monetären Größen mit Kostensätzen (z.B. Monetarisierung von Reisezeiten)
- Abstraktion der am Untersuchungsfall ermittelten Wirkungen auf andere Anwendungsfälle, d.h. Verallgemeinerung der Erkenntnisse

Zur Bewertung wird auf ein bestehendes, allgemein anerkanntes Bewertungsverfahren zurückgegriffen, um auf die darin getroffenen zahlreichen Annahmen zur volkswirtschaftlichen Bewertung aufzubauen. Bewertungsverfahren stellen das Ergebnis von jahrzehntelangen Diskussionen über die geeignete Erfassung und Bewertung der Auswirkungen von Infrastrukturmaßnahmen dar. Die lange Entstehungsgeschichte und die wiederholten Aktualisierungen spiegeln die Wertewandel wieder, die bei der Bewertung von Straßenbaumaßnahmen auftreten.

Zur Beurteilung von Investitionen im Straßenbau kommen in Deutschland das Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung (BVWP 1992) und die Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS 1997) zum Einsatz. Die beiden Verfahren weisen viele Gemeinsamkeiten auf. Unterschiede bestehen darin, dass das BVWP-Verfahren für die Grobabschätzung der Wirkungen für ein ganzes Netz und das EWS-Verfahren für eine detailliertere Berechnung der Wirkungen einer Einzelmaßnahme geeignet ist. Aufgrund dieser detaillierteren Abbildung der Wirkungen wird im Rahmen dieser Forschungsarbeit das Bewertungsverfahren der EWS verwendet.

#### **Bewertungsmethodik der EWS**

Die EWS berücksichtigt zahlreiche, insbesondere monetarisierbare Auswirkungen von Straßenbauprojekten auf Mensch und Natur. Die positiven und negativen Auswirkungen werden erfasst und zur Beurteilung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses in monetäre Einheiten überführt (z.B. Bewertung von Zeitkosten oder Umweltkosten). Um das Bewertungsverfahren für die praktische Anwendung einfach zu halten, muss dabei ein Kompromiss aus hohem Detaillierungsgrad und Vereinfachung getroffen werden. Dies geschieht, indem in stark vereinfachter und generalisierter Form ein bestimmter Katalog von Wirkungsrichtungen betrachtet wird (Kapitel 9.3.1).

Die EWS unterscheidet folgende zwei Bereiche:

- Kostenkomponenten

Kosten der Baulast einer Maßnahme, unterschieden in Investitionskosten und laufende Kosten (Betriebskosten).

- Nutzenkomponenten

Nutzenkomponenten beinhalten alle Maßnahmenwirkungen, die nicht unter die obigen Punkte „Baulast“ und „Betriebskosten“ fallen. Sie können positiv (als Gewinn) und negativ (als Verlust) auftreten. Das EWS-Bewertungsschema betrachtet die Auswirkungen für die Verkehrsteilnehmer (Betriebs- und Zeitkosten) sowie für die Allgemeinheit (Unfälle und Umweltwirkungen).

Die Kosten- und Nutzenkomponenten werden nicht absolut, sondern als Differenz zwischen Planungsfall (Realisierung der Maßnahme) und Vergleichsfall (keine Realisierung der Maßnahme) ermittelt. Dies vereinfacht die Erfassung der Komponenten erheblich und stellt sicher, dass nur die Wirkung der betrachteten Maßnahme bewertet wird.

Zur Ermittlung der Kosten- und Nutzenkomponenten gibt die EWS ein *Mengengerüst* vor. Dies bedeutet, dass die Wirkungen von Maßnahmen nach einheitlichen Kriterien ermittelt werden. Hierzu werden Vorgaben gemacht, von denen im Einzelfall bei Bedarf abgewichen werden darf, wenn genauere Kenntnisse vorliegen. Die ermittelten Mengen werden anschließend unter Verwendung des *Wertegerüsts* bewertet. Dabei handelt es sich um Umrechnungsfaktoren, die die ermittelten Größen in monetäre Einheiten überführen. Mengen- und Wertegerüst sind getrennt, um den Bewertungsvorgang transparent zu halten.

Die Trennung in Mengen- und Wertegerüst wird im folgenden insofern genutzt, als bei einigen Fragestellungen die Mengen mit einer eigenen, im speziellen Fall genaueren, Methodik ermittelt werden. Bestimmte Wirkungen können überhaupt nur mit einer angepassten Methodik ermittelt werden. Die anschließende Bewertung erfolgt mit den Angaben aus dem Wertegerüst der EWS.

## 9.2 Abbildung der Wirkungen mit dem Bewertungsschema der EWS

### Grundzüge des Bewertungsschemas

Aufgabe der EWS ist es, den Verkehrsablauf an einer Strecke in seinen Grundzügen zu erfassen und darauf aufbauend die Wirkungen zu ermitteln. Dazu werden die wesentlichen Weg- und Verkehrsbedingungen betrachtet. Die Umfeldbedingungen werden nicht explizit betrachtet, sie gehen über die q-v-Funktionen ein.

Die folgende Abbildung stellt die grundlegenden drei Schritte des Bewertungsverfahrens dar:

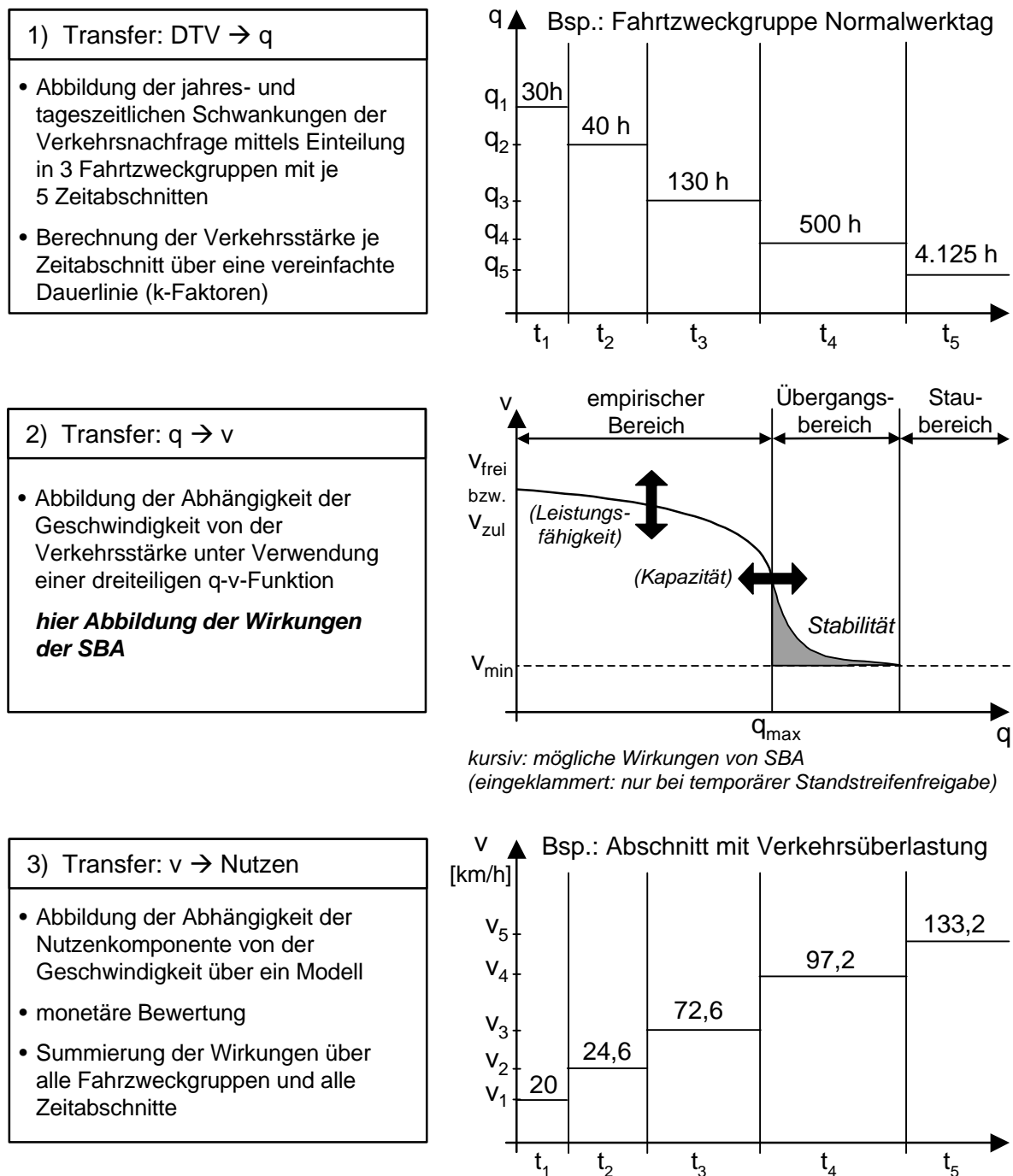


Abb. 9-1: Vereinfachte Darstellung der Bewertungsmethodik der EWS

Im ersten Schritt werden die saisonalen und tageszeitlichen Veränderungen der Verkehrsnachfrage abgebildet, indem der Jahreszeitraum in drei Fahrtzweckgruppen (Normalwerkzeuge, Urlaubswerkzeuge, Sonn- und Feiertage) mit je fünf Zeitabschnitten eingeteilt wird. Die gemessene oder prognostizierte Jahresverkehrsstärke (DTV) wird dann über die sogenannten *k-Faktoren* in die stündliche Verkehrsstärke des jeweiligen Zeitabschnitts umgerechnet. Die *k-Faktoren* wurden aus umfangreichen Messungen von Dauerzählstellen gewonnen.

Im zweiten Schritt wird den Verkehrsstärken der Zeitabschnitte jeweils eine Geschwindigkeit zugewiesen. Die EWS verwendet hierzu ein dreiteiliges Modell für die *q-v-Funktion* mit den Bereichen „Empirie“, „Übergang“ und „Stau“. Der Bereich „Empirie“ deckt alle Verkehrsstärken bis zur maximalen Verkehrsstärke ab, ist also gültig für den stabilen Verkehrsablauf. Anschließend folgt der Bereich „Übergang“, der den instabilen Verkehrsfluss abbildet, der sich bei Überschreiten der maximalen Verkehrsstärke durch die Verkehrsnachfrage einstellt. Der Bereich „Stau“ gilt für alle Verkehrsstärken oberhalb einer bestimmten Verkehrsstärke. Er bildet einen Stop-and-Go-Verkehr ab, bei dem die Geschwindigkeit mit pauschal 20 km/h angesetzt wird. Die Geschwindigkeiten werden für Personenverkehr und Güterverkehr getrennt ermittelt und anschließend verknüpft.

Im dritten Schritt erfolgt die Berechnung der Wirkungen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für den jeweiligen Streckenabschnitt für die Nutzenkomponenten (Kapitel 9.3).

### **Abbildung der Wirkungen von SBA**

In Abb. 9-1 ist dargestellt, wie die Auswirkungen von SBA im Hinblick auf Kapazität, Leistungsfähigkeit und Stabilität in das Bewertungsschema Eingang finden können. Wie bereits in Kapitel 7 erwähnt, finden die festgestellten Wirkungen bei der Harmonisierung des Verkehrsflusses keinen Eingang. Sie stellen keinen Nutzen an sich dar, sondern fließen indirekt über Veränderungen in anderen Bereichen ein.

Die Untersuchungen zur Kapazität (Kapitel 5) ergaben keine Hinweise, dass sich die Kapazität einer Strecke durch die Einrichtung einer SBA ändert. Die von früheren, teilweise lang zurückliegenden Untersuchungen berichteten geringen Steigerungen der Kapazität sind nicht genügend abgesichert, um generell eine Erhöhung der Kapazität durch SBA begründen zu können. Daher wird von keiner Auswirkung von SBA auf die Kapazität ausgegangen. Dies gilt nicht für SBA mit temporärer Standstreifenfreigabe. Die vorliegenden eigenen Untersuchungen zum Verkehrsablauf (Kapitel 5.5) sowie Erkenntnisse früherer Untersuchungen (MATTHEIS 2001; LEMKE und MORITZ 2001) zeigen, dass hiermit eine deutliche Steigerung der Kapazität erzielbar ist. Dies wird bei der Bewertung berücksichtigt.

Die Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit (Kapitel 6) ergaben keine Hinweise, dass SBA die Leistungsfähigkeit einer Strecke erhöhen. Einzelne frühere Untersuchungen lassen eine geringe Steigerung der Leistungsfähigkeit vermuten, allerdings sind auch diese Ergebnisse nicht ausreichend abgesichert. Daher wird im Sinne einer vorsichtigen Schätzung keine Steigerung der Leistungsfähigkeit durch SBA angenommen. Dies gilt nicht, wenn man eine Strecke mit SBA und eine Strecke mit statischer Geschwindigkeitsbegrenzung vergleicht. In diesem Fall tritt an der SBA-Strecke in den Zeiträumen des freien Verkehrsflusses ein höheres Geschwindigkeitsniveau und damit eine Reisezeitersparnis der Verkehrsteilnehmer auf. Diese Wirkung wird in die Bewertung aufgenommen.

Durch eine Untersuchung der Verkehrszusammenbrüche wurde festgestellt, dass SBA eine Stabilisierung des Verkehrsflusses bewirken (Kapitel 8). Damit können Vermutungen von früheren Untersuchungen bestätigt werden. Die entstehende Reduktion der Stauzustände wird in das Bewertungsschema aufgenommen. Da die Stabilität des Verkehrsflusses im ursprünglichen Bewertungsschema der EWS nicht enthalten ist, wird zur Ermittlung des Nutzens die Bewertungsmethodik angepasst.

### **9.3 Qualitative Analyse des Einflusses der SBA auf die einzelnen Nutzenkomponenten**

#### **9.3.1 Vorbemerkung**

Das Bewertungsschema der EWS enthält folgende Nutzenkomponenten:

- Betriebskosten
- Fahrzeiten
- Unfallgeschehen
- Lärmbelastung
- Luftschadstoffe
- Klimabelastung
- Trennwirkung von Straßen
- Flächenverfügbarkeit in bebauten Gebieten

Die Nutzenkomponenten „Trennwirkung“ und „Flächenverfügbarkeit“ können ohne nähere Analyse in der folgenden Betrachtung weggelassen werden, da die beiden Nutzenkomponenten in der EWS-Bewertung nur bei Innerorts-Straßen eine Rolle spielen.

Alle anderen Nutzenkomponenten können potenziell Änderungen durch die Installation einer SBA erfahren, da sie vom Geschwindigkeitsniveau bzw. von dem Auftreten von Stauzuständen abhängen. Bei der Nutzenkomponente „Unfallgeschehen“ werden die Ergebnisse der umfassenden früheren Untersuchungen verwendet.

Die einzelnen Nutzenkomponenten werden entsprechend ihrer jeweiligen Charakteristik unterschiedlich berechnet. Ebenso werden in verschiedenem Maße Anforderungen an die Genauigkeit der Eingangsdaten gestellt. Dies spiegelt sich in der Unterscheidung des Fahrzeugkollektivs wider. Während bei der Lärmberechnung nur

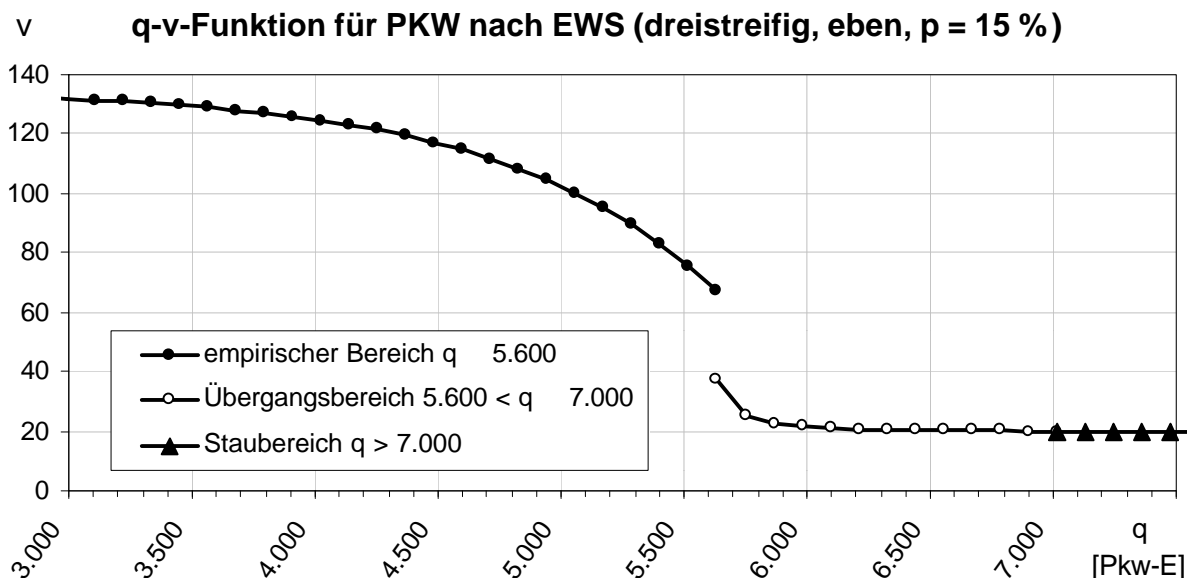
zwischen Pkw und Lkw unterschieden wird, schlüsselt die EWS für die Berechnung der Betriebskosten, Schadstoffemissionen und Klimabelastung die Fahrzeuggruppen detailliert auf.

Im folgenden wird der Zusammenhang zwischen Nutzen und Geschwindigkeit exemplarisch durch Betrachtung der Fahrzeuggruppe „Pkw mit Ottomotor“ qualitativ betrachtet (die anderen Fahrzeuggruppen unterscheiden sich im qualitativen Verlauf nicht entscheidend). Für den Nutzen, den eine SBA im Vergleich zu einer statischen Geschwindigkeitsbegrenzung im freien Verkehrsablauf erbringt, spielen die auf 80 km/h (bzw. Busse 100 km/h) Höchstgeschwindigkeit begrenzten Fahrzeuggruppen auch bei der quantitativen Analyse keine Rolle.

### Die q-v-Funktion der EWS

Da alle betrachteten Nutzenkomponenten von der Geschwindigkeit abhängen, wird die q-v-Funktion der EWS kurz näher betrachtet. Wie bereits in Kapitel 9.2 erwähnt, ist die q-v-Funktion in die drei Bereiche „Empirie“, „Übergang“ und „Stau“ unterteilt. Als Verkehrsstärke q werden Pkw-Einheiten verwendet, die sich über die Umrechnung 1 Lkw = 2 Pkw ergeben.

In Abb. 9-2 ist die q-v-Funktion exemplarisch für den typischen Fall einer dreistreifigen Richtungsfahrbahn dargestellt.



Empirie :  $V_p = 143,1 - 8 * \exp(0,235 * s) - 0,1 * \exp(1,157 * 10^{-3} * (Q_p + 2 * Q_{GV}))$

Übergang :  $V_p = \coth\left(\left[\left(Q_p + 2 * Q_{GV}\right) - 5.580,44\right] * 10^{-3}\right) + 18,88$

Stau :  $V_p = 20$

**Abb. 9-2:** q-v-Funktion nach EWS für den Fall: Fahrzeuggruppe Pkw, dreistreifige Richtungsfahrbahn außerhalb bebauter Gebiete, p = 15 %, keine Längsneigung



Abb. 9-2 zeigt, wie im Bereich des stabilen Verkehrsflusses („Empirie“) die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Verkehrsstärke exponentiell bis zu einer Geschwindigkeit von ca. 70 km/h bei der Kapazitätsgrenze absinkt. Der sich anschließende Übergangsbereich beschreibt den instabilen Verkehr, der sich nach dem Überschreiten der Kapazitätsgrenze einstellt. Die q-v-Funktion dieses Bereichs ist eine fiktive Kurve, da Verkehrsstärken oberhalb der Kapazität selbstverständlich nicht vorkommen. Oberhalb einer weiteren bestimmten Verkehrsstärke wird der Stauzustand angenommen, für den pauschal die Geschwindigkeit  $v=20$  km/h gesetzt wird.

Dieses dreiteilige Modell für die q-v-Beziehung bildet das in der Realität plötzlich absinkende Geschwindigkeitsniveau bei Überschreiten der Kapazitätsgrenze ab. Diese Unstetigkeit birgt allerdings die Gefahr in sich, dass beim Bewertungsvorgang eine Wirkung überproportional verändert werden kann.

### 9.3.2 Auswirkungen von SBA auf Betriebskosten, Luftschadstoffe und Klimabelastung

Diese drei Nutzenkomponenten werden gemeinsam betrachtet, da sie in der EWS mit dem gleichen Wirkungsmodell berechnet werden. Dieses Wirkungsmodell besteht in der Berechnung eines von der Geschwindigkeit und vom Verkehrszustand abhängigen Emissionsfaktors. Der Verkehrszustand wird unterschieden in den „normalen Fahrgeschwindigkeitsbereich“ mit  $v > 20$  km/h und die „Stausituation“ mit  $v = 20$  km/h.

Die Modellformel zu Berechnung der Emissionsfaktoren und des Kraftstoffverbrauchs berücksichtigt das quadratische Anwachsen des Luftwiderstands in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und die Abhängigkeit der Faktoren vom Kehrwert der Geschwindigkeit, da bei Stillstand ( $v = 0$  km/h) theoretisch die Schadstoffemissionen und der Kraftstoffverbrauch auf die Strecke bezogen unendlich hoch sein müssen. Für die Stausituation mit  $v = 20$  km/h sind Fixwerte angegeben, die zu verwenden sind, wenn sie höher als der Wert der Modellformel liegen. Bei der Berechnung der Betriebskosten wird zum Kraftstoffverbrauchsfaktor ein geschwindigkeitsunabhängiger Betriebskosten-Grundwert addiert.

Eine Analyse der qualitativen Abhängigkeit der Emissionen der **Luftschadstoffe** von der Geschwindigkeit zeigt bei den meisten Schadstoffen einen annähernd gleichen Verlauf insofern, als dass bei mittleren Geschwindigkeiten von 60 – 100 km/h ein Minimum der Emissionen auftritt (bei Partikel- und Kohlenwasserstoffemissionen von schweren Nutzfahrzeugen liegt das Minimum bei niedrigeren Geschwindigkeiten, ebenso bei Stickoxiden von Pkw). Bei hohen Geschwindigkeiten nehmen die Schadstoffemissionen vor allem bei Kohlenmonoxid und Stickstoffdioxid deutlich zu, ebenso wie bei den sehr niedrigen Geschwindigkeiten des Stop-and-Go-Verkehrs.

Bei den **Betriebskosten** zeigt sich wegen des hohen Fixkostenanteils und der geringen Abhängigkeit des Kraftstoffverbrauchs von der Geschwindigkeit insgesamt eine sehr geringe Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Das Minimum der Betriebskosten befindet sich in einem Bereich von 60 bis 90 km/h. Bei hohen Geschwindigkeiten ( $v > 120$  km/h) und vor allem im Stop-and-Go-Verkehr tritt eine geringe Erhöhung der Betriebskosten auf. Diese Aussage gilt ebenso für die Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Emission von der Geschwindigkeit, da CO<sub>2</sub>-Emission und Kraftstoffverbrauch proportional zueinander sind.

### **Qualitative Auswirkungen von SBA**

Die ermittelten Wirkungen von SBA ergeben in den drei Nutzenkomponenten Betriebskosten, Luftschadstoffe und Klimabelastung unterschiedliche Effekte. Der Ersatz einer statischen Geschwindigkeitsbegrenzung von T100 oder T120 durch eine SBA bewirkt durch die Erhöhung des Geschwindigkeitsniveaus im freien Verkehr prinzipiell eine Erhöhung der volkswirtschaftlichen Kosten bei allen drei Nutzenkomponenten. Die Stabilisierungswirkung und die Kapazitätserhöhung bei Standstreifenfreigabe führt zu einer Reduktion der Zeiten des Stop-and-Go-Verkehrs und somit bei allen drei Nutzenkomponenten zu einer Reduktion der volkswirtschaftlichen Kosten.

Eine Analyse der qualitativen Verläufe und die Ergebnisse der quantitativen Untersuchung im Rahmen des Forschungsauftrags (SSP-CONSULT 2001) zeigen jedoch, dass die Änderungen der Nutzenkomponenten bezüglich der Umweltbelastung eine wesentlich geringere Rolle spielen als die Nutzenkomponente der Reisezeitverkürzung. Hierbei ist kritisch zu hinterfragen, wie sich die Kostensätze für die Umweltwirkungen im Verhältnis zu den Kostensätzen für die Reisezeiten darstellen.

Weiterhin ist davon auszugehen, dass die Schadstoffemissionen des Verkehrs in Zukunft durch die Verschärfung der Abgasgrenzwerte eine geringere Rolle spielen werden. Die verkehrsbedingten Emissionen nahmen in den letzten Jahren deutlich ab, und es wird prognostiziert, dass sie weiter zurückgehen werden (SHELL-STUDIE 2001). Die EWS enthält einen Faktor, der die abnehmende Schadstoffemission zukünftiger Fahrzeugflotten berücksichtigt. Das Umweltbundesamt sieht mit der Einführung zukünftiger Grenzwerte (EURO 4 - Standard ab 2005) die Luftqualitätsziele für die Verkehrsemissionen als erreicht an (UMWELTBUNDESAMT 1999). Allerdings bedarf es noch eines sehr langen Zeitraums, bis nur noch diese Fahrzeuge auf den Straßen fahren. Im Rahmen dieser Untersuchungen werden wegen der eher geringen Bedeutung die Auswirkungen auf Luftschadstoffe, Betriebskosten und Klimabelastung im folgenden nicht näher quantifiziert.

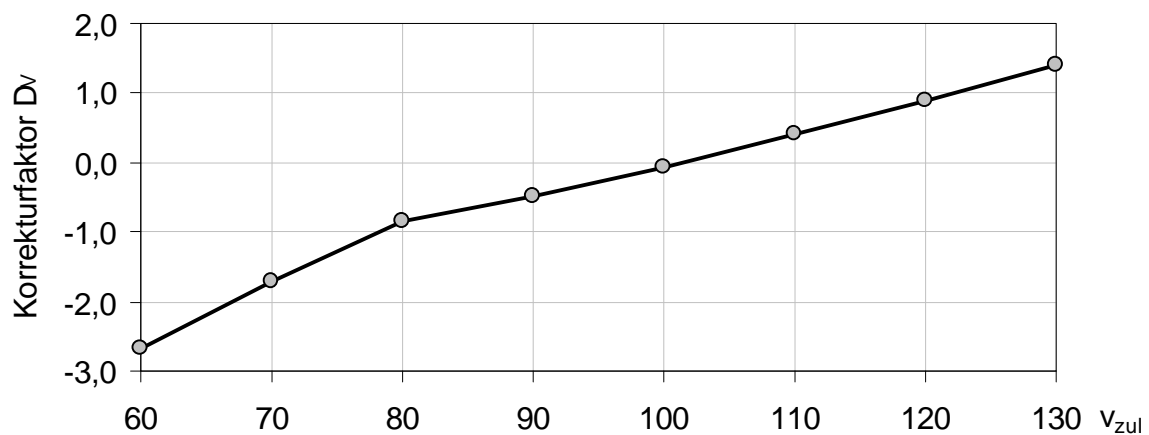
### 9.3.3 Auswirkungen von SBA auf die Lärmbelastung

Die Lärmbelastung wird im EWS-Bewertungsschema mit einem Verfahren analog zu der „Richtlinie für den Lärmschutz an Straßen“ (RLS-90) als Mittelungspegel für den Schalldruck berechnet. Dieser Mittelungspegel wird über die Anzahl der betroffenen Einwohner zu Lärm-Einwohner-Gleichwerten umgerechnet und monetarisiert. Die Auswirkung einer Maßnahme wird nur dann berücksichtigt, wenn die Lärmbelastung eines bewohnten Gebiets einen bestimmten Wert, den Zielpegel, überschreitet.

In die Berechnung des Mittelungspegels fließen alle Aspekte des Verkehrsgeschehens ein, die für die Lärmemission relevant sind, wie z.B. Geschwindigkeit, Lkw-Anteil, Straßenoberfläche, Längsneigung der Straße sowie örtliche Gegebenheiten der Schallausbreitung. Bei der Betrachtung der Wirkung einer SBA ist nur das Geschwindigkeitsniveau von Interesse. Dazu ist in der folgenden Abbildung der Verlauf des Korrekturfaktors  $D_v$  in Abhängigkeit der Geschwindigkeit dargestellt. Da der Korrekturfaktor über Addition in den Mittelungspegel eingeht, ist dies gleichzeitig die Aussage über den Verlauf des Mittelungspegels und damit für die Lärmbelastung.

#### Abhängigkeit der Lärmbelastung von der Geschwindigkeit

(Betrachtung des Korrekturfaktors für zul. Höchstgeschwindigkeiten, die von 100 km/h abweichen, Lkw-Anteil = 15 %)



**Abb. 9-3:** Abhängigkeit des Korrekturfaktors  $D_v$  von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (Lkw-Anteil = 15 %)

Mit wachsender Geschwindigkeit steigt die Lärmbelastung stetig. Dies ist eine Folge der zunehmenden Motor-, Roll- und vor allem Windgeräusche. Der Anstieg verlangsamt sich oberhalb einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h, da oberhalb dieses Wertes keine Erhöhung der Lkw-Geschwindigkeiten mehr auftritt.

Befindet sich eine Autobahn weit genug entfernt oder genügend abgeschirmt von bewohntem Gebiet, liegt die Lärmbelastung unter dem Zielpegel und die Lärmsituation spielt bei der Bewertung keine Rolle. Ist dies nicht der Fall, so ist bei der Be-

trachtung der Wirkungen von SBA zwischen der Staureduktion und der Geschwindigkeitserhöhung im freien Verkehr zu unterscheiden.

Die Reduktion von Stauzeiten könnte prinzipiell einen negativen Nutzen darstellen, da mit der Erhöhung der Geschwindigkeit auch die Lärmbelastung steigt. Dies kann allerdings mit der Lärmberechnung nach EWS nicht angemessen berücksichtigt werden, da die Lärmemission bei niedrigen Geschwindigkeiten ( $v < 30$  km/h) mit dem Modell der RLS-90 nicht berechnet werden kann. Außerdem ist zu vermuten, dass der ungleichmäßigere Verkehrsfluss im Stop-and-Go-Verkehr trotz der niedrigen Geschwindigkeit durch die Anfahrvorgänge nicht zu einer Senkung der Lärmemission führt.

Anders stellen sich die Verhältnisse bei einer Erhöhung der Geschwindigkeit im Vergleich zu einer statischen Geschwindigkeitsbegrenzung durch SBA dar. Im fiktiven Beispiel mit 15% Lkw-Anteil tritt eine Erhöhung der Lärmemission um ca. 1,5 dB(A) bei einer Höchstgeschwindigkeit von T130 gegenüber T100 und von 0,5 dB(A) bei T130 gegenüber T120 auf. Die geringen, isoliert betrachtet nicht wahrnehmbaren Veränderungen, können in einem Gesamtkonzept zur Lärmreduktion eine Rolle spielen. Dies kann sich so darstellen, dass eine aus Lärmschutzgründen erlassene statische Geschwindigkeitsbeschränkung bei der Installation einer SBA als maximal anzuzeigende Höchstgeschwindigkeit aufgenommen werden muss. Umgekehrt können die Möglichkeiten einer SBA zu einer gezielten Lärmreduktion und zur Verhinderung der Überschreitung von Immissionsgrenzwerten eingesetzt werden (TIEFENTHALER und BRUNNER 2000; Kapitel 2.2). Hierbei tritt ein positiver Nutzen der Maßnahme auf, der aufgrund der speziellen Situation im Einzelfall untersucht werden muss. Wegen der speziellen Abhängigkeit von der örtlichen Situation wird die Nutzenkomponente „Lärmbelastung“ im folgenden nicht weiter betrachtet.

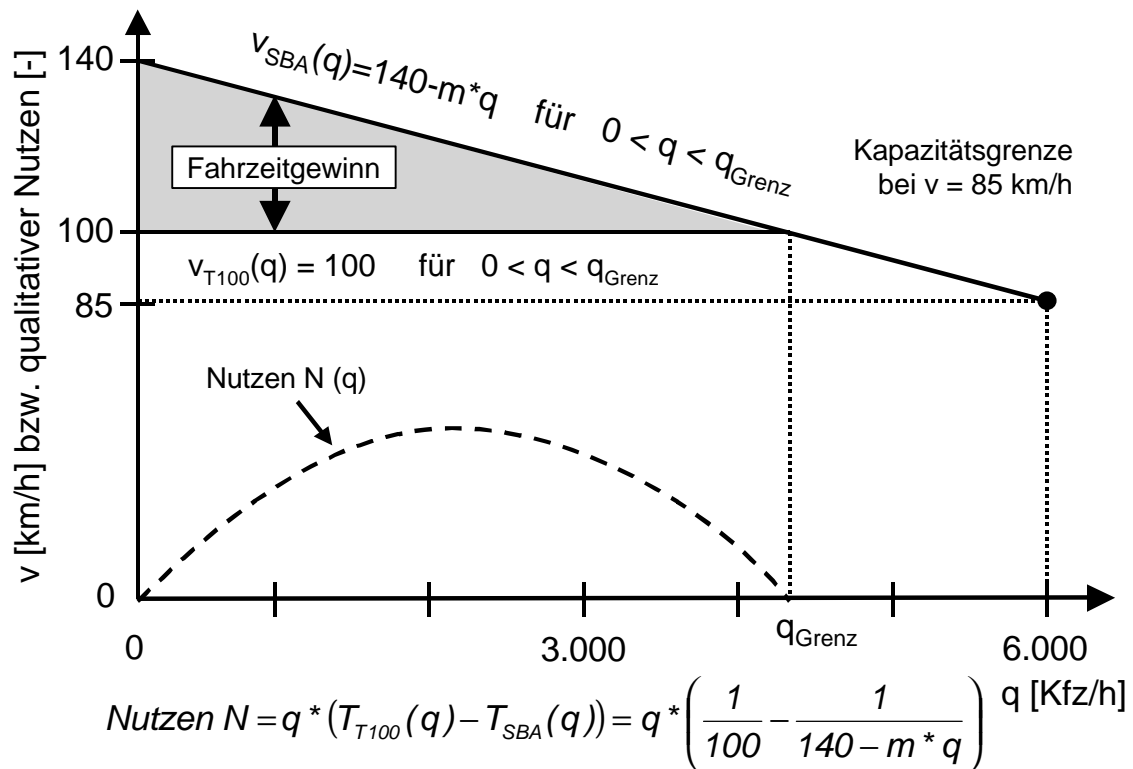
#### **9.3.4 Auswirkungen von SBA auf die Fahrzeiten**

Die Nutzenkomponente Fahrzeiten betrachtet den Zeitbedarf der Verkehrsteilnehmer für das Zurücklegen der betrachteten Strecke und rechnet diesen mittels Zeitkostensätze in die Fahrzeitkosten um. Der Zusammenhang zwischen Fahrzeit und Geschwindigkeit ist umgekehrt proportional, wobei für die Geschwindigkeitsbestimmung in die Fahrzeuggruppen Pkw und Güterverkehr (mit  $v_{\max} = 80$  km/h) unterschieden wird. Mit zunehmender Geschwindigkeit nehmen die Fahrzeiten stetig ab, was zu einer Reduktion der Fahrzeitkosten und damit zu einem positiven Nutzen führt. Geschwindigkeitssteigerungen des Verkehrsflusses oberhalb von 80 km/h führen nur noch im Bereich der Pkw zu einem Nutzen.

Wird durch den Stabilisierungseffekt von SBA ein Verkehrszusammenbruch vom stabilen in den instabilen Zustand verhindert, so entstehen für die Verkehrsteilneh-

mer große Fahrzeitgewinne. Von den Fahrzeitgewinnen profitieren eine große Anzahl von Verkehrsteilnehmern, da sie in Zeiten mit hoher Verkehrsstärke auftreten. Der Nutzen wird quantitativ in Kapitel 9.4.3 bewertet. Ebenso entsteht ein großer Nutzen bei der temporären Standstreifenfreigabe, da dies die Kapazität einer Strecke deutlich erhöht. Dieser Nutzen wird in Kapitel 9.4.4 bewertet.

Anders stellt sich die Situation des Nutzens durch Geschwindigkeitserhöhung bei dem Ersatz einer statischen Geschwindigkeitsbeschränkung durch eine SBA dar. Diese Geschwindigkeitserhöhung tritt bei geringen Verkehrsstärken auf und erreicht ihr Maximum theoretisch bei der Verkehrsstärke  $q = 0$ . Mit zunehmender Verkehrsstärke profitiert eine zunehmende Anzahl von Verkehrsteilnehmern von einem kleiner werdenden Nutzen. Das Maximum des Nutzens tritt also bei einer Verkehrsstärke  $0 < q < q_{\text{Grenz}}$  ein. Den qualitativen Zusammenhang für den Verlauf des Nutzens in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im Vergleich SBA mit T100 zeigt folgende Abbildung:



**Abb. 9-4:** Nutzen durch Fahrzeitgewinne im freien Verkehr – Vergleich SBA mit T100 (Annahmen: für den teilgebundenen Verkehr gleiche q-v-Funktion, für den freien Verkehr in beiden Fällen lineare Funktion)

Die SBA erbringt einen Nutzen für den Bereich, in dem die q-v-Funktion der SBA über der statischen Beschränkung liegt ( $q < q_{\text{Grenz}}$ ). Für  $q > q_{\text{Grenz}}$  tritt kein Nutzen auf, in diesem Bereich des teilgebundenen und gebundenen Verkehrs bewirkt die SBA keine Geschwindigkeitserhöhung. Es ergibt sich eine Funktion, die bei  $q = 0$  und bei  $q = q_{\text{Grenz}}$  einen Nullpunkt hat und dazwischen ein Maximum aufweist. Die Ausprägung des Nutzens hängt von den q-v-Funktionen ab. Die quantitative Bewertung dieses Nutzens erfolgt in Kapitel 9.4.2.

## 9.4 Quantitative Gesamtbewertung des Nutzens

### 9.4.1 Anmerkungen zur Gültigkeit der Aussagen

Die in diesem Kapitel bewerteten Wirkungen von SBA basieren im wesentlichen auf den Erkenntnissen, die bei dem Vergleich von Mit-SBA-Querschnitten und Ohne-SBA-Querschnitten am Streckenabschnitt A9 München – Holledau gewonnen wurden. Eine Absicherung der Erkenntnisse ist durch die Betrachtung weiterer Querschnitte an anderen Strecken und durch Vergleich mit Erkenntnissen aus der Literatur gegeben. Trotzdem gelten die Aussagen in erster Linie für die Weg-, Umfeld- und Verkehrsbedingungen, wie sie sich in dem untersuchten Bereich der A9 während des Untersuchungszeitraums dargestellt haben:

Wegbedingung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• baulich: dreistreifig mit Standstreifen, eben (Längsneigung vernachlässigbar)</li> <li>• betrieblich: SBA bzw. keine Tempobegrenzung</li> </ul>
Umfeldbedingung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hell (maximale Verkehrsstärke immer im Tagverkehr) und überwiegend gute Witterungsbedingungen</li> </ul>
Verkehrsbedingung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrzeugkollektiv: Lkw-Anteil <math>p = 15 \%</math></li> <li>• Fahrerkollektiv: Berufs- und Freizeitverkehr</li> <li>• DTV: 80.000 – 120.000 Kfz/Tag</li> </ul>

**Tabelle 9-1: Randbedingungen der Untersuchungsergebnisse**

Die Weg- und Verkehrsbedingungen stellen typische Verhältnisse für hoch belastete, dreistreifige Autobahnabschnitte dar. Sie können auf andere dreistreifige Richtungsfahrbahnen übertragen werden. Da für zweistreifige Richtungsfahrbahnen kein aussagefähiger Vergleich erbracht werden konnte, werden hierzu im folgenden keine Aussagen getroffen.

Die Datenbasis umfasst einen Sommerzeitraum und kann daher keine Aussagen zum Verkehrsablauf bei winterlichen Bedingungen liefern. Aus der Forschungsarbeit von PONZLET (1996) ist bekannt, dass die maximale Verkehrsstärke im Mittel bei Dunkelheit um 9 % und bei Nässe um 13 % reduziert wird, was den Verkehrsablauf bei winterlichen Bedingungen beeinträchtigt. Da jedoch zeitlich über das Jahr betrachtet die höchste Verkehrsstärke selten bei diesen Bedingungen auftritt, spielt dies keine Rolle. Ebenso wird die Geschwindigkeit und damit die Leistungsfähigkeit durch Dunkelheit und Nässe geringfügig reduziert. Kenntnisse über die Stabilität des Verkehrsflusses liegen nicht vor. Im folgenden wird davon ausgegangen, dass die Unterschiede nicht bedeutend sind und die vorliegenden Werte als für das ganze Jahr gültig angenommen werden können.

## Auswahl der berücksichtigten Nutzenkomponenten

Wie aus der qualitativen Betrachtung (Kapitel 9.3.2) ersichtlich, spielt die Komponente „Luftschadstoffe“ im Bereich des Verkehrswesens eine geringer werdende Rolle und wird daher im folgenden zur Vereinfachung vernachlässigt. Die Komponenten „Betriebskosten“ und „Klimabelastung“ spielen in der Gesamtbetrachtung wegen der geringen Geschwindigkeitsabhängigkeit ebenfalls eine geringe Rolle und werden demzufolge vernachlässigt. Veränderungen bei der Komponente „Lärmbelastung“ fließen nur dann in die Bewertung ein, wenn davon auch Anwohner betroffen werden. Damit sind zahlreiche Randbedingungen (wie z.B. Lärmschutzwände und Lage der Wohngebiete) zu berücksichtigen, die in einem allgemeingültigen Berechnungsverfahren nicht abbildbar sind. Die Bewertung der Lärmproblematik muss einer Untersuchung im Einzelfall vorbehalten bleiben.

Bei der folgenden quantitativen Bestimmung des Nutzens wird somit ausschließlich auf die Nutzenkomponente „Fahrzeiten“ eingegangen.

### Definition eines fiktiven Streckenabschnitts

Die Berechnung des Nutzens erfolgt über die Definition eines fiktiven Streckenabschnitts einer Autobahn. Die fiktive Strecke bildet einen 1 Kilometer langen Abschnitt einer Richtungsfahrbahn ab, der den verallgemeinerten Randbedingungen der Untersuchung entspricht.

Gemäß den Bezeichnungen der EWS ergibt sich folgende definierte Strecke:

Weg- bedingung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• planfreie Richtungsfahrbahn außerhalb bebauter Gebiete, 3 Fahrstreifen, mit Standstreifen → EWS: Straßentyp 1.31</li> <li>• vernachlässigbare Längsneigung → EWS: <math>s = 0 \%</math></li> <li>• Abschnittslänge 1 km → EWS: <math>LG = 1 \text{ km}</math></li> </ul>
Verkehrs- bedingung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• k-Faktoren für den Fall 3 Fst und <math>DTV &gt; 60.000</math> → EWS Tabelle 9</li> <li>• Lkw-Anteil <math>p = 15 \%</math> → <math>DTV_{GV,w+u+s} = 0,15 * DTV_{Ges,w+u+s}</math></li> </ul>

**Tabelle 9-2: Definition des fiktiven Streckenabschnitts für die Bewertung**

Die Jahresverkehrsstärke (DTV-Wert) für die Strecke ist nicht fest definiert, sondern wird bei der Betrachtung der einzelnen Wirkungsrichtungen variiert. Wie die folgenden Kapitel darstellen werden, hat die Höhe des DTV-Werts einen großen Einfluss auf die Höhe des Nutzens. Der ermittelte Nutzen wird für eine Vielzahl von DTV-Werten berechnet, um die Erkenntnisse auf andere Strecken zu übertragen.

#### **9.4.2 Nutzen von SBA im Vergleich zu einer statischen Geschwindigkeitsbeschränkung (T100 oder T120)**

Tabelle 9-3 und Tabelle 9-4 zeigen die Ergebnisse der monetären Bewertung der Reisezeitersparnisse, die durch die Geschwindigkeitserhöhung im freien Verkehrsfluss bei einer SBA im Vergleich zu einer statischen Geschwindigkeitsbeschränkung (T100 bzw. T120) entstehen. Dargestellt ist der Nutzen in den einzelnen Zeitabschnitten der Fahrtzweckgruppen für unterschiedliche Verkehrsbelastungen (DTV-Werte) der Richtungsfahrbahn. Die Angaben gelten für den oben definierten, fiktiven Streckenabschnitt (dargestellt ist also der Nutzen pro Kilometer Richtungsfahrbahn pro Jahr). Aus diesem Grund ist der DTV-Wert nicht wie üblich für den Gesamt-Querschnitt, sondern pro Richtungsfahrbahn angegeben.

Der Vergleich wurde durch Verwendung der q-v-Funktionen der EWS erstellt. Im Mit-SBA-Fall wurde die q-v-Funktion der EWS direkt verwendet, im Fall der Geschwindigkeitsbegrenzung wurde der Geschwindigkeitswert der q-v-Funktion für die freie Geschwindigkeit auf die Geschwindigkeitsbegrenzung beschränkt. Dabei ist berücksichtigt, dass in der Praxis die statischen Geschwindigkeitsbeschränkungen nicht genau befolgt werden. Angaben aus dem HBS zur q-v-Funktion an Strecken mit statischer Geschwindigkeitsbegrenzung sowie Erkenntnisse aus eigenen Untersuchungen des vorliegenden Datensatzes ergeben, dass im Mittel eine Überschreitung von 10 km/h als realistisch angenommen werden kann. Durch die Annahme einer Überschreitung wird die real vorliegende Situation beurteilt und der Nutzen durch die SBA nicht überschätzt.

Bei der Betrachtung der einzelnen Zeitabschnitte wird ersichtlich, dass in Zeitabschnitten mit hoher Verkehrsbelastung kein Nutzen auftritt (Tabelle 9-3 und Tabelle 9-4). In diesen Zeitabschnitten liegt das Geschwindigkeitsniveau unterhalb der Geschwindigkeitsbegrenzungen T100 bzw. T120 und die SBA kann keinen Nutzen durch eine Geschwindigkeitserhöhung bewirken. Mit Zunahme des DTV-Wertes sinkt in allen Zeitabschnitten das Geschwindigkeitsniveau und der Nutzen tritt in einer geringeren Zahl von Zeitabschnitten auf. Da allerdings in den verbleibenden Zeitabschnitten mit zunehmendem DTV-Wert mehr Verkehrsteilnehmer von der Geschwindigkeitserhöhung profitieren, ergibt sich für den Gesamt-Nutzen ein beinahe konstanter Wert.

Beim Vergleich SBA mit T100 ist der Gesamtnutzen natürlich wesentlich größer als beim Vergleich SBA mit T120. Im Fall des Ersatzes des Betriebszustands T100 durch eine SBA erhält der einzelne Verkehrsteilnehmer einen deutlich größeren Fahrtzeitgewinn und insgesamt profitieren davon wesentlich mehr Verkehrsteilnehmer.



Zeitabschnitt		DTV (je Richtung)					
t	h/a	45.000	50.000	55.000	60.000	65.000	70.000
Normalwert.	1 30	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
	2 40	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
	3 130	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
	4 500	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
	5 4.124	€ 7.200	€ 7.500	€ 7.600	€ 7.400	€ 6.700	€ 5.300
Urlaubswert	1 30	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
	2 40	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
	3 130	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
	4 500	€ 100	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
	5 1.724	€ 2.800	€ 3.000	€ 3.100	€ 3.200	€ 3.200	€ 3.000
Sonn-/Feiert.	1 30	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
	2 40	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
	3 130	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
	4 500	€ 1.100	€ 500	€ -	€ -	€ -	€ -
	5 812	€ 1.100	€ 1.200	€ 1.300	€ 1.400	€ 1.500	€ 1.600
<b>Summe</b>	<b>8.760</b>	<b>€ 12.200</b>	<b>€ 12.200</b>	<b>€ 12.000</b>	<b>€ 11.900</b>	<b>€ 11.300</b>	<b>€ 9.900</b>

**Tabelle 9-3: Nutzen einer SBA im Vergleich zur statischen Tempobegrenzung T120 (dreistreifige Strecke)**

Zeitabschnitt		DTV (je Richtung)					
h/a		45.000	50.000	55.000	60.000	65.000	70.000
Normalwert.	1 30	€ 300	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
	2 40	€ 600	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
	3 130	€ 2.200	€ 800	€ -	€ -	€ -	€ -
	4 500	€ 9.500	€ 7.300	€ 1.600	€ -	€ -	€ -
	5 4.124	€ 49.300	€ 54.200	€ 59.000	€ 63.400	€ 67.400	€ 70.700
Urlaubswert	1 30	€ 500	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
	2 40	€ 700	€ 400	€ -	€ -	€ -	€ -
	3 130	€ 2.500	€ 2.100	€ 1.000	€ -	€ -	€ -
	4 500	€ 9.300	€ 9.200	€ 8.000	€ 4.800	€ -	€ -
	5 1.724	€ 18.300	€ 20.200	€ 22.100	€ 23.800	€ 25.500	€ 27.100
Sonn-/Feiert.	1 30	€ 700	€ 500	€ -	€ -	€ -	€ -
	2 40	€ 1.100	€ 1.000	€ 600	€ -	€ -	€ -
	3 130	€ 3.400	€ 3.400	€ 2.900	€ 1.600	€ -	€ -
	4 500	€ 12.300	€ 13.000	€ 13.200	€ 12.600	€ 10.700	€ 6.600
	5 812	€ 6.500	€ 7.200	€ 7.900	€ 8.600	€ 9.300	€ 10.000
<b>Summe</b>	<b>8.760</b>	<b>€ 117.000</b>	<b>€ 119.200</b>	<b>€ 116.200</b>	<b>€ 115.000</b>	<b>€ 113.000</b>	<b>€ 114.400</b>

**Tabelle 9-4: Nutzen einer SBA im Vergleich zur statischen Tempobegrenzung T100 (dreistreifige Strecke)**

Wird die statische Tempobegrenzung T100 durch eine SBA ersetzt, so stellt schon allein der Reisezeitgewinn im freien Verkehr einen erheblichen Nutzen für die Verkehrsteilnehmer dar. Bei einem Ersatz der Tempobegrenzung T120 ist der Nutzen um einiges geringer. Angaben zur Realisierbarkeit dieser Nutzenkomponente in der Praxis werden in Kapitel 9.5 gegeben.

### 9.4.3 Nutzen von SBA durch Stabilisierung des Verkehrsflusses

Die Stabilität eines Verkehrsflusses wird in der Bewertungsmethodik der EWS nicht berücksichtigt. Um die ermittelte Stabilisierungswirkung von SBA zu bewerten, muss der Bewertungsansatz der EWS erweitert werden.

Die Grundannahme des erweiterten Bewertungsansatzes besteht darin, dass die ermittelten Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten gleichgesetzt werden mit den Anteilen von nicht zusammengebrochenem, fließendem Verkehr zu zusammengebrochenem Verkehr. Die Stabilisierungswirkung der SBA wird durch eine Reduktion der Zeitdauer für zusammengebrochenen Verkehr ausgedrückt. Anstelle des nicht zusammengebrochenen Verkehrs wird allerdings kein freier Verkehrsfluss, sondern ein Verkehrsfluss mit einem Geschwindigkeitsniveau von 60 km/h angenommen.

Die Zeitabschnitte der Fahrtzweckgruppen werden somit in drei Zustände eingeteilt:

- Zeitdauer des zusammengebrochenen Verkehrs: Stop-and-go-Verkehr mit im Mittel  $v = 20$  km/h
- Zeitdauer des nicht-zusammengebrochenen Verkehrs: Verkehr gemäß der q-v-Funktion der EWS
- zusätzliche Bedingung für den Differenz-Zeitraum, der zwischen dem Mit-SBA- und dem Ohne-SBA-Fall entsteht: in diesem Zeitraum entsteht ein durch die SBA erzeugter Verkehrszustand mit einem Geschwindigkeitsniveau von (höchstens) 60 km/h

Dieser Ansatz bildet die in dieser Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse ab, dass sich Kapazität und Leistungsfähigkeit zwischen Mit-SBA-Fall und Ohne-SBA-Fall nicht signifikant unterscheiden. Für beide Fälle wird also die gleiche q-v-Funktion verwendet. Unterschiede zwischen den Fällen bestehen allerdings in der unterschiedlichen Zeitdauer für den zusammengebrochenen Verkehr.

Bei verkehrlich sehr stark belasteten Querschnitten treten gemäß der q-v-Funktion der EWS Zeitabschnitte auf, bei denen die Geschwindigkeit gleich der des Stop-and-Go-Verkehrs ist oder kaum darüber liegt. In diesem Fall kann die SBA nur einen minimalen Nutzen erbringen, da durch die Erhöhung des Zeitanteils des nicht-zusammengebrochenen Verkehrs kaum eine Reisezeitersparnis auftritt. Dies bedeutet, dass an stark belasteten Strecken in einigen Spitzenstunden des Jahres auch bei Vorhandensein einer SBA der Verkehrsfluss nicht aufrecht erhalten werden kann. Damit wird die in den empirischen Untersuchungen gewonnene Erkenntnis abgebildet, dass ein Verkehrszusammenbruch auch an Strecken mit SBA eintritt, wenn die Verkehrsnachfrage die Kapazität überschreitet. Der größte Nutzen durch die Stabilisierungswirkung des Verkehrsflusses ergibt sich also in dem Bereich der Verkehrsstärken kurz vor Erreichen der Kapazitätsgrenze.

Zur Bewertung werden die in Kapitel 8.4.2 angegebenen Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten auf die stündliche Verkehrsstärke umgerechnet und im Sinne einer vorsichtigen Schätzung abgerundet und gruppiert (Tabelle 8-1). Eine vorsichtige Schätzung ist notwendig, da vor allem bei den Ohne-SBA-Querschnitten die Anzahl der Querschnitte mit Angaben zur Zusammenbruchswahrscheinlichkeit bei hohen Verkehrsstärkeklassen gering ist und eine Ungenauigkeit existiert. Um eine Überbewertung des Nutzens durch SBA auszuschließen, werden daher für den Ohne-SBA-Fall keine höheren Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten als 6% und für den Mit-SBA-Fall keine geringeren Werte als 2% angenommen. Die Zwischenwerte werden angeglichen. Unterhalb der Verkehrsstärkekategorie von 3300 – 3599 Kfz/h treten Verkehrszusammenbrüche nur noch in vernachlässigbarer Anzahl auf, demnach kann in diesem Bereich kein Nutzen durch eine Stabilisierungswirkung von SBA entstehen.

Klasse [Kfz/min]	Messergebnisse		Klasse [Kfz/h]	für Bewertung	
	mit SBA	ohne SBA		mit SBA	ohne SBA
0 – 4 bis 50 - 54	0 %	0 %	0-299 bis 3000-3299	0%	0%
55 - 59	0,9%	1,0%	3300 - 3599	1%	1%
60 - 64	1,0%	1,9%	3600 - 3899	1%	2%
65 - 69	1,3%	2,9%	3900 - 4199	2%	3%
70 - 74	1,7%	1,7%	4200 - 4499	2%	3%
75 - 79	1,7%	4,8%	4500 - 4799	2%	3%
80 - 84	2,1%	9,2%	4800 - 5099	2%	6%
85 - 89	1,2%	10,0%	5100 - 5399	2%	6%

**Tabelle 9-5: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit und Übernahme in das Bewertungsschema**

Die Ergebnisse für den Nutzen, wie er sich gemäß dieser Methodik und gemäß den ermittelten Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten ergibt, sind in Tabelle 9-6 dargestellt.

Anhand der Tabelle ist ersichtlich, dass der Nutzen durch die Stabilisierungswirkung in den Zeitabschnitten mit mittlerer Verkehrsstärke auftritt. Der Grund ist, dass bei den niedrigen Verkehrsstärken die Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten in beiden Fällen niedrig sind und bei den sehr hohen Verkehrsstärken auch die SBA das Absinken des Geschwindigkeitsniveaus nicht vermeiden kann (für beide Fälle gilt die unveränderte q-v-Funktion). Der größte Nutzen durch SBA tritt in Zeitabschnitten auf, bei denen die Verkehrsstärke so hoch ist, dass sich die Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten der beiden Fälle stark unterscheiden und das Geschwindigkeitsniveau gemäß q-v-Funktion noch nicht im Stop-and-go-Verkehr liegt.

Bei Betrachtung der Abhängigkeit vom DTV zeigt sich, dass unterhalb des DTV-Werts von 45.000 Kfz/24h/Richtungsfahrbahn der SBA-Nutzen sehr gering ist.

Dies ist deshalb der Fall, da dann nur kurze Zeiträume mit Verkehrsüberlastung auftreten, bei denen die SBA eine Stabilisierungswirkung ausüben könnte. Von den Messquerschnitten des vorliegenden Datensatzes entspricht dieser DTV-Wert z.B. dem des MQ 101 der A9. Dieser Querschnitt liegt bereits weitab vom Ballungsraum München und weist im Rahmen des Datensatzes keine Verkehrsüberlastung auf. Die Installation einer SBA bewirkt an diesem Querschnitt im Hinblick auf eine Stabilisierungswirkung nur einen minimalen Nutzen.

Der SBA-Nutzen steigt mit zunehmendem DTV-Wert schnell an und erreicht ein Maximum bei 65.000 Kfz/24h/Richtungsfahrbahn. Ab diesem DTV-Wert wird in den hochbelasteten Zeitabschnitten wiederum fast kein Nutzen erzielt. Vor allem die Zeitabschnitte 3 und 4 ergeben einen deutlichen Nutzen. Im Rahmen der vorliegenden Datenbasis entsprechen diese DTV-Werte dem Abschnitt der A9 von AS Allershausen bis AK Neufahrn (Lageplan im Anhang). In diesem Bereich befinden sich auch die detailliert untersuchten Querschnitte MQ 116 und MQ 316. Bei diesen Verkehrsstärken wirkt sich die Stabilisierungswirkung der SBA deutlich aus.

Nutzen durch Stabilisierungswirkung von SBA [€/km/Richtung/a]							
Zeitabschnitt		DTV (je Richtung)					
t	h/a	45.000	50.000	55.000	60.000	65.000	70.000
Normalwert	1 30	€ 300	€ 400	€ 1.700	€ 200	€ -	€ -
	2 40	€ 400	€ 500	€ 500	€ 500	€ 100	€ -
	3 130	€ 1.400	€ 1.600	€ 1.700	€ 7.500	€ 700	€ 200
	4 500	€ -	€ 5.700	€ 6.200	€ 6.800	€ 29.400	€ 3.300
	5 4.124	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Urlaubswert	1 30	€ 300	€ 400	€ 400	€ 700	€ 100	€ -
	2 40	€ -	€ 500	€ 500	€ 600	€ 400	€ 100
	3 130	€ -	€ 1.400	€ 1.600	€ 1.700	€ 1.900	€ 1.500
	4 500	€ -	€ -	€ -	€ 6.200	€ 6.700	€ 7.200
	5 1.724	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Sonn-/Feiert.	1 30	€ 200	€ 300	€ 1.100	€ 1.200	€ 400	€ 100
	2 40	€ 300	€ 300	€ 300	€ 1.500	€ 1.600	€ 1.300
	3 130	€ -	€ 900	€ 1.000	€ 1.100	€ 4.800	€ 5.200
	4 500	€ -	€ -	€ -	€ 3.700	€ 4.000	€ 4.300
	5 812	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
<b>Summe</b>	<b>8.760</b>	<b>€ 3.000</b>	<b>€ 11.900</b>	<b>€ 15.100</b>	<b>€ 31.600</b>	<b>€ 50.100</b>	<b>€ 23.200</b>

**Tabelle 9-6: Nutzen durch die Stabilisierungswirkung von SBA (dreistreifige Strecke)**

Für die höchsten DTV-Werte, wie sie an dreistreifigen Querschnitten vorkommen, nimmt der Nutzen wieder ab, da viele Zeitabschnitte auf das Geschwindigkeitsniveau des Stop-and-go-Verkehrs absinken, in denen ein Nutzen ausbleibt. Das bewirkt jedoch, dass für einen DTV-Wert von 70.000 Kfz/24h/Richtung die Zeitabschnitte 1-4 das Geschwindigkeitsniveau des Stop-and-Go-Verkehrs zugewiesen bekommen. Der Zeitabschnitt 5 liegt bei diesem DTV-Wert in der Verkehrsstärke zu niedrig, um noch einen Nutzen durch die Stabilisierungswirkung im Bewertungsschema zu bewirken. Dies ist nicht plausibel und eine Folge der vereinfachten Ab-

bildung des Verkehrsgeschehens mittels fünf Zeitabschnitten. Der Zeitabschnitt 5 dient der Abbildung des Verkehrsgeschehens im freien Verkehr und würde erst bei Annahme unrealistisch hoher DTV-Werte Verkehrsstärken erreichen, bei denen eine Stabilisierungswirkung der SBA eintreten würde. Eine detaillierte Berechnung des Nutzens könnte mit einer feineren Aufteilung der Jahresverkehrsstärken in mehr Zeitabschnitte geschehen. Da dies im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht durchgeführt werden kann, wird der Maximalwert des Nutzens für den DTV-Wert von 65.000 Kfz/24h/Richtungsfahrbahn auf die höheren DTV-Werte extrapoliert.

#### **9.4.4 Nutzen von SBA mit temporärer Standstreifenfreigabe**

Wie oben beschrieben, erhöht ein freigegebener Standstreifen im Regelfall die Kapazität um einen Fahrstreifen (Kapitel 5.5). Wird der Standstreifen freigegeben, steht er aber nicht mehr für die Aufnahme von Pannen- und Unfallfahrzeugen oder für Wartungsarbeiten zur Verfügung. Ein kapazitätsmindernder Einfluss von Wartungsarbeiten kann vermieden werden, indem diese nicht in der Spitzenverkehrszeit durchgeführt werden. Tritt allerdings eine Panne oder ein Unfall während der Standstreifenfreigabe auf, so wird die Kapazität wieder auf den Wert ohne Standstreifenfreigabe reduziert, da die SBA durch ein entsprechendes Störungserkennungsprogramm dann die Standstreifenfreigabe zurücknimmt. Bei einer dauerhaften Standstreifenfreigabe durch Ummarkierung nimmt in diesen Fällen die Kapazität sogar um mehr als einen Fahrstreifen ab, da durch Verflechtungsvorgänge der am Pannenfahrzeug vorbeifahrenden Fahrzeuge die anderen Fahrstreifen gestört werden.

Wird eine Umnutzung des Standstreifens für Zwecke des fließenden Verkehrs vorgenommen, werden in der Regel Nothaltebuchten oder Nothaltestreifen angebracht. Während Nothaltebuchten in regelmäßigen Abständen das Abstellen von Pkw und Lkw ermöglichen, können auf einem Nothaltestreifen auf ganzer Länge Pkw abgestellt werden, ohne dass sie den Verkehrsfluss behindern. Mit diesen Maßnahmen gelingt es, die Häufigkeit verkehrsbehindernder Halte deutlich zu reduzieren. In Verbindung mit der in den letzten Jahren beständig gestiegenen Zuverlässigkeit der Fahrzeuge und der Erhöhung der Verkehrssicherheit einer Strecke durch eine SBA ist damit zu rechnen, dass eine Kapazitätsminderung der Strecke nur sehr selten eintritt.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts der Bundesanstalt für Straßenwesen wurde ein Bewertungsschema erarbeitet, das diese Einflüsse berücksichtigt und somit eine detaillierte Analyse des Nutzens durch temporäre Standstreifenfreigabe ermöglicht (ARNOLD 2001). Die Reduktion des Nutzens durch die Erhöhung der Unfallzahlen wird im Fall der temporären Standstreifenfreigabe mit ca. 10 % angegeben. Im folgenden wird der Nutzen aus der Standstreifenfreigabe für die fiktive Strecke vereinfacht ohne Berücksichtigung dieser Einflüsse abgeschätzt, um in einem einheitli-

chen Bewertungsrahmen die verschiedenen Nutzenkomponenten von SBA angeben zu können. Bei einer Untersuchung im Einzelfall sollte auf die Ergebnisse des Bewertungsschemas von ARNOLD (2001) zurückgegriffen werden. Weitere umfangreiche Untersuchungen zu Einsatzfeldern und Praxiserfahrungen bei der Standstreifenfreigabe können LEMKE und MORITZ (2001) entnommen werden.

Die Berechnung des Nutzens erfolgt unter Verwendung der q-v-Funktionen der EWS für zwei-, drei- und vierstreifige Querschnitte und unter der vereinfachten Annahme, dass die Standstreifenfreigabe immer dann erfolgt, wenn die Geschwindigkeit unter 100 km/h absinkt. Dies entspricht einem Übergang von der als akzeptabel angesehenen Verkehrsqualitätsstufe D in die inakzeptable Stufe E. Da in Stufe E außerdem die Verkehrsstärke des Querschnitts in die Nähe der Kapazitätsgrenze rückt und die Gefahr des Verkehrszusammenbruchs wächst, sollte spätestens hier die SBA den Standstreifen freigeben.

Für die Berechnung des Nutzens wird die q-v-Funktion der EWS herangezogen. In diesem Fall werden zusätzlich zu der Funktion für dreistreifige Querschnitte auch die für zwei- und für vierstreifige Querschnitte verwendet. Die Annahme der Gültigkeit der q-v-Funktionen der EWS entspricht der Annahme, dass die Kapazität eines freigegebenen Fahrstreifens dem eines „normalen“ Fahrstreifens entspricht. Diese Annahme setzt einen gewissen baulichen Standard, eine gute Wirkungsweise der SBA und eine gute Akzeptanz (evtl. nach Ablauf einer gewissen Eingewöhnungszeit) der Verkehrsteilnehmer voraus.

Im Unterschied zu den Ermittlungen des Nutzens in den beiden vorigen Kapiteln wird für die temporäre Standstreifenfreigabe auch der Nutzen für eine zweistreifige Richtungsfahrbahn berechnet. Die Berechnung wird wieder für den definierten, fiktiven Streckenabschnitt durchgeführt (Lkw-Anteil  $p = 15\%$ ), der nun je nach Fall eine Erweiterung von zwei auf drei bzw. von drei auf vier Fahrstreifen erfährt.

Die Ergebnisse der Berechnung zeigen Tabelle 9-7 und Tabelle 9-8. Man erkennt, dass (ähnlich der Stabilisierungswirkung) der Nutzen in den Zeitabschnitten mit hoher, aber nicht höchster Verkehrsbelastung auftritt. Der Grund ist, dass in den Zeitabschnitten mit höchster Verkehrsbelastung auch im Fall der Standstreifenfreigabe eine Verkehrsüberlastung vorliegt.

Bei niedrigen DTV-Werten ist der Nutzen gering, da in diesen Fällen das Geschwindigkeitsniveau am Querschnitt nur selten so weit absinkt, dass die Standstreifenfreigabe eingesetzt wird. Außerdem existieren kaum Stauzustände, bei deren Vermeidung ein erheblicher Nutzen eintreten würde. Der Nutzen der Standstreifenfreigabe steigt mit zunehmendem DTV-Wert rasch an. Der Maximum des Nutzens stellt sich bei sehr hohen DTV-Werten ein, wobei sich der Anstieg des Nutzens für die sehr hohen DTV-Werte asymptotisch einer Grenze nähert.

Nutzen durch Standstreifenfreigabe von 2 auf 3 Fst. (p = 15 %) [€/km/Richtung/a]								
Zeitabschnitt		DTV [Kfz/24h/Richtung]						
t	h/a	37.500	40.000	42.500	45.000	47.500	50.000	
Normalwert	1	30	€ 3.000	€ 31.000	€ 37.000	€ 41.000	€ 43.000	€ 45.000
	2	40	€ 4.000	€ 37.000	€ 48.000	€ 53.000	€ 57.000	€ 60.000
	3	130	€ 7.000	€ 13.000	€ 130.000	€ 159.000	€ 174.000	€ 186.000
	4	500	€ -	€ 29.000	€ 53.000	€ 498.000	€ 612.000	€ 672.000
	5	4.124	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Urlaubswert	1	30	€ 2.000	€ 4.000	€ 32.000	€ 37.000	€ 41.000	€ 43.000
	2	40	€ 2.000	€ 4.000	€ 39.000	€ 49.000	€ 53.000	€ 57.000
	3	130	€ -	€ 9.000	€ 49.000	€ 142.000	€ 165.000	€ 178.000
	4	500	€ -	€ -	€ -	€ -	€ 42.000	€ 68.000
	5	1.724	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Sonn-/Feiert.	1	30	€ -	€ 2.000	€ 6.000	€ 25.000	€ 29.000	€ 31.000
	2	40	€ -	€ -	€ -	€ 2.000	€ 4.000	€ 28.000
	3	130	€ -	€ -	€ -	€ -	€ 8.000	€ 14.000
	4	500	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
	5	812	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
<b>Summe</b>	<b>8.760</b>	<b>€ 18.000</b>	<b>€ 130.000</b>	<b>€ 394.000</b>	<b>€ 1.006.000</b>	<b>€ 1.229.000</b>	<b>€ 1.382.000</b>	

**Tabelle 9-7: Nutzen durch Standstreifenfreigabe bei einem zweistreifigen Querschnitt (d.h. 2 → 3 Fahrstreifen) bei einem Lkw-Anteil p = 0,15 %**

Nutzen durch Standstreifenfreigabe von 3 auf 4 Fst. (p = 15 %) [€/km/Richtung/a]								
Zeitabschnitt		DTV [Kfz/24h/Richtung]						
t	h/a	50.000	55.000	60.000	65.000	70.000	75.000	
Normalwert	1	30	€ 2.000	€ 31.000	€ 53.000	€ 59.000	€ 63.000	€ 63.000
	2	40	€ 2.000	€ 7.000	€ 69.000	€ 78.000	€ 84.000	€ 86.000
	3	130	€ -	€ 10.000	€ 179.000	€ 238.000	€ 262.000	€ 276.000
	4	500	€ -	€ -	€ 53.000	€ 797.000	€ 951.000	€ 1.033.000
	5	4.124	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Urlaubswert	1	30	€ -	€ 3.000	€ 45.000	€ 56.000	€ 61.000	€ 64.000
	2	40	€ -	€ 3.000	€ 53.000	€ 73.000	€ 81.000	€ 86.000
	3	130	€ -	€ 7.000	€ 19.000	€ 221.000	€ 254.000	€ 274.000
	4	500	€ -	€ -	€ -	€ -	€ 46.000	€ 726.000
	5	1.724	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Sonn-/Feiert.	1	30	€ -	€ -	€ 5.000	€ 39.000	€ 44.000	€ 47.000
	2	40	€ -	€ -	€ -	€ 3.000	€ 21.000	€ 53.000
	3	130	€ -	€ -	€ -	€ -	€ 14.000	€ 130.000
	4	500	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
	5	812	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
<b>Summe</b>	<b>8.760</b>	<b>€ 4.000</b>	<b>€ 61.000</b>	<b>€ 475.000</b>	<b>€ 1.564.000</b>	<b>€ 1.880.000</b>	<b>€ 2.839.000</b>	

**Tabelle 9-8: Nutzen durch Standstreifenfreigabe bei einem dreistreifigen Querschnitt (d.h. 3 → 4 Fahrstreifen) bei einem Lkw-Anteil p = 0,15 %**

Ein Vergleich mit der Nutzenberechnung mit dem Bewertungsschema von ARNOLD (2001) zeigt eine gute Übereinstimmung des berechneten Nutzens. Der Vergleich wird mit den Werten eines in LEMKE und MORITZ (2001) dargestellten Berechnungsbeispiels der Standstreifenfreigabe (Freigabe 2→3 Fahrstreifen) der A3 bei Würzburg durchgeführt. Bei diesem Berechnungsbeispiel stellte sich analog heraus, dass bei DTV-Werten von < 40.000 Kfz/24h der Nutzen gering ist und erst bei > 40.000 Kfz/24h ein merklicher Nutzen auftritt. Ein sehr großer Nutzen tritt in Abschnitten mit einer Verkehrsbelastung ab 45.000 Kfz/24h auf.

## 9.5 Zusammenfassung und Bewertung der Nutzenkomponenten von SBA

In den vorhergehenden Kapiteln 9.4.2 bis 9.4.4 wurden die einzelnen Nutzenkomponenten von SBA quantifiziert und im Detail analysiert. In der folgenden Tabelle sind die Nutzenkomponenten für den Fall dreistreifiger Streckenabschnitte zusammengefasst dargestellt:

<b>Nutzenkomponenten von SBA auf dreistreifigen Richtungsfahrbahnen</b>				
[€/km/Richtung/a]				
DTV [Kfz/24h/Richt.]	SBA anstelle von T100	SBA anstelle von T120	Stabilisierungswirkung *)	Standstreifenfreigabe
40.000	€ 109.200	€ 12.500	€ -	€ -
42.500	€ 113.600	€ 12.400	€ 1.000	€ -
45.000	€ 117.000	€ 12.200	€ 3.000	€ -
47.500	€ 118.900	€ 12.200	€ 9.900	€ -
50.000	€ 119.200	€ 12.200	€ 11.900	€ 4.000
52.500	€ 118.300	€ 12.000	€ 12.100	€ 8.200
55.000	€ 116.200	€ 12.000	€ 15.100	€ 61.000
57.500	€ 115.000	€ 12.000	€ 27.000	€ 183.000
60.000	€ 115.000	€ 12.000	€ 31.600	€ 475.000
62.500	€ 113.600	€ 11.700	€ 40.900	€ 1.152.000
65.000	€ 113.000	€ 11.300	€ 50.100	€ 1.564.000
67.500	€ 114.200	€ 10.700	€ 50.000	€ 1.750.000
70.000	€ 114.400	€ 9.900	€ 50.000	€ 1.880.000
72.500	€ 113.400	€ 8.900	€ 50.000	€ 2.020.000
75.000	€ 112.500	€ 7.600	€ 50.000	€ 2.840.000

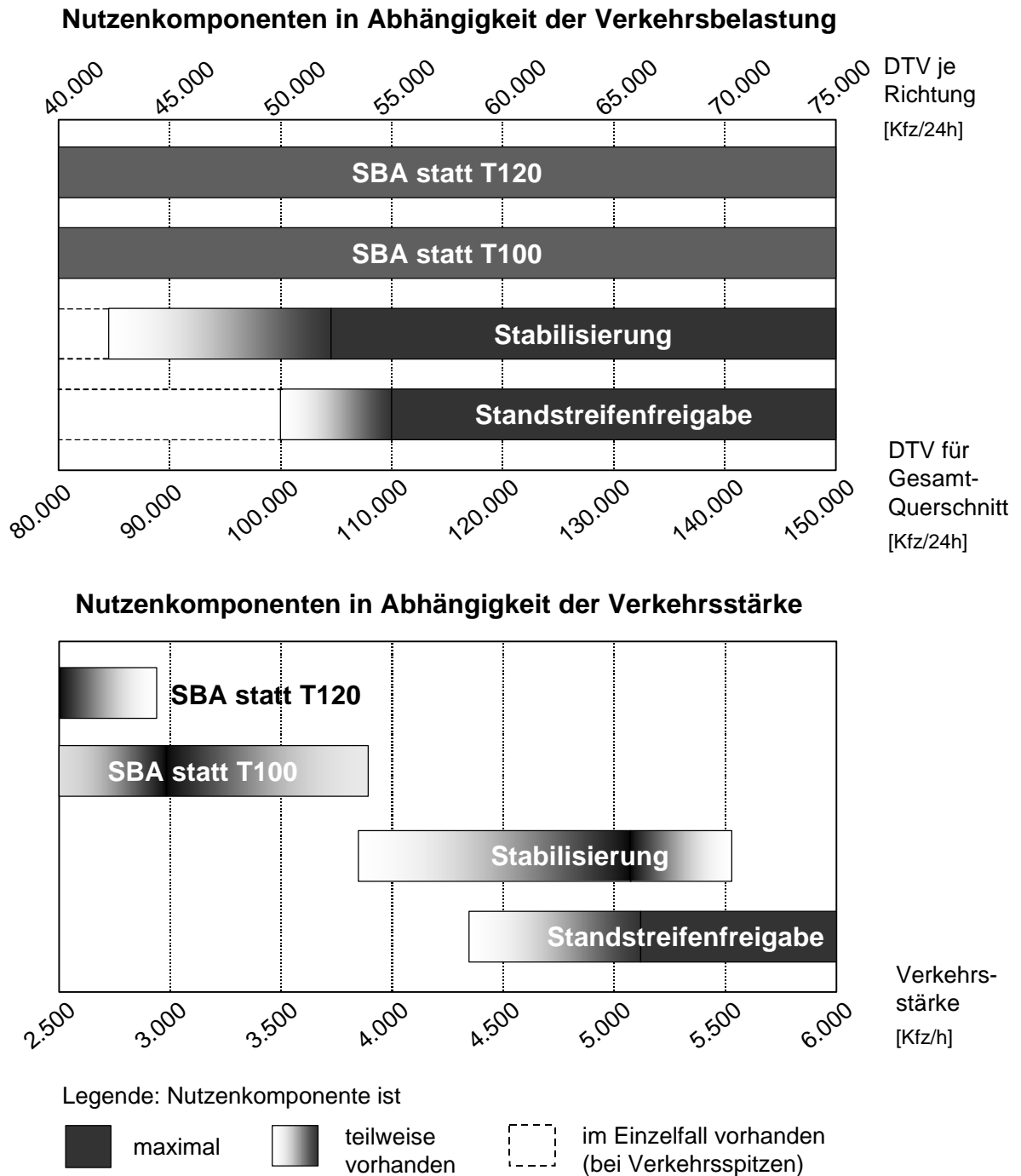
\*) Die Stabilisierungswirkung ist oberhalb 65.000 Kfz/24h auf 50.000 €/km/Richtung/a gesetzt

**Tabelle 9-9: Nutzenkomponenten von SBA in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung für die fiktive Strecke (dreistreifig, eben, Lkw-Anteil 15%)**

Eine vergleichende Betrachtung der einzelnen Nutzenkomponenten zeigt, dass sich die einzelnen Nutzenkomponenten in der Höhe und in der Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung stark unterscheiden. Insbesondere die Nutzenkomponenten „Stabilisierungswirkung“ und „Standstreifenfreigabe“ hängen stark von der Verkehrsbelastung der Strecke ab. Aus diesen Erkenntnissen werden in Abb. 9-5 Einsatzgebiete von SBA zur Erzielung von Reisezeitersparnissen in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung angegeben.

In Abb. 9-5 sind zusätzlich zu den Einsatzgebieten in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung auch die Einsatzgebiete in Abhängigkeit der stündlichen Verkehrsstärke dargestellt. Damit wird die Wirkungsweise von SBA verdeutlicht und im Einzelfall ist eine genauere Beurteilung des Nutzens möglich. Dies ist dann von Bedeutung, wenn an einer Strecke besonders ausgeprägte Spitzen in der Verkehrsnachfrage auftreten und die allgemeinen Werte der EWS nicht gelten.





**Abb. 9-5: Einsatzgebiete von SBA zur Erzielung von Reisezeitersparnissen für die definierte Strecke (dreistreifig, eben, Lkw-Anteil 15%)**

**oberes Diagramm: Nutzenkomponenten in Abhängigkeit des DTV**

**unteres Diagramm: Nutzenkomponenten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke [Kfz/h]**

Treten an einer Strecke besonders ausgeprägte Spitzen in der Verkehrsnachfrage auf, so gelten die für den allgemeinen Fall gültigen Faktoren (*k-Faktoren*) zur Umrechnung der Jahresverkehrsstärke (DTV) in die Verkehrsstärke der einzelnen Zeitabschnitte der EWS nicht. Hohe Spitzenbelastungen bei gleichzeitig geringem DTV treten z.B. an Routen mit Ferienverkehr (z.B. samstäglichem Urlauberwechsel in Feriengebieten) oder an Routen zu Großveranstaltungen (Messe, Sportveranstaltung)

auf. Die Nutzenkomponenten „Stabilisierungswirkung“ und vor allem die „Standstreifenfreigabe“ können in diesen Fällen noch höher liegen als anhand der fiktiven Strecke berechnet. In diesen Fällen ist der Einsatz betrieblicher Maßnahmen zur Verbesserung des Verkehrsablaufs besonders überlegenswert, da damit der teure Bau eines zusätzlichen Fahrstreifens, der zeitlich gesehen nur selten benötigt wird, vermieden werden kann.

### **Interpretation der Nutzenkomponenten und Realisierbarkeit in der Praxis**

Die Nutzenkomponente „**SBA anstatt T120**“ erbringt über den gesamten untersuchten Bereich der Verkehrsbelastungen einen beinahe konstanten Nutzen, der im Vergleich zu den anderen Nutzenkomponenten gering ist (Tabelle 9-9 und oberes Diagramm von Abb. 9-5). Da die Verkehrsteilnehmer im Durchschnitt bei einer Geschwindigkeitsbegrenzung von T120, zu der eine angenommene Überschreitung von 10 km/h zu addieren ist, nur wenig langsamer fahren als ohne Geschwindigkeitsbegrenzung, ist der Nutzen gering. Oberhalb einer Verkehrsstärke von ca. 3.000 Kfz/h/Richtung sinkt das Geschwindigkeitsniveau unter 130 km/h und damit geht diese Nutzenkomponente gegen null (unteres Diagramm von Abb. 9-5).

Die Nutzenkomponente „SBA anstatt T120“ ist in der Praxis zu erreichen, wenn eine aus Gründen der Verkehrssicherheit den Tag über gültige Begrenzung T120 durch eine SBA ersetzt wird. Wird eine aus verkehrlichen Gründen nur für bestimmte Zeiträume gültige Geschwindigkeitsbegrenzung (z.B. T120 von 6-20 Uhr) durch eine SBA ersetzt, so wird diese Nutzenkomponente verringert, da in diesem Fall die statische Geschwindigkeitsbegrenzung nur dann gültig ist, wenn das Geschwindigkeitsniveau verkehrsstärkebedingt ohnehin niedrig ist und keine Reisezeitverluste bewirkt.

Die Nutzenkomponente „**SBA anstatt T100**“ zeigt für die gesamte betrachtete Spanne der Verkehrsbelastung einen hohen Wert. Dieser hohe Nutzen entsteht, da auch an hochbelasteten Strecken in den meisten Zeiträumen ein freier Verkehrsfluss mit einem Geschwindigkeitsniveau höher als 100 km/h zuzüglich der angenommenen Überschreitung von 10 km/h vorherrscht. Durch einen Wegfall der statischen Geschwindigkeitsbegrenzung erfahren zahlreiche Verkehrsteilnehmer einen hohen Nutzen. Für die Praxis spielt die Nutzenkomponente allerdings kaum eine Rolle, da die Geschwindigkeitsbegrenzung T100 in der Regel aus Gründen erlassen wird, denen mit einer SBA nicht abgeholfen werden kann (z.B. wegen Lärmschutz oder wegen eines schlechten Fahrbahnzustands).

Die Nutzenkomponente „**Stabilisierungswirkung**“ kann nur bei hohen Verkehrsstärken Reisezeitersparnisse erbringen, da unterhalb einer Verkehrsstärke von 3.500 Kfz/h/Richtung keine verkehrsstärkebedingten Zusammenbrüche auftreten (Tabelle 9-5). Diese Verkehrsstärke wird an Streckenabschnitten mit DTV-Werten

von kleiner als 45.000 Kfz/24h/Richtung in der Regel nicht erreicht und somit resultiert aus der Stabilisierungswirkung keine Nutzenkomponente. In einem Bereich von 3.500 – 4.800 Kfz/h (entsprechend einer Verkehrsbelastung von 45.000 – 55.000 Kfz/24h/Richtung) steigt die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit des Verkehrs schnell an und somit der durch die Stabilisierungswirkung der SBA erbrachte Nutzen. Die Stabilisierungswirkung erreicht im Bereich der Kapazitätsgrenze ihr Maximum und fällt anschließend wieder ab. Der maximale Nutzen aus der Stabilisierungswirkung tritt für Verkehrsbelastungen von 65.000 Kfz/24h/Richtung ein (Tabelle 9-9 und oberes Diagramm von Abb. 9-5). Bei dieser Verkehrsbelastung werden in längeren Zeitabschnitten Verkehrsstärken von 5.000 Kfz/h/Richtung erreicht.

In der Praxis ist davon auszugehen, dass der Nutzen aus der Stabilisierungswirkung in unterschiedlichem Maße erreicht wird. Die Angaben gelten für die an den untersuchten Strecken gewonnenen Erkenntnisse. Entsprechend der Charakteristik der untersuchten Strecken und des betrachteten Sommerzeitraums gelten die Werte eher für Strecken außerhalb von Ballungsräumen mit einem hohen Fernverkehrsanteil und weniger für Strecken mit hohem Berufsverkehr. Wegen verbleibender Unsicherheiten bei dem Vergleich der Werte verschiedener Strecken und des begrenzten Untersuchungszeitraums wurden die Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten zuungunsten der SBA abgerundet und die Stabilisierungswirkung damit eher unter als überbewertet.

Eine Betrachtung der Wirkungsweise einer SBA zeigt, dass durch mangelnde Befolgung und Überwachung von Geschwindigkeitsbegrenzungen ein Teil des Wirkungspotenzials von SBA nicht ausgenutzt wird (Kapitel 8.5). Außerdem sollten weitere Anstrengungen zur Entwicklung von Schaltprogrammen unternommen werden, die präventiv vor Erreichen des Verkehrszusammenbruchs aktiv werden (Kapitel 8.6). Bei erfolgreicher Umsetzung derartiger Maßnahmen ist eine deutliche Steigerung der Nutzenkomponente „Stabilisierung“ zu vermuten.

Die Nutzenkomponente „**Standstreifenfreigabe**“ tritt im Berechnungsfall ein, wenn die Geschwindigkeit unter 100 km/h absinkt. Bei der fiktiven dreistreifigen Strecke ist das der Fall, wenn eine Verkehrsstärke von 4.300 Kfz/h/Richtung bzw. eine Verkehrsbelastung von 50.000 Kfz/24h/Richtung überschritten wird. Der Nutzen aus der Standstreifenfreigabe steigt mit zunehmender Verkehrsstärke und Verkehrsbelastung rasch und kontinuierlich an (Tabelle 9-9 und Abb. 9-5). Das Maximum wird bei dem höchsten hier betrachteten DTV-Wert von 75.000 Kfz/24h/Richtung erreicht. Der freigegebene vierstreifige Querschnitt kann die Verkehrsnachfrage auch dann noch bewältigen.

In der Praxis wird der hier angegebene Nutzen in dieser Höhe nicht erreicht, da zum einen ein negativer Nutzen durch eine Verschlechterung der Verkehrssicherheit

durch den Wegfall des Standstreifens zu erwarten ist und zum anderen durch Pannen bzw. Unfälle gelegentlich die Standstreifenfreigabe und somit die Kapazitätserhöhung an der Strecke nicht möglich ist. Wie in Kapitel 9.4.4 bereits beschrieben, zeigen Untersuchungen allerdings, dass im Fall der temporären Standstreifenfreigabe diese Nutzenreduktion nur gering ist und sich somit an der prinzipiellen Aussage nichts ändert. Erlauben es die örtlichen Randbedingungen, so stellt die temporäre Standstreifenfreigabe ein erfolgreiches Mittel zur Reduktion von durch Verkehrsüberlastung entstehenden Reisezeitverluste der Verkehrsteilnehmer dar. Allerdings sind auch die Planungs-, Bau- und Betriebskosten deutlich höher als bei einer SBA, die die Funktion der temporären Standstreifenfreigabe nicht enthält.

Ob eine Standstreifenfreigabe überhaupt möglich ist, muss im Einzelfall sorgfältig untersucht werden. Häufig scheitert sie daran, dass für einen kurzen Abschnitt auf oder unter einer Brücke der Standstreifen unterbrochen ist und somit nicht als Fahrstreifen freigegeben werden kann. Ebenso kann der Standstreifen nicht genug tragfähig sein, um als Fahrstreifen (mit dann starker Lkw-Belastung) dienen zu können. Aus diesen Gründen wird das Einsatzfeld der temporären Standstreifenfreigabe auf einzelne spezielle Fälle beschränkt sein, die ein Optimum aus vergleichsweise höheren Kosten und einem möglichen sehr hohen Nutzen darstellen. In einigen Fällen wird es sich dabei auch um Übergangslösungen bis zur Durchführung von Ausbaumaßnahmen handeln.

### **Fallbeispiel A9 München - Nürnberg**

Die im vorigen Kapitel aufgestellte Methodik zur Berechnung der Nutzenkomponenten von SBA wird nachfolgend exemplarisch an einer Beispielstrecke angewandt. Als Strecke wird der bereits in der Untersuchung verwendete Bereich AD Holledau bis AK München-Nord der A9 München – Nürnberg herangezogen.

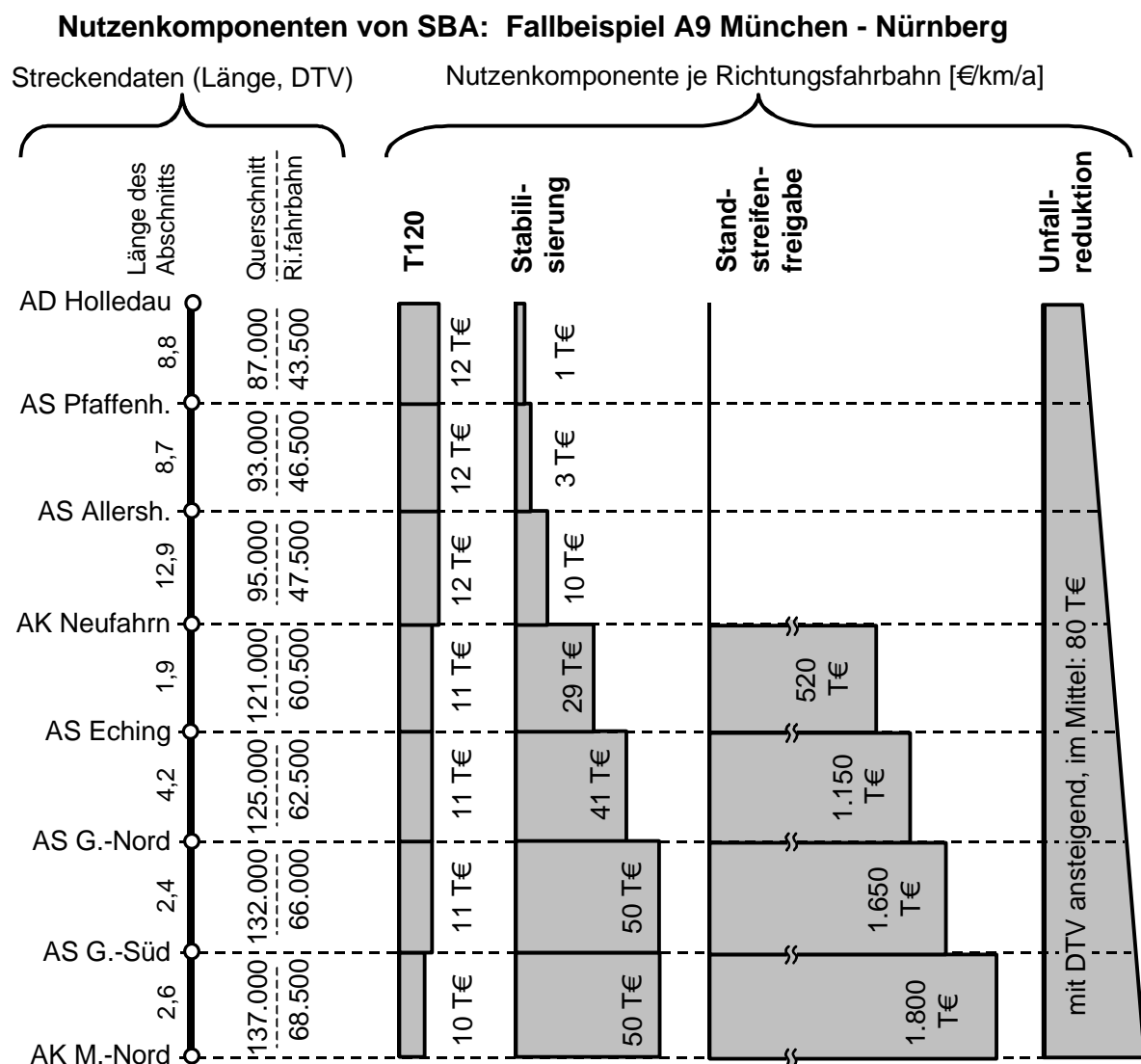
Die Strecke ist als Fallbeispiel gut geeignet, da

- sie über den gesamten Bereich dreistreifig und beinahe eben ist
- sie eine weite Spanne von DTV-Werten abdeckt (insbesondere auch Abschnitte mit sehr hoher Verkehrsbelastung aufweist)
- die berechneten Nutzenkomponenten mit den aus der Auswertung der Messdaten gewonnenen Erkenntnissen verglichen werden können.

Bei dem letzten Punkt ist allerdings eine gewisse Einschränkung zu beachten. Während des Untersuchungszeitraums des vorliegenden Datensatzes (Juli/August 2000) lag die Verkehrsbelastung höher als innerhalb des gesamten Jahreszeitraums (DTV-Werte gemäß der Jahresverkehrszählung, BAST 2000).

Die Ergebnisse für die Berechnung der Nutzenkomponenten sind zusammen mit dem DTV-Wert und der Abschnittslänge in Abb. 9-6 dargestellt. Zu beachten ist,

dass der Nutzen nicht für den ganzen Abschnitt, sondern pro Kilometer für diesen Abschnitt angegeben ist, um die einzelnen Abschnitte besser vergleichen zu können. Weiterhin sei angemerkt, dass die Nutzenkomponente „T120“ und „Standstreifenfreigabe“ als beispielhaft dargestellte Größen zu verstehen sind, da im Rahmen dieser Arbeit nicht geprüft werden kann, ob bei einem Wegfall der SBA eine statische Geschwindigkeitsbegrenzung auf T120 notwendig wäre bzw. ob die örtlichen Gegebenheiten die Standstreifenfreigabe zulassen. Um einen Vergleich mit der bisher in Kosten-Nutzen-Untersuchungen betrachteten Nutzenkomponente „Unfallreduktion“ treffen zu können, ist der an der A9 gemessene Nutzen aus der Unfallreduzierung angegeben (SIEGENER 2000).



**Abb. 9-6:** Darstellung der Nutzenkomponenten einer SBA an dem Fallbeispiel A9 München – Nürnberg (DTV-Werte aus BAST 2000)

Betrachtet man den Verlauf der Nutzenkomponenten mit zunehmender Verkehrsbelastung von AD Holledau bis AK München-Nord, so spiegelt sich die in den vorigen Kapiteln gewonnene Erkenntnis wider, dass mit zunehmender Verkehrsbelastung die Nutzenkomponenten „Stabilisierung“ und „Standstreifenfreigabe“ rasch zuneh-

men und die Nutzenkomponente „SBA statt T120“ annähernd konstant bleibt. Ein erheblicher Nutzen aus der Stabilisierungswirkung tritt erst ab dem AK Neufahrn ein. Der Nutzen in dem Bereich AS Allershausen bis AK Neufahrn ist nicht so groß, wie er bei Betrachtung der Auswertung der Messdaten in diesem Bereich vermutet werden könnte, da die Verkehrsbelastung mit 47.500 Kfz/24h/Richtung über das gesamte Jahr 1999 deutlich geringer ist als die Verkehrsbelastung während des Untersuchungszeitraums (57.500 Kfz/24h/Richtung). Ein Nutzen aus der Standstreifenfreigabe tritt gemäß der Berechnung überhaupt erst mit dem EWS-Bewertungsschema ab dem AK Neufahrn ein. Im Untersuchungszeitraum (Juli/August 2000) traten durch starken Ferienverkehr auch im Bereich AS Allershausen bis AK Neufahrn deutliche Verkehrsüberlastungen auf, die bei einer Standstreifenfreigabe nicht aufgetreten wären .

Das Fallbeispiel zeigt, dass die Berechnung des Nutzens über das EWS-Bewertungsschema für den allgemeinen Fall gültige und realistische Werte ergibt, aber im Einzelfall örtliche Randbedingungen eine Rolle spielen.

Zum Vergleich mit den in dieser Untersuchung ermittelten Nutzenkomponenten, die sich im Hinblick auf den Verkehrsablauf ergeben, ist in Abb. 9-6 die Höhe der Nutzenkomponente aus der Reduktion der Unfallzahlen angegeben. Diese Zahlen entstammen der Untersuchung von SIEGENER (2000) und sind als Mittelwert über die gesamte Strecke und in ihrem prinzipiellen Verlauf (mit zunehmender Verkehrsstärke zunehmender Nutzen) bekannt, da die seltenen Unfallereignisse keine detaillierte Aufschlüsselung zulassen.

Es wird deutlich, dass bei sehr hoher Verkehrsbelastung der Nutzen aus der Stabilisierungswirkung ca. 50% des Nutzens aus der Unfallreduktion erreicht. Somit verbleibt weiterhin die Hauptwirkung von SBA bei der Unfallreduktion, der bisher berücksichtigte Nutzen von SBA wird aber durch eine weitere Komponente erhöht. Findet eine temporäre Standstreifenfreigabe statt, so überragt dieser Nutzen alle anderen Bereiche.

## 10 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

### Ziele, Methodik und Datenbasis

Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit bestand in der Ermittlung und Quantifizierung von Nutzenkomponenten von SBA, die durch eine Verbesserung des Verkehrsablaufs entstehen. Insbesondere sollten kapazitätssteigernde Wirkungen von SBA und die damit verbundenen Reisezeitgewinne für die Verkehrsteilnehmer ermittelt werden.

Als Untersuchungsansatz wurde eine empirische Betrachtung des Verkehrsablaufs gewählt, d.h. es wurden umfangreiche Messdaten des Verkehrsflusses beschafft und ausgewertet. Die Messdaten wurden im Hinblick auf die Kapazität und Leistungsfähigkeit der Strecken sowie auf die Homogenität und Stabilität des Verkehrsflusses analysiert. Über einen Vergleich von beeinflussten Strecken (also Strecken mit SBA) und unbeeinflussten Strecken (also ohne SBA) wurden die Effekte von SBA ermittelt.

Für das Forschungsprojekt konnten Messdaten von 244 Querschnitten an 9 verschiedenen Strecken gewonnen werden. Der Datensatz deckt zahlreiche Einsatzgebiete von SBA ab (zwei- oder dreistreifige Querschnitte, Ballungsraum- oder Verbindungsstrecke, Topografie eben oder hügelig). Von jedem Querschnitt liegen Messdaten des Verkehrsflusses für jeden Fahrstreifen im Zeitintervall von einer Minute über einen Zeitraum von 14 Tagen vor. Bei einigen Querschnitten an beeinflussten Strecken wurden außerdem die Anzeigen der Wechselverkehrszeichen (Schaltzustände) aufbereitet.

In einem ersten Auswerteschritt wurden für die weitere Untersuchung mittels Betrachtung des Lageplans und des q-v-Diagramms 70 Messquerschnitte ausgewählt, die sich aufgrund ihrer Lage und der hohen Verkehrsbelastung als besonders geeignet für Aussagen zur Kapazität darstellen. Diese Querschnitte wurden mit einem automatisierten Auswertalgorithmus auf die Datenqualität überprüft und ausgewertet.

### Ergebnisse der Untersuchung der Kapazität

Basierend auf Erfahrungen früherer Forschungsarbeiten wurde die Kapazität nicht durch die Anwendung eines Verkehrsflussmodells, sondern durch die Betrachtung der maximalen Verkehrsstärke (*emp.  $q_{max}$* ) bestimmt. Bei dieser Untersuchungsmethode muss sichergestellt werden, dass an den betrachteten Querschnitten die Verkehrsnachfrage im Untersuchungszeitraum auch die Kapazität erreicht oder überschritten hat. Dies geschah durch Betrachtung der Punktwolke im instabilen Bereich des q-v-Diagramms. Ist der instabile Bereich deutlich ausgeprägt und weist eine

parabelförmige Einhüllende auf, so liegen Stauzustände als Folge von Verkehrsüberlastungen vor und die Kapazität am Querschnitt wurde überschritten.

Eine Vielzahl von Einflussfaktoren wirkt auf die Kapazität eines Streckenabschnitts ein. Um den Einfluss von SBA durch einen Vergleich verschiedener Strecken bestimmen zu können, müssen alle anderen Randbedingungen (d.h. die Weg-, Umfeld- und Verkehrsbedingungen) möglichst vergleichbar sein. Innerhalb des gewonnenen Datensatzes konnte dies hinreichend genau nur an dem Streckenabschnitt AD Holledau bis AK Neufahrn der A9 München – Nürnberg erfüllt werden. In diesem Bereich liegen sehr gute Vergleichsbedingungen vor, da eine Richtungsfahrbahn mit einer SBA ausgestattet ist und die andere nicht. Bedingt vergleichbar zu diesen Daten ist der Streckenabschnitt AK Brunthal bis AS Bad Aibling der A8 München – Salzburg.

Im Rahmen der Untersuchung fiel auf, dass Strecken mit identischen Randbedingungen bei allen Weg-, Umfeld- und Verkehrsbedingungen immer noch erhebliche Unterschiede in der Kapazität aufweisen. Diese Unterschiede konnten auf den Einfluss der Verkehrsbelastung (im Sinne der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke während des Untersuchungszeitraums) zurückgeführt werden. Bei allen untersuchten Strecken steigt die Kapazität mit zunehmender Verkehrsbelastung und damit mit zunehmender Nähe zum Ballungsraum an. Offensichtlich ändern die Verkehrsteilnehmer mit ansteigender Verkehrsbelastung oder mit zunehmender Nähe zum Ballungsraum ihre Fahrweise in einer Weise, die eine höhere Kapazität der Streckenabschnitte ermöglicht.

Diese Erkenntnis wurde bei dem Vergleich von beeinflussten mit unbeeinflussten Querschnitten berücksichtigt. Aus dem gesamten Datensatz wurden für einen Vergleich nur die Querschnitte verwendet, die ähnliche Weg-, Umfeld- und Verkehrsbedingungen und eine ähnliche Verkehrsbelastung aufweisen. Alle Bedingungen werden von 12 Querschnitten erfüllt, davon sind 9 beeinflusst und 3 unbeeinflusst.

Ein Vergleich der beeinflussten und unbeeinflussten Querschnitte ergibt keine signifikanten Unterschiede bei der Kapazität. Dies gilt sowohl für das üblicherweise betrachtete zeitliche Bezugsintervall von einer Stunde, als auch für kürzere zeitliche Bezugsintervalle von 15 min, 5 min und 1 min. Da allerdings auch bei sorgfältigster Betrachtung der Einfluss der örtlichen Randbedingungen nicht völlig herausgefiltert werden kann, verbleibt bei dieser Aussage eine gewisse Ungenauigkeit. Eine geringe Steigerung (d.h. wenige Prozent) der maximalen Verkehrsstärke durch SBA kann mit der vorliegenden Vergleichsmethode nicht erkannt werden. Sicher ausgeschlossen werden kann nur ein größerer Einfluss von SBA auf die Kapazität. Präzisere Aussagen zu dieser Fragestellung können nur mit einer besseren Datengrundlage erreicht werden, die in Form eines Vorher-/Nachher-Vergleichs oder idealerweise in Form eines speziellen Schalt- und Messprogramm an einer SBA vorliegen.



Eine große Kapazitätssteigerung ist möglich, wenn im Rahmen einer SBA eine temporäre Standstreifenfreigabe erfolgt. Eine Literaturanalyse sowie die Untersuchung eines Streckenabschnitts der A94 im Bereich der Messe München zeigen, dass in der Regel der Standstreifen gut angenommen wird und damit die Kapazität um einen Fahrstreifen ansteigt. Die Möglichkeiten der SBA zur Überwachung und Steuerung des Verkehrsflusses sowie die zeitlich nur seltene Freigabe des Standstreifens sorgen dafür, dass die Reduktion der Verkehrssicherheit durch den Wegfall des Standstreifens nur minimal ist. Die temporäre Standstreifenfreigabe besitzt also erhebliches Potential in der Stauvermeidung durch effizientes Ausnutzen der Infrastruktur.

### **Ergebnisse der Untersuchung der Leistungsfähigkeit**

Mit dem Begriff Leistungsfähigkeit wird die Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Verkehrsstärke beschrieben. Dieser Zusammenhang wird durch die q-v-Funktion beschrieben, die durch Anwendung eines Verkehrsflussmodells ermittelt wird. Bei der vorliegenden Untersuchung werden das lineare und das quadratische Modell bei der Beschreibung des stabilen Verkehrsablaufs und das nicht-lineare Zeitlückenmodell bei der Beschreibung des instabilen Verkehrsablaufs angewandt.

Der Vergleich der q-v-Funktionen verschiedener Streckenabschnitte zeigt, dass sich die Problematik der Vergleichbarkeit verschiedener Querschnitte noch größer darstellt als bei dem Vergleich der Kapazität. Örtliche, objektiv kaum beschreibbare, Gegebenheiten bewirken erhebliche Unterschiede im Geschwindigkeitsniveau des Verkehrsflusses.

Ein Vergleich der beeinflussten Strecken mit den unbeeinflussten Strecken zeigt keine signifikanten Unterschiede bei der Leistungsfähigkeit. Wegen der verbleibenden Ungenauigkeit des Vergleichs kann, ebenso wie bei der Untersuchung der Kapazität, eine geringe Steigerung der Leistungsfähigkeit nicht sicher erkannt werden, ein bedeutender Effekt jedoch ausgeschlossen werden.

Diese Aussage stellt sich anders dar, wenn durch die Ausrüstung einer Strecke mit einer SBA eine vorhandene statische Geschwindigkeitsbeschränkung wegfällt. In diesem Fall stellen sich im Bereich des freien Verkehrsablaufs Reisezeitgewinne bei den Verkehrsteilnehmern ein.

### **Ergebnisse der Untersuchung der Harmonisierungswirkung**

Die Harmonisierungswirkung von SBA wurde nicht als eigenständige Nutzenkomponente untersucht, sondern zur Erklärung der Wirkungsweise von SBA. Dazu wurden die Ergebnisse früherer Forschungsarbeiten zusammengestellt und eigene Untersuchungen zur Verteilung des Verkehrs auf den Fahrstreifen sowie zur Auswirkung des Lkw-Überholverbots durchgeführt.

Ein Vergleich der beeinflussten Strecken mit den unbeeinflussten Strecken zeigt signifikante Unterschiede bei der Verteilung des Verkehrs auf den Fahrstreifen. Bei den beeinflussten Strecken ist die Verteilung im Mittel gleichmäßiger. Insbesondere reduzieren SBA den Linksfahrer-Effekt, d.h. die Spitzenverkehrsstärken auf dem linken Fahrstreifen werden zu Gunsten einer besseren Auslastung des mittleren und rechten Fahrstreifens reduziert.

### **Ergebnisse der Untersuchung der Stabilisierungswirkung**

Mit einer Betrachtung der Kapazität und der Leistungsfähigkeit von Strecken werden nicht alle möglichen Wirkungsmechanismen von SBA erfasst, die einen Nutzen bei der Verbesserung des Verkehrsablaufs bewirken können. Aus der Messung von Stauzeiten sind aus früheren Forschungsarbeiten Hinweise für eine Stabilisierungswirkung des Verkehrsflusses durch SBA bekannt. Bislang fehlt allerdings eine Quantifizierung dieser Wirkung.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde eine Methodik zur Beschreibung der Stabilität eines Verkehrsflusses entwickelt und an zahlreichen Querschnitten angewandt. Der Grundansatz besteht in der Definition des *signifikanten Verkehrszusammenbruchs*, der ein Umschlagen des Verkehrs vom stabilen in den instabilen Zustand beschreibt. Umfangreiche Analysen zu Phasen und Phasenübergängen des Verkehrs wurden durchgeführt, um die signifikanten Verkehrszusammenbrüche von den zufälligen Schwankungen im Verkehrsfluss abzugrenzen. Basierend auf früheren Erkenntnissen und auf Parameterstudien am Datensatz wurde ein signifikanter Verkehrszusammenbruch als das Absinken der Geschwindigkeit um mindestens 15 km/h innerhalb von 5 Minuten definiert, wobei sich der Verkehrsfluss vor dem Zusammenbruch im stabilen Bereich ( $v > 75$  km/h) und nach dem Zusammenbruch im instabilen Bereich ( $v < 85$  km/h) befinden muss. Eine gleitende Mittelwertbildung vermeidet den Einfluss unbedeutender Schwankungen im Verkehrsablauf. Für die weitere Auswertung spielt die Verkehrsstärke zu Beginn des Verkehrszusammenbruchs eine Rolle. Die Verkehrsstärken der ermittelten Verkehrszusammenbrüche werden in Verkehrsstärkeklassen zusammengefasst. Schließlich wird die Anzahl der Verkehrszusammenbrüche durch die Anzahl der aufgetretenen Verkehrsstärkeklassen dividiert, um die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs in Abhängigkeit der Verkehrsstärke zu bestimmen.

Ein Vergleich zeigt, dass an den beeinflussten Querschnitten eine deutlich geringere Zusammenbruchswahrscheinlichkeit vorliegt als an den unbeeinflussten Querschnitten. SBA verringern also die Wahrscheinlichkeit eines Umschlagens des Verkehrs vom stabilen in den instabilen Bereich. Somit kann von einer Stabilisierungswirkung gesprochen werden. Der Verkehrsfluss verbleibt also bei Verkehrsstärken nahe der Kapazitätsgrenze an Strecken mit SBA länger im stabilen Bereich. Damit verbunden sind Reisezeitersparnisse für die Verkehrsteilnehmer.

Eine Detailanalyse der Verkehrszusammenbrüche zeigt, dass diese an unbeeinflussten Querschnitten überwiegend vom linken Fahrstreifen ausgehen, nachdem auf diesem sehr hohe Verkehrsstärken bzw. Verkehrsdichten aufgetreten sind. Dies zeigt sich darin, dass auf dem linken Fahrstreifen die Geschwindigkeit stark absinkt, während auf dem rechten Fahrstreifen der Verkehr noch fließt. Bei den beeinflussten Querschnitten tritt ein langsames und deutlich gleichmäßigeres Absinken der Geschwindigkeit auf. Der Verkehrsfluss kann in einen Verkehrszustand übergehen, der in einem Geschwindigkeitsniveau von 60 – 80 km/h über einen sehr langen Zeitraum von mehreren Stunden sowohl zeitlich als auch räumlich außerordentlich synchron ist. Dieser Verkehrszustand ist sehr stabil.

Basierend auf diesen Erkenntnissen werden Vorschläge zur Optimierung der Stabilisierungswirkung von SBA gegeben. Da Kurzzeitprognosen des Verkehrsflusses sehr schwierig sind, folgen bei der verkehrsabhängigen Steuerung SBA häufig dem Verkehrsfluss eher nach, als dass ihn aktiv zu beeinflussen. Dem damit verschenkten Wirkungspotential kann durch die Überlagerung der verkehrsabhängigen Steuerung mit einem Festzeitprogramm begegnet werden. Das Festzeitprogramm könnte an Strecken, an denen die Verkehrsentwicklung aufgrund der Regelmäßigkeit vorhergesagt werden kann (z.B. Berufsverkehr) vorbeugend harmonisierende Geschwindigkeitsbeschränkungen (T100 und T120) schalten. Das Festzeitprogramm sollte sehr sorgfältig mit der Entwicklung der Verkehrsstärke abgestimmt sein. Damit wäre sichergestellt, dass die Geschwindigkeitsbegrenzungen nur bei sehr hohen Verkehrsstärken geschaltet werden und somit keine Akzeptanzprobleme bei den Verkehrsteilnehmern hervorgerufen werden. Flankierende Maßnahmen wie Informationskampagnen (z.B. Hinweisschilder) und Geschwindigkeitsüberwachungen können die Wirkung weiter steigern.

### **Monetäre Bewertung der Wirkungen**

Zur Berücksichtigung der ermittelten Nutzenkomponenten bei Investitionsentscheidungen wurden die ermittelten Wirkungen verallgemeinert und unter Verwendung des EWS-Bewertungsschemas monetarisiert. Es wurden ausschließlich die Wirkungen der Reisezeitersparnisse betrachtet, da die Auswirkungen bei den Schadstoffen, der Klimabelastung und den Betriebskosten vernachlässigbar gering sind und die Auswirkung auf die Lärmsituation im Einzelfall betrachtet werden muss.

Die Berechnung des Nutzens erfolgte für einen fiktiven Streckenabschnitt von 1 km Länge, der den Randbedingungen der Untersuchung entspricht (dreistreifiger Querschnitt mit Längsneigung von < 2% und Lkw-Anteil von 15%). Für diesen fiktiven Streckenabschnitt wird der volkswirtschaftliche Nutzen der Reisezeitersparnisse ermittelt. Da der Nutzen wesentlich von der Verkehrsbelastung (DTV) abhängt, werden Angaben für verschiedene DTV-Werte gegeben.

Als Nutzenkomponenten ergeben sich im einzelnen:

- Wegfall einer statischen Geschwindigkeitsbegrenzung bei Installation einer SBA  
Für die in der Realität vorkommende Begrenzung T120 ist die Höhe dieser Nutzenkomponente vergleichsweise gering. Da sie im Bereich des freien Verkehrsflusses wirkt, tritt sie schon bei geringen DTV-Werten auf.
- Stabilisierung des Verkehrsflusses durch SBA  
Diese Nutzenkomponente tritt auf, wenn die Verkehrsstärke in die Nähe der Kapazität kommt. Dies ist bei dreistreifigen Querschnitten bei einem DTV ab 90.000 Kfz/24h bzw. bei einer Verkehrsstärke ab 4.000 Kfz/h der Fall. Ein erheblicher Nutzen entsteht ab 110.000 Kfz/24h bzw. ab 5.000 Kfz/h.
- temporäre Standstreifenfreigabe in Verbindung mit SBA  
Die große Steigerung der Kapazität durch die Erweiterung des Querschnitts um einen Fahrstreifen bewirkt einen sehr hohen Nutzen. Dieser setzt bei dreistreifigen Querschnitten ab einem DTV von 100.000 Kfz/24h ein und überragt bei sehr hohen DTV-Werten von >120.000 Kfz/24h alle anderen Nutzenkomponenten (auch die der Senkung der Unfallzahlen). Diese Maßnahme ist allerdings ungleich aufwendiger umzusetzen, da in der Regel bauliche Maßnahmen notwendig werden.

## Schlussfolgerungen

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass SBA in verschiedener Weise über eine Verbesserung des Verkehrsablaufs Reisezeitersparnisse bei den Verkehrsteilnehmern erbringen. Treten an einer Strecke hohe Verkehrsbelastungen auf, d.h. erreicht oder überschreitet die Verkehrsstärke regelmäßig die Kapazitätsgrenze, resultiert ein erheblicher volkswirtschaftlicher Nutzen. Dieser Nutzen erreicht in der Größenordnung den bisher berücksichtigten Nutzen aus der Senkung der Unfallzahlen und sollte bei zukünftigen Investitionsentscheidungen berücksichtigt werden.

Mit betrieblichen Maßnahmen können Stausituationen entschärft werden. Dies sollte insbesondere dann in Betrachtung gezogen werden, wenn bauliche Maßnahmen aus finanziellen Gründen nicht (oder erst in ferner Zukunft) möglich sind. Wird eine Strecke nur selten verkehrlich überlastet (z.B. im Urlauberverkehr oder bei Großveranstaltungen), so sollte aus Wirtschaftlichkeitsgründen die Kapazitätssteigerung einer temporären Standstreifenfreigabe schon im Planungsstadium integrativ berücksichtigt werden.

Grundsätzlich ist darauf hinzuweisen, dass mit optimierten Steueralgorithmen, sowie verbesserter Information aber auch verstärkter Überwachung der Verkehrsteilnehmer das Wirkungspotenzial von SBA weiter gesteigert werden könnte.

**LITERATURVERZEICHNIS**

- ARNOLD, M.: Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsuntersuchung einer befristeten Umnutzung von Standstreifen an BAB für Zwecke des fließenden Verkehrs, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 820, Bundesministerium für Verkehr, Bonn 2001
- AUTOBAHNAMT FRANKFURT: Verkehrsbeeinflussungsanlage A 5, Bad Homburg – Frankfurt - verkehrstechnische Untersuchung, Hessische Straßenbauverwaltung, Frankfurt 1990
- AUTOBAHNAMT THÜRINGEN: Verkehrsbeeinflussungsanlage auf der BAB A4 im Leutratatal - Bürgerinformation, Autobahnamt Thüringen, SSP-Consult, Signalbau Huber, 1999
- AUTOBAHNDIREKTION SÜDBAYERN: A 8 München-Salzburg, Streckenbeeinflussungsanlage zwischen der AS Grabenstätt und der Bundesgrenze München, Informationsblatt, 2000
- AUTOBAHNDIREKTION SÜDBAYERN: A99 Autobahnring München, Verkehrsbeeinflussung mit zeitweiliger Standstreifenfreigabe, Informationsblatt, 2001
- BALZ, W.: Wirkungen kollektiver Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Seite 301 bis 307 der Straßenverkehrstechnik 7/1995
- BUNDESANSTALT FÜR STRAßENWESEN (bast), 2000: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 1999, Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen, von S. Laffont, G. Nierhoff und G. Schmidt, Heusch-Boesefeldt, Reihe: Verkehrstechnik, Heft V 84
- BMVBW: Moderne Verkehrstechnik für die A100, Pressemitteilung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen auf der Webseite [www.bmvbw.de](http://www.bmvbw.de), 18. September 2001
- BMVBW (Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen): Programm zur Verkehrsbeeinflussung auf Bundesautobahnen, auf der Webseite [www.bmvbw.de](http://www.bmvbw.de), Berlin 2002
- BODE, K.-R. und W. HALLER: Geschwindigkeitssteuerung auf der A7 zwischen den Autobahndreiecken Hannover-Nord und Walsrode, Seite 145 bis 151 der Straßenverkehrstechnik 5/1983
- BUNDESAMT FÜR STRAßEN (SCHWEIZ): Verkehrslenkungsmaßnahmen am Gotthard - Stautwicklung Sommer 2001, Artikel von R. Siegrist, O. Michaud, A. Gantenbein und E. Frei, auf der Webseite des Bundesamts [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch), Bern 2001

- CREMER, M.: Der Verkehrsfluss auf Schnellstraßen, Springer-Verlag, 1979
- DEPARTEMENT OF TRANSPORTATION, NORTH CAROLINA: Operational Guidelines for the use of Changeable Message Signs, Traffic Operations Group, Departement of Transportation, North Carolina 1999  
(<http://www.doh.dot.state.nc.us/preconstruct/traffic/congestion/docs/cmsopera.pdf>)
- DREWS, O.: Verkehrliche Auswirkungen der Anordnung von Überholverböten für LKW auf Autobahnen, Heft 15 der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum 1996
- EDIE L.C.: Car following and steady-state theory for non-congested traffics. Opens. Res 9 (1961) in R. Lapierre und G. Steierwald, Verkehrsleittechnik für den Straßenverkehr, Springer-Verlag 1987
- EWS: Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (Entwurf), Aktualisierung der RAS-W 86, Ausgabe 1997 bzw. Kommentar zu den Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (Entwurf), FGSV, 1997
- FÄRBER B. und B. FÄRBER: Akzeptanz von Wechselverkehrszeichen im Einsatz von SBA, Zwischenbericht im FE 03.321 (BAST), Institut für Arbeitswissenschaft, Universität der Bundeswehr München 2000
- FERRARI, P.: The Control of Motorway Reliability, Transportation Research, Vol. 25A, No. 6, p. 419-427, 1991
- FGSV: Begriffsbestimmungen, Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb, FGSV e.V., Köln 2000
- GREENSHIELDS, B.D.: A study in highway capacity. Highway Research Board. Proc. 14 (1935) in R. Lapierre und G. Steierwald, Verkehrsleittechnik für den Straßenverkehr, Springer-Verlag 1987
- HBS (Entwurf 1994): Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufs auf Straßen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 669, Bundesministerium für Verkehr, Bonn 1994
- HBS (Entwurf 1998): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen, Schlussbericht Juli 1998 (Druckfassung vom April 1999), Prof. Brilon, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen 1999
- HBS (Ausgabe 2001): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V, Köln 2001
- HCM: Highway Capacity Manual, Special Report 209, Third Edition, Transportation Research Board, Washington D.C. 1998
- HEIDEMANN D. und R. HOTOP: Verteilung der Pkw-Geschwindigkeiten im Netz der Bundesautobahnen – Modellmodifikation und Aktualisierung, Straße und Autobahn, Heft 3, 1990

- HERZ et. al.: Angewandte Statistik für Verkehrs- und Raumplaner, 2. Auflage, Werner-Verlag, Düsseldorf 1992
- HOOGEDORN, S.: Multiclass continuum modelling of multilane traffic flow, Ph.D. thesis, Delft University Press 1999
- HOOPS M., KATES R. und H. KELLER: Bewertung von Verfahren zur Erkennung von Störungen im Verkehrsablauf in Theorie, Praxis und Simulation, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 797, Bundesministerium für Verkehr, Bonn 2000
- HUBER, M.: Analyse von Schwellenwerten zur Schaltung von Wechselverkehrszeichen, Studienarbeit am Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik, Universität Stuttgart 2002
- HOFFMANN-LEICHTER: Untersuchung der Auswirkung der Verkehrsbeeinflussungsanlage auf der A5 Freidberg – Frankfurt auf Verkehrsablauf, Verkehrssicherheit und Reisezeit, Schlussbericht, 1997
- KELLER, J.: Streckenbeeinflussungsanlagen – Vergleich internationaler Aktivitäten, Seminararbeit, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart 2002
- KERNER, B.: Traffic Flow: Experiment and Theory, in: Workshop on Traffic and Granular Flow '97, Universität Duisburg, edited by M. Schreckenberg and D.E. Wolf, Springer Verlag 1998
- KERNER, B: Theory of breakdown Phenomenon at Highway Bottlenecks, Paper No. 00-1573, Transportation Research Board, 79<sup>th</sup> Annual Meeting, Washington D.C. 2000
- KIENZLE, J.: Analyse von Einzelfahrzeugdaten - Verkehr verstehen, Diplomarbeit, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart, 2001 (<http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2001/958/>)
- KIM Y. und H. KELLER: Zur Dynamik zwischen Verkehrszuständen im Fundamentaldiagramm, Seite 433 bis 442 Straßenverkehrstechnik 9/2001
- KIM, Y.: Online Traffic Flow Model Applying Dynamic Flow-Density Relations, Dissertation, Fachgebiet für Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, TU München 2002
- KRAMER, C.: Straßenverkehrsordnung (StVO), Kommentar, 21. Aktualisierung, Luchterhand Verlag, Kriftel, 2001
- KRAUSE, S.: Verkehrsbeeinflussung auf dem Transeuropäischen Straßennetz, Seite 308 bis 310 der Straßenverkehrstechnik 7/1995

- KÜHNE, R.D. Neue Ansätze zur Beschreibung des Verkehrsablaufs auf Schnellstraßen, FGSV (1984) und Macroscopic Freeway Model for Dense Traffic, 9th International Symposium on Transport and Traffic Theory (1984) in ZACKOR ET. AL. (1986)
- KÜHNE, R.D.: Freeway Control Using a Dynamic Traffic Flow Model and Vehicle Reidentification Techniques, Transportation Research Record, No. 1320, TRB, Washington D.C. 1991
- KÜHNE, R.D.: Auswirkungen der Verkehrsleittechnik auf die Rentabilität von Projekten der Bundesverkehrswegeplanung, Kolloquium Universität Stuttgart, 1997
- KÜHNE, R.D. et. al: Auswirkungen von telematischer Beeinflussung verkehrsinfrastruktueller Kapazitäten auf die volkswirtschaftliche Rentabilität von Projekten der Bundesverkehrswegeplanung, Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Stuttgart 1999
- KÜHNE, R. D. und N. ANSTETT: "New Methods for Determining Critical Sections on Freeways", Transportation Research Board, Annual Meeting, Washington D.C., January 1997
- LANGE D. und R. STRUIF: Fahrerverhalten im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen, Seite 384 bis 391 der Straßenverkehrstechnik 8/1997
- LAPIERRE, R. und G. STEIERWALD: Verkehrsleittechnik für den Straßenverkehr, Band 1 und 2, Springer-Verlag 1987
- LEMKE, K: Verkehrsablauf in Tunneln und dessen Auswirkungen auf die Wahl des Tunnelquerschnitts, Heft 22 der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, 2000
- LEMKE, K. und K. MORITZ: Freigabe von Seitenstreifen auf Bundesautobahnen, Beiträge zum Erfahrungsaustausch am 20. Juni 2001 in der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 94 der Reihe „Verkehrstechnik“ der Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 2001
- LEUTZBACH, W.: Auswertung bisheriger deutscher praktischer und theoretischer Untersuchungen zum Verkehrsablauf auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen mit Berücksichtigung unterschiedlicher Verkehrsvorschriften, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 729, Bundesministerium für Verkehr, Bonn 1993
- LORENZ M. UND L. ELEFTERIADOU: A Probabilistic Approach to Defining Freeway Capacity and Breakdown, Fourth International Symposium on Highway Capacity, Transportation Research Board June 2000, Hawaii  
im Internet: [http://www.nas.edu/trb/publications/ec018/08\\_52.pdf](http://www.nas.edu/trb/publications/ec018/08_52.pdf)



- MAHNKE, R., I. LUBASHEVSKY, P. WAGNER und S. KALENKOV: Long-lived states in synchronized traffic flow. Empirical prompt and dynamical trap model. Bibliothek "ArXiv", <http://arxiv.org/cond-mat/0112139>, Universität Rostock (Germany) und Russian Academy of Sciences (Moscow), 2002
- MARZ: Merkblatt zur Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen, Bundesanstalt für Straßenwesen, Entwurf 1997
- MANGOLD M., K. TRÄGER und A. LINDENBACH: Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Umfelddatenerfassung, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 729, Bundesministerium für Verkehr, Bonn 1996
- MATTHEIS, C.: Auswirkungen der Umnutzung von BAB-Standstreifen, Heft V 94 der Reihe „Verkehrstechnik“ der Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 2001
- MAY, A.D. und KELLER H.M.: Evaluation of single-and-two-Regime Traffic Flow Models, Proceedings of the third International Symposium on Transportation and Traffic Theorie, Karlsruhe (1968) in KIM Y. und H. KELLER: Zur Dynamik zwischen Verkehrszuständen im Fundamentaldiagramm, Seite 433 bis 442 Straßenverkehrstechnik 9/2001
- NEUBERT et. al.: Single-vehicle data of highway traffic – a statistical analysis, elektronische Bibliothek "ArXiv", <http://arxiv.org/cond-mat/9905216>, Theoretische Physik/FB 10, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, 2002
- PONZLET, M. : Auswirkungen von systematischen und umfeldbedingten Schwankungen des Geschwindigkeitsverhaltens und deren Beschreibung in Verkehrsflussmodellen, Heft 16 der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum 1996
- RLS-90: Richtlinie für den Lärmschutz an Straßen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 1990
- RWVZ bzw. RWVA: Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen (RWVZ) bzw. Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen (RWVA), Bundesanstalt für Straßenwesen, Ausgabe 1997
- SACHSE, T.: Einfluss des Bezugsintervalls in Fundamentaldiagrammen auf die zutreffende Beschreibung der Leistungsfähigkeit von Straßenabschnitten, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 614, Bundesministerium für Verkehr, Bonn 1992
- SCHAECHTERLE et. al.: Verkehrsstauungen auf Autobahnen – Auswirkungen auf Kraftstoffbedarf und Betriebskosten, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 536, Bundesministerium für Verkehr, Bonn 1988

- SCHNABEL W. und D. LOHSE: Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Seite 82 des Band 1 (Verkehrstechnik), Verlag für Bauwesen, Berlin 1997
- SHELL GMBH: Shell Pkw-Szenarien: Mehr Autos weniger Verkehr? Szenarien des Pkw-Bestands und der Neuzulassungen in Deutschland bis zum Jahr 2020, Deutsche Shell GmbH, (auch im Internet unter [www.shell.de](http://www.shell.de)), Hamburg 2001
- SIEGENER et. al: Unfallgeschehen im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Verkehrsbelastung, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 787, Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen, Bonn 2000
- STIEBER W. SCHÖNHARTING UND PARTNER GMBH / BMW AG: Analyse über die Auswirkungen der Linienbeeinflussungsanlage auf der BAB A 9, München 1994
- SSP-CONSULT: Ermittlung und Bewertung der Nutzenkomponenten von Streckenbeeinflussungsanlagen im Hinblick auf den Verkehrsablauf, Schlussbericht des FE 03.326/1999/IGB, Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik Universität Stuttgart, München / Stuttgart 2001
- STÖCKER K. und S. TRUPAT: Der Einfluss einer Zuflussregelung an Anschlussstellen auf die Verbesserung des Verkehrsflusses auf Autobahnen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 802, Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen, Bonn 2001
- STEINHOFF C., B. THORMANN und F. GLAS: A8 West: Verkehrliche Auswirkungen nach Anordnung einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 120 km/h und eines Überholverbots für Lkw und Gespannfahrzeuge sowie deren Kombination, Forschungsprojekt im Auftrag der ABD Südbayern, Fachgebiet für Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, TU München 2000
- STEINHOFF ET. AL.: Problematik präventiver Schaltungen von Streckenbeeinflussungsanlagen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 853, Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen, Bonn 2002
- SPARMANN I.: Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 263, Bundesministerium für Verkehr, Bonn 1978
- TIEFENTHALER H. und P. BRUNNER: Verkehrslautstärke beeinflusst erlaubte Höchstgeschwindigkeit, in: Internationales Verkehrswesen Nr. 10, Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg 2000
- TLS: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, Ausgabe 1993, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Dokumentations-Sammlung NR. S 1078, Verkehrsblatt Verlag 1993

- TRANSPORTATION RESEARCH LABORATORY (TRL): M25 Controlled Motorways Monitoring – Final Report, by N. Taylor, T. Rees, K. Bryan Brown, P. Abbott, N. Abou-Rahmen and P. Still for Engineering Policy Division, Highways Agency, © TRL, Berkshire 1997
- UMWELTBUNDESAMT: Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen, Reihe TEXTE Nr. 33/1999, im Internet unter [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)
- WU, N.: Verkehr auf Schnellstraßen – Ein neues Modell und seine Anwendungen, Seite 378 bis 386, Straßenverkehrstechnik 8/2000
- ZACKOR, H. UND G. SCHWENZER: Beurteilung einer situationsabhängigen Geschwindigkeitsbeeinflussung auf Autobahnen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 532, Bundesverkehrsministerium, Bonn 1988
- ZACKOR, H.: Beurteilung verkehrsabhängiger Geschwindigkeitsbegrenzungen auf Autobahn, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 128, Bundesverkehrsministerium, Bonn 1972
- ZACKOR ET. AL: Untersuchungen des Verkehrsablaufs im Bereich der Leistungsfähigkeit und bei instabilem Fluss, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 524, Bundesministerium für Verkehr, Bonn 1988

## Begriffs- und Abkürzungsverzeichnis

AQ	Anzeigequerschnitt
beeinflusste bzw. unbeeinflusste Strecke	mit bzw. ohne SBA ausgestatteter Streckenabschnitt
BMV bzw. BMVBW	Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen
BVWP	Bundesverkehrswegeplanung
DTV	durchschnittliche, tägliche Verkehrsstärke gemittelt über das ganze Jahr. Wird üblicherweise angegeben für den Gesamt-Querschnitt, hier in manchen Fällen abweichend für Richtungsfahrbahnen (entsprechend gekennzeichnet)
emp. $q_{\max}$	empirische, maximale Verkehrsstärke
EWS	Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
HCM	Highway Capacity Manual
Kapazität	größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom bei gegebenen Weg- und Verkehrsbedingungen im betrachteten Querschnitt erreichen kann
k	Verkehrsdichte [Fahrzeuge / Weg]
k-Faktor	Faktor zur Umrechnung von Jahresverkehrsstärken in stündliche Verkehrsstärken (EWS)
Leistungsfähigkeit	Maximaler Wert der Verkehrsleistung, wobei gilt: Verkehrsleistung: Verkehrsarbeit je Zeiteinheit Verkehrsarbeit: Verkehrselemente * Wegstrecke
MARZ	Merkblatt zur Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen
Mit-SBA-Querschnitt/ Ohne-SBA-Querschnitt	Messquerschnitt, der sich an einer Richtungsfahrbahn mit SBA bzw. an einer Richtungsfahrbahn ohne SBA befindet
MQ	Messquerschnitt
p	Lkw-Anteil [%]
Querschnitt	Ort entlang einer Strecke, an dem Messdaten des Verkehrsflusses (Messquerschnitt) oder Anzeigedaten der WVZ (Anzeigequerschnitt) aufgezeichnet werden. Querschnitte sind im Rahmen dieser Untersuchung in der Regel auf eine Richtungsfahrbahn bezogen.
$q_B$	Bemessungsverkehrsstärke (nach MARZ)
$q_{\text{mittel}}$	durchschnittliche Verkehrsbelastung [Kfz/Tag] eines Querschnitts einer Richtungsfahrbahn während des Untersuchungszeitraums
q-v-Funktion	Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Verkehrsstärke
RLS-90	Richtlinie zum Lärmschutz an Straßen, Ausgabe 1990
RWVA	Richtlinie für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen
RWVZ	Richtlinie für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen
SBA	Streckenbeeinflussungsanlage
StVO	Straßenverkehrsordnung
TLS	Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen

---

Typ-A-WVZ	Geschwindigkeitsbegrenzung
Typ-B-WVZ	Anordnungen (Lkw-ÜV) und Gefahrenwarnung
TYP-C-WVZ	Text-Zusatzzeichen
T80, T100, T120	Geschwindigkeitsbegrenzung (Tempobeschränkung)
Schaltzustand	Gesamtheit der von einer SBA angezeigten Wechselverkehrszeichen
StVO	Straßenverkehrsordnung
v	Geschwindigkeit [km/h]
$V_{\text{frei}}$	mittlere Geschwindigkeit im freien Verkehrsfluss
$V_{\text{lok}}$	mittlere Geschwindigkeit aus lokaler Messung
$V_{\text{mom}}$	mittlere Geschwindigkeit aus momentaner Messung
$V_{\text{opt}}$	optimale Geschwindigkeit (mit maximaler Verkehrsstärke)
$V_{15}, V_{85}$	Geschwindigkeit, die 15% der Fahrer unterschreiten, bzw. 85% der Fahrer nicht überschreiten
VBA	Verkehrsbeeinflussungsanlage
Verkehrsbelastung	durchschnittliche Verkehrsbelastung [Kfz/Tag] während des Untersuchungszeitraums
VBA	Verkehrsbeeinflussungsanlage
WVZ	Wechselverkehrszeichen
WVZA	Wechselverkehrszeichenanlage

# Anhang

## Beschreibung und Lagepläne der untersuchten Strecken

### dreistreifige Strecken mit SBA:

A9	München – Holledau .....	Seite A-2
A99/A8 Ost	Brunnthal – Bad Aibling .....	Seite A-5

### zweistreifige Strecken mit SBA:

A4	Leutatal .....	Seite A-9
A8	AS Grabenstätt bis Landesgrenze .....	Seite A-10
A44	Dortmund – Soest .....	Seite A-11

### 2- bzw 3-streifige Strecken mit SBA

A94	Steinhausen – Parsdorf .....	Seite A-12
A99/A8 West	Eschenrieder Spange .....	Seite A-14

### 2-streifige Strecken ohne SBA (Referenzquerschnitte)

A8 West	Ulm – München .....	Seite A-16
---------	---------------------	------------

### **Hinweise zum Anhang :**

Für alle Strecken sind Angaben zur Trassierung, zu den verkehrlichen Gegebenheiten und zu den örtlichen Verhältnissen gegeben. Tabellarisch ist angegeben, welche Querschnitte zur Auswertung herangezogen wurden. Ein Lageplan ist aus Platzgründen nur für die wichtigsten Strecken dargestellt. Ihm können die Lage der Mess- und Anzeigequerschnitte entnommen werden.

<b>Streckenbeeinflussungsanlage A9 München - Holledau</b>
---

Beschreibung der Strecke:

Bundesland:	Bayern
Lage im Netz:	Verbindungsstrecke / Ballungsraumstrecke
Querschnitt:	dreistreifig (vor Autobahnende kurzer zweistreifiger Bereich)
Topografie:	weitgehend eben
Verkehrsbelast.:	45.000 – 75.000 Kfz/Tag

Beschreibung der SBA:

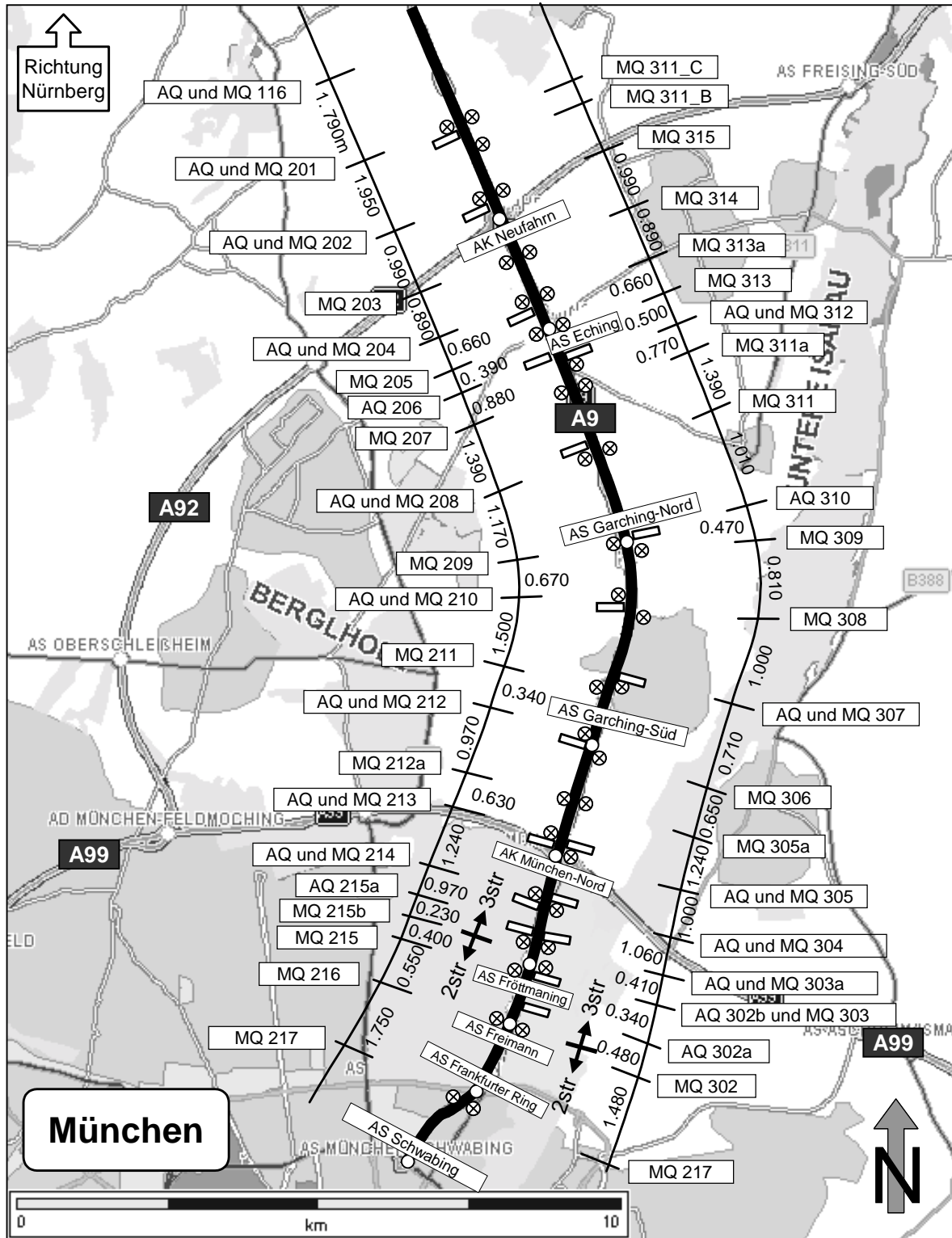
Auf der A9 wurde 1992 auf einer Länge von ca. 40 km von AD Holledau bis Autobahnende München-Schwabing in Fahrtrichtung München und auf einer Länge von ca. 10 km von Autobahnbeginn bis AK Neufahrn in Fahrtrichtung Nürnberg eine SBA in Betrieb genommen. Da der Streckenabschnitt verkehrlich sehr hoch belastet ist (häufige Staus) und durch häufige Nebelbänke gefährliche Witterungsbedingungen existieren, wurde die SBA mit den Zielen der Erhöhung der Sicherheit und Leistungsfähigkeit installiert. Die SBA umfasst ein sehr umfangreiches System zur Datenerfassung mit 58 Messquerschnitten für Verkehrsdaten, 10 Messstellen für Witterungs- und Fahrbahnbedingungen und 55 Messstellen für die Sichtweite [SIEGENER et. al 2000].

Datengrundlage und Untersuchungsumfang

Untersuchung	Messquerschnitt
q-v-Diagramm (Beurteilung verkehrliche Überlastung)	<b>Richtung München:</b> 101_Mch, 105_Mch, 113, 115, 116, 201, 207, 208, 210, 217 <b>Richtung Nürnberg:</b> 303a , 311, 311a, 311_B, 311_C, 316, 316_B, 316_C, 316_D, 105, 105_B, 101, 101_B, 101_C
Auswertungen zu Kapazität und Harmonisie- rung	<b>Richtung München:</b> 101_Mch, 105_Mch, 113, 115, 116, 201, 207, 208, 210 <b>Richtung Nürnberg:</b> 311, 311a, 311_B, 311_C, 316, 316_B, 316_C, 316_C, 105, 105_B, 101, 101_B
Auswertungen zu Schaltzu- ständen	<b>Richtung München:</b> AQ 101, AQ 113, AQ 115, AQ 116, AQ 206, AQ 210 <b>Richtung Nürnberg:</b> AQ 310

### Streckenbeeinflussungsanlage A9 München – Holledau

Lageplan für den Bereich Autobahnende München-Schwabing bis AK Neufahrn



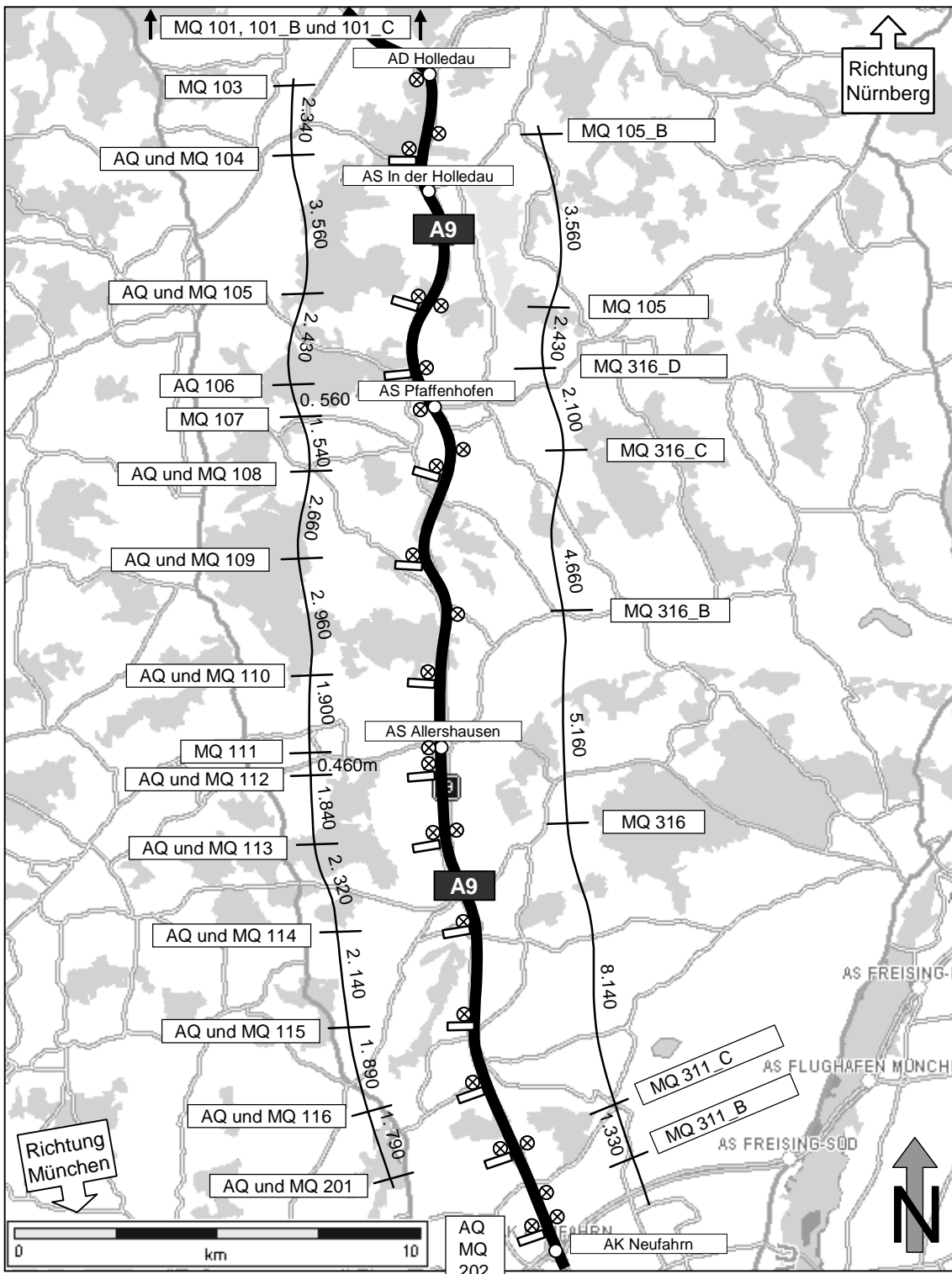
<b>Legende</b>		Messquerschnitt (MQ)
		Anzeigequerschnitt (AQ)

*Kartengrundlage:  
DT info & Route ©1998*



### Streckenbeeinflussungsanlage A9 München – Holledau

Lageplan für den Bereich AK Neufahrn bis AD Holledau



**Legende**

- Messquerschnitt (MQ)
- Anzeigequerschnitt (AQ)

*Kartengrundlage:  
DT info & Route ©1998*

<b>Streckenbeeinflussungsanlage A99 / A8 Ost Brunnthl-Bad Aibling</b>
---

Beschreibung der Strecke:

Bundesland:	Bayern
Lage im Netz:	Verbindungsstrecke / Ballungsraumstrecke
Querschnitt:	dreistreifig (Bereich Irschenberg kein Standstreifen)
Topografie:	weitgehend eben, nur Bereich Irschenberg bis zu 7% Längsneigung und erhöhte Kurvigkeit
Verkehrsbelast.:	50.000 – 70.000 Kfz/Tag

Beschreibung der SBA:

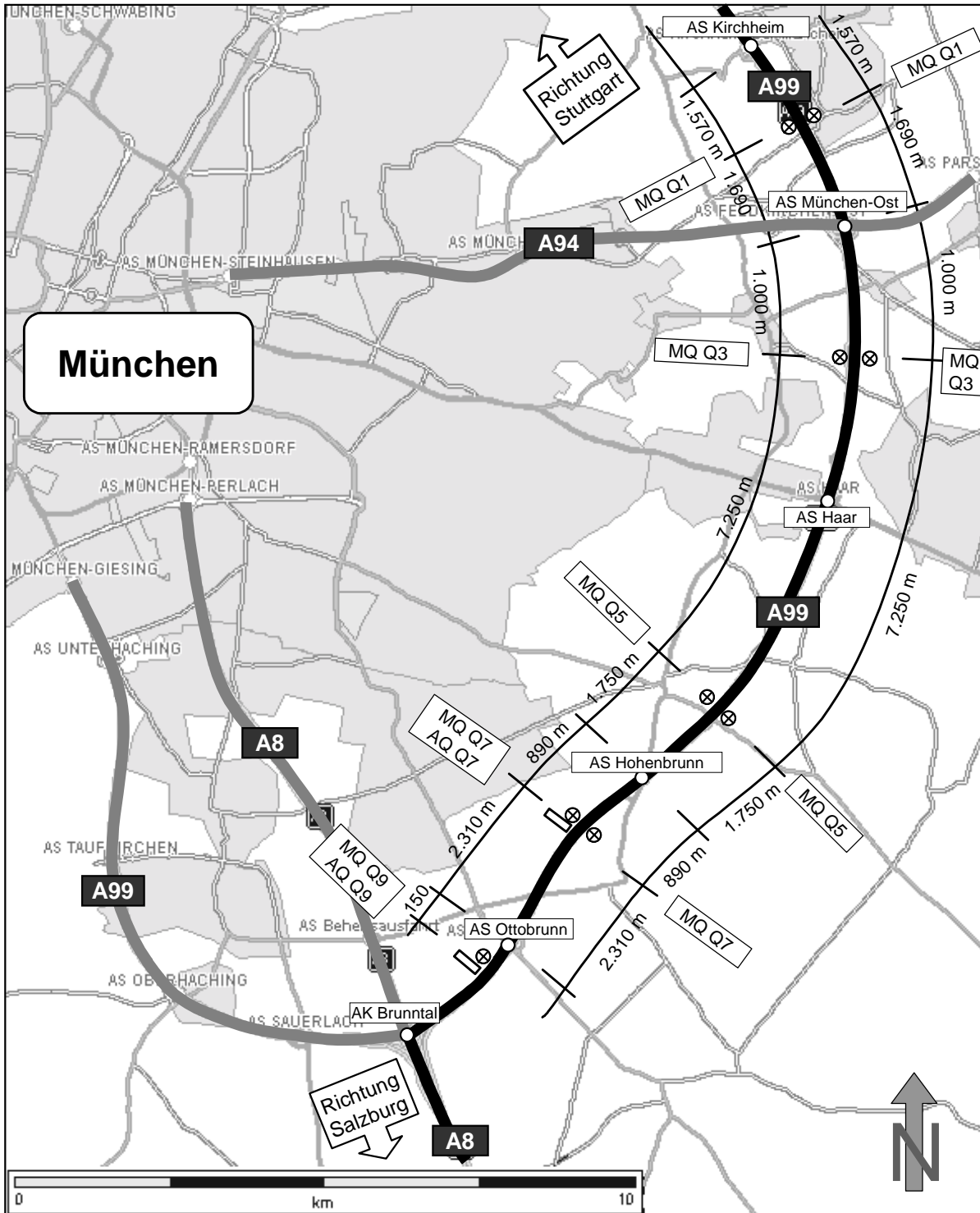
Im Jahr 1996 bzw. 1997 wurde auf der A8 zwischen AK Brunnthl und AS Bad Aibling beide Richtungsfahrbahnen auf einer Länge von ca. 40 km mit einer SBA ausgerüstet. Die SBA umfasst über 40 AQ und über 50 MQ. Die Gründe für die Errichtung einer SBA waren häufige Verkehrsüberlastungen und die gefährlichen Streckenführung am Irschenberg.

Datengrundlage und Untersuchungsumfang

Untersuchung	Messquerschnitt
q-v-Diagramm (Beurteilung verkehrliche Überlastung)	<b>A99 Richtung Salzburg:</b> Q1_Sbg, Q5_Sbg, Q7_Sbg, Q9_Sbg <b>A8 Richtung Salzburg:</b> Q27, Q33, Q41, Q51, Q61, Q87, Q93 <b>A8 Richtung Stuttgart:</b> B10,B11,B12,B18,B23,B24,B25,B26,B27,B28 <b>A99 Richtung Stuttgart:</b> Q1_Stgt, Q3_Stgt, Q5_Stgt, Q7_Stgt
Auswertungen zu Kapazität und Harmoni- sierung	<b>A99 Richtung Salzburg:</b> Q1_Sbg, Q5_Sbg, Q7_Sbg <b>A8 Richtung Salzburg:</b> Q27, Q33, Q41, Q51, Q61, Q87, Q93 <b>A8 Richtung Stuttgart:</b> B10,B11,B12,B18,B23,B24,B25,B26,B27,B28 <b>A99 Richtung Stuttgart:</b> Q1_Stgt, Q3_Stgt, Q5_Stgt, Q7_Stgt
Auswertungen zu Schaltzu- ständen	<b>A8 Richtung Salzburg:</b> AQ Q7, AQ Q9AQ Q39, AQ Q47, AQ Q61 <b>A8 Richtung Stuttgart:</b> AQ B11, AQ B22, AQ B23, AQ B24, AQ B25, AQ B26, AQ B27

### Streckenbeeinflussungsanlage A99 / A8 Ost Brunnthal-Bad Aibling

Lageplan für den Bereich A99 Münchner Ring



Legende



Messquerschnitt (MQ)

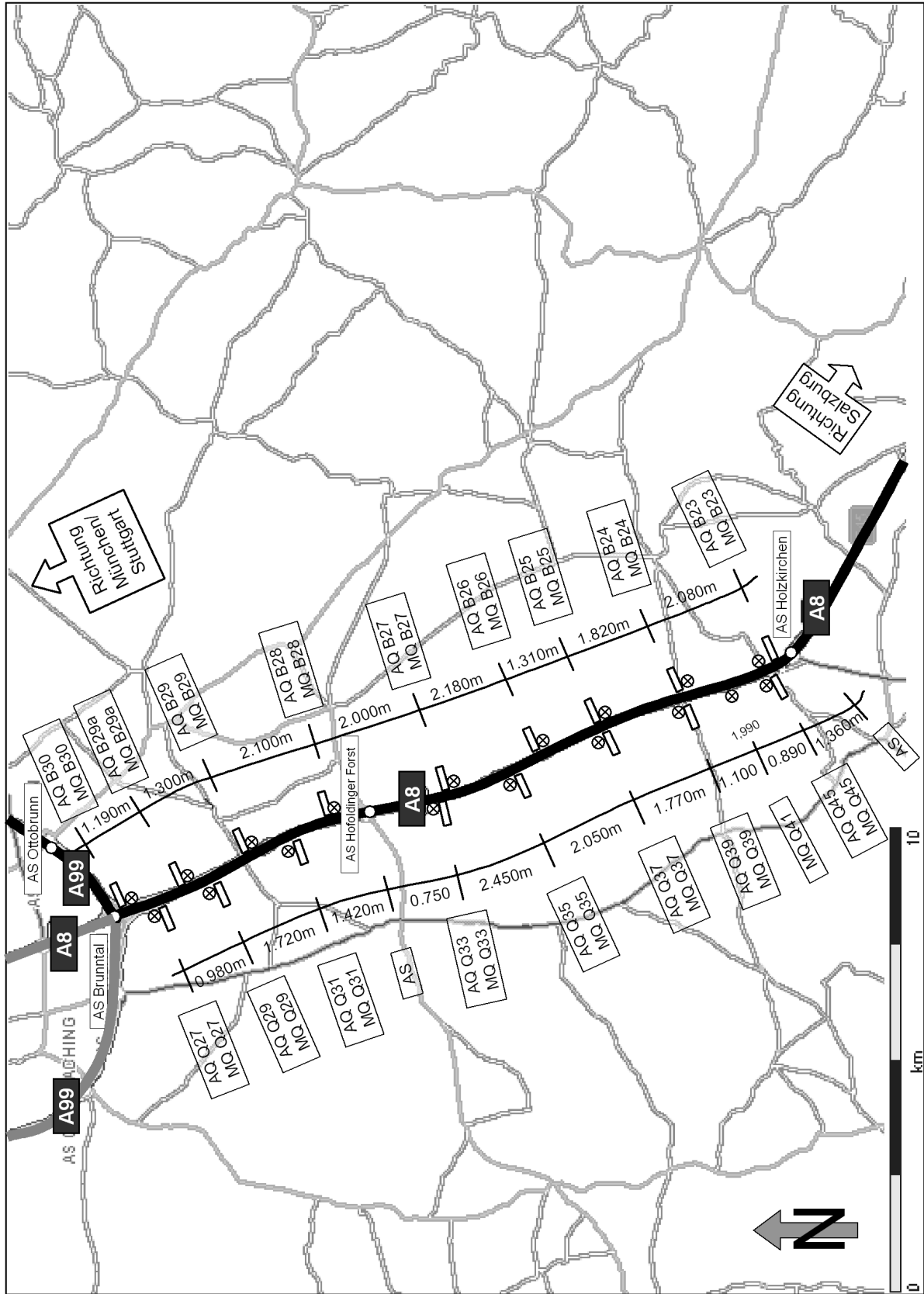


Anzeigequerschnitt (AQ)

Kartengrundlage:

DT info & Route ©1998

**Streckenbeeinflussungsanlage A99 / A8 Ost Brunnthal-Bad Aibling**  
 Lageplan für den Bereich AK Brunnthal bis AS Holzkirchen



<b>Legende</b>	⊗	Messquerschnitt (MQ)	<i>Kartengrundlage: DT info &amp; Route ©1998</i>
	□	Anzeigequerschnitt (AQ)	



<b>Streckenbeeinflussungsanlage A4 Leutratal</b>
--

Beschreibung der Strecke:

Bundesland:	Thüringen
Lage im Netz:	Verbindungsstrecke
Querschnitt:	zweistreifig mit Standstreifen
Topografie:	hügelig (Steigungen bis zu 5%)
Verkehrsbelast.:	25.000 – 30.000 Kfz/Tag

Beschreibung der SBA:

Die A4 unterliegt als Transitroute einem stark steigenden Verkehrsaufkommen, dem mit einem stückweisen sechsstreifigen Ausbau begegnet wird. In dem noch nicht ausgebauten Teilstück zwischen AK Hermsdorf und Weimar wurde als Sofortmaßnahme zur Senkung der Unfallzahlen in Fahrtrichtung Eisenach 1999 eine SBA installiert. Dies soll die durch hohen Lkw-Anteil und eine gefährliche Trassierung (starke Längsneigungen am Schorbaer Berg) verursachten hohen Unfallzahlen senken.

Die SBA umfasst 10 kombinierte Mess-/Anzeigequerschnitte, Messstellen für die Umfeldmessung und als Besonderheit eine mittels Prismenwender bei ausgeschalteten WVZ angezeigte Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h. [AUTOBAHNAMT THÜRINGEN 1999).

Datengrundlage und Untersuchungsumfang

Untersuchung	Messquerschnitt
q-v-Diagramm (Beurteilung verkehrliche Überlastung)	<b>Richtung Eisenach:</b> MQ 01, MQ 06, MQ11
Auswertungen zu Kapazität und Harmonisierung	<b>Richtung Eisenach:</b> MQ 01, MQ 06, MQ11
Auswertungen zu Schaltzuständen	- keine Auswertungen -

<b>Streckenbeeinflussungsanlage A8 Grabenstätt - Landesgrenze</b>
---

Beschreibung der Strecke:

Bundesland:	Bayern
Lage im Netz:	Verbindungsstrecke
Querschnitt:	zweistreifig ohne Standstreifen
Topografie:	hügelig, alte Trassierungsparameter
Verkehrslast:	ca. 30.000 Kfz/Tag

Beschreibung der SBA:

Die A8 Ost von München bis zur Bundesgrenze stellt eine hoch belastete Fernverbindung dar. Im Bereich Grabenstätt bis zur Bundesgrenze bei Salzburg stellen hohe Längsneigungen (bis 7,5%), fehlende Standstreifen und teils ungenügende Haltesichweiten eine Gefährdung dar. Aus diesem Grund wurde im März 2000 eine SBA auf beiden Richtungsfahrbahnen erstellt. Die SBA umfasst auf einer Länge von ca. 30 km 49 AQ und 59 MQ sowie 28 Messgeräte für die Umfelddaten. Als Besonderheit besitzt die SBA anstelle von Induktionsschleifen eine Kombination aus Radar- und Ultraschallmessgeräten zur Messung des Verkehrsflusses sowie einige in LED-Technologie ausgeführte WVZ [AUTOBAHNDIREKTION SÜDBAYERN 2000].

Datengrundlage und Untersuchungsumfang

Untersuchung	Messquerschnitt
q-v-Diagramm (Beurteilung verkehrliche Überlastung)	<b>A8 Richtung Salzburg:</b> Q235 Sbg, Q237 Sbg, Q239 Sbg, Q245Sbg <b>A8 Richtung München:</b> Q237 Mch, Q239 Mch, Q245 Mch
Auswertungen zu Kapazität und Harmonisierung	<b>A8 Richtung Salzburg:</b> Q235 Sbg, Q237 Sbg, Q239 Sbg <b>A8 Richtung München:</b> Q239 Mch
Auswertungen zu Schaltzuständen	<b>A8 Richtung Salzburg:</b> AQ 229 Sbg, AQ 235 Sbg, AQ 237 Sbg, AQ 239 Sbg, <b>A8 Richtung München:</b> AQ 239 Mch, AQ 245 Mch, AQ 249 Mch

<b>Streckenbeeinflussungsanlage A44 Dortmund Soest</b>
--

Beschreibung der Strecke:

Bundesland:	Nordrhein - Westfalen
Lage im Netz:	Ballungsraum
Querschnitt:	zweistreifig ohne Standstreifen
Topografie:	eben
Verkehrsbelast.:	30.000 bis 35.000 Kfz/Tag

Beschreibung der SBA:

Auf der A44 wurde im Januar 1996 auf der Richtungsfahrbahn nach Dortmund zwischen AS Soest und AK Dortmund/Unna eine Streckenbeeinflussungsanlage über eine Länge von 31 km in Betrieb genommen. Die Ziele bestanden in einer Erhöhung der Verkehrssicherheit und der Leistungsfähigkeit der Strecke. Zahlreiche Messeinrichtungen für den Verkehrsfluss und für die Umfeldbedingungen steuern die Anlage. Der Abstand zwischen den Anziegquerschnitten ist mit durchschnittlich 1,5 km niedriger als standardgemäß üblich.

Datengrundlage und Untersuchungsumfang

Untersuchung	Messquerschnitt
q-v-Diagramm (Beurteilung verkehrliche Überlastung)	<b>Richtung Dortmund:</b> Q14, Q15, Q16, Q17, Q1421 Dtm <b>Richtung Kassel:</b> Q1421 Ks, Q1459 Ks
Auswertungen zu Kapazität und Harmoni- sierung	<b>Richtung Dortmund:</b> Q14, Q15, Q16, Q17, Q1421 Dtm <b>Richtung Kassel:</b> -
Auswertungen zu Schaltzu- ständen	- keine Auswertungen -



<b>Streckenbeeinflussungsanlage A94 Steinhausen - Parsdorf</b>
--

Beschreibung der Strecke:

Bundesland:	Bayern
Lage im Netz:	Ballungsraum
Querschnitt:	zweistreifig mit temporärer Standstreifenfreigabe
Topografie:	eben
Verkehrsbelast.:	28.000 Kfz/Tag

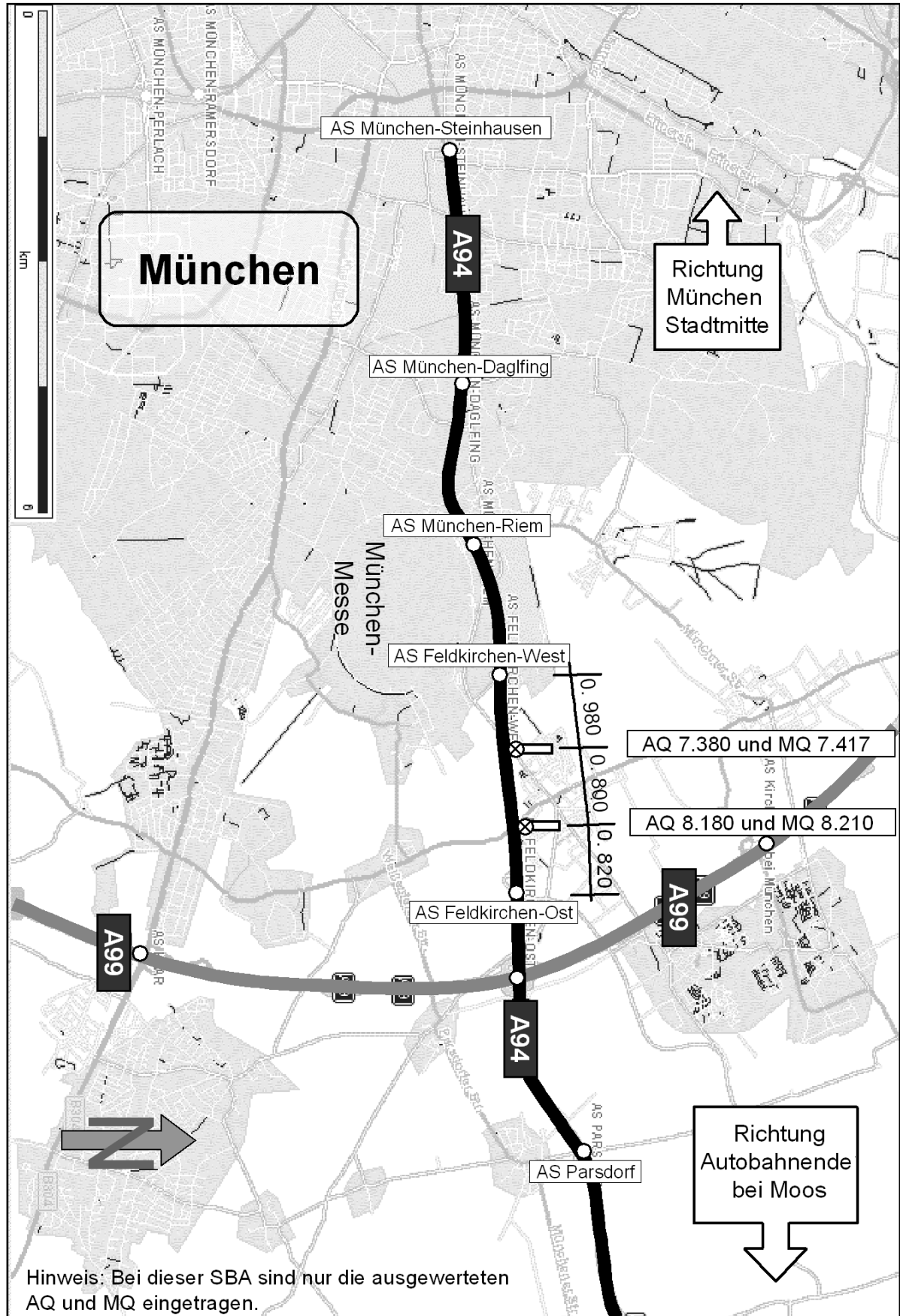
Beschreibung der SBA:

Auf der A94 wurde im Bereich der neuen Messe München zwischen dem Autobahnbeginn München-Steinhausen bis zur Anschlussstelle Parsdorf auf beiden Richtungsfahrbahnen auf 11 km Länge im Jahr 1998 eine SBA erstellt. Diese SBA besitzt als Besonderheiten eine temporäre Standstreifenfreigabe und an einer Anschlussstelle eine Zuflussdosierung. Weiterhin wird der Messverkehr mit einem Wechselwegweisungssystem dynamisch geführt.



Datengrundlage und Untersuchungsumfang

Untersuchung	Messquerschnitt
q-v-Diagramm (Beurteilung verkehrliche Überlastung)	<b>Richtung München:</b> MQ 8.210, MQ 7.417
Auswertungen zu Kapazität und Harmoni- sierung	<b>Richtung München:</b> MQ 8.210, MQ 7.417
Auswertungen zu Schaltzu- ständen	<b>Richtung München:</b> AQ 8.180

**Streckenbeeinflussungsanlage A94 Steinhausen - Parsdorf**



**Legende**

-  Messquerschnitt (MQ)
-  Anzeigequerschnitt (AQ)

Kartengrundlage:  
DT info & Route ©1998

<b>Streckenbeeinflussungsanlage A99/A8W Eschenrieder Spange</b>
---

Beschreibung der Strecke:

Bundesland:	Bayern
Lage im Netz:	Ballungsraum
Querschnitt:	wechselnd zwei- bis vierstreifig, Überleitungsbereich
Topografie:	eben
Verkehrsbelast.:	18.000 – 48.000 Kfz/Tag

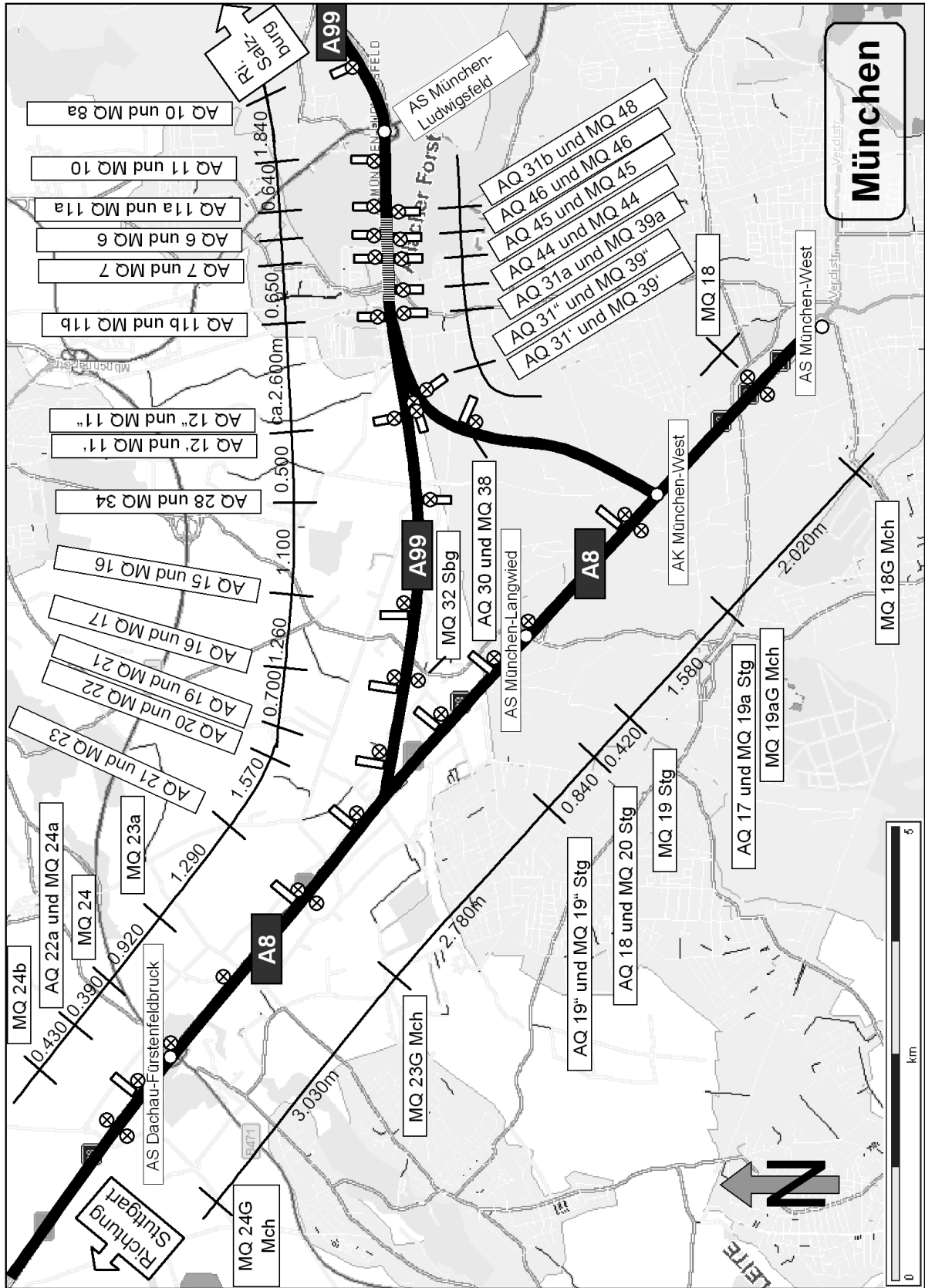
Beschreibung der SBA:

Zur Inbetriebnahme der Verbindung der A8 mit A99 nordwestlich von München („Eschenrieder Spange“) im Jahr 1998 wurde dieser Bereich mit einer Streckenbeeinflussungsanlage ausgerüstet. Diese soll insbesondere den Verkehrsteilnehmer vor den in diesem Bereich durch die Querschnittswechsel häufig auftretenden Rückstaus warnen und damit die Unfallzahlen senken. Die SBA wurde auf der A99 und A8 auf der Richtungsfahrbahn nach Stuttgart und auf der A99 auf der Richtungsfahrbahn nach Salzburg erstellt. Die Anlage umfasst 33 Mess- und Anzeigenquerschnitte.

Datengrundlage und Untersuchungsumfang

Untersuchung	Messquerschnitt
q-v-Diagramm (Beurteilung verkehrliche Überlastung)	<b>A99 Richtung Stuttgart:</b> Q8a, Q11a, Q16, Q17 <b>A99 Richtung Salzburg:</b> Q32, Q45, Q46 <b>A8 Richtung Stuttgart:</b> Q19, Q20, Q23, Q24a <b>A8 Richtung München:</b> Q24G, Q23G
Auswertungen zu Kapazität und Harmoni- sierung	<b>A99 Richtung Stuttgart:</b> Q8a, Q11a, Q17 <b>A99 Richtung Salzburg:</b> - <b>A8 Richtung Stuttgart:</b> Q20, Q23 <b>A8 Richtung München:</b> Q23G
Auswertungen zu Schaltzu- ständen	<b>A99 Richtung Stuttgart:</b> AQ 10, AQ 11, AQ 15, AQ 21

### Streckenbeeinflussungsanlage A99/A8W Eschenrieder Spange



<b>Legende</b>	Messquerschnitt (MQ)	Kartengrundlage: DT info & Route ©1998
	Anzeigequerschnitt (AQ)	

<b>Referenzstrecke A8 Ulm - München</b>
---

Beschreibung der Strecke:

Bundesland: Bayern  
 Lage im Netz: Verbindungsstrecke  
 Querschnitt: zweistreifig  
 Topografie: weitgehend eben  
 Verkehrsbelast.: 35.000 bis 40.000 Kfz/Tag

Beschreibung der Strecke:

Die A8 zwischen Ulm und München besitzt streckenweise noch die alte Vorkriegstrassierung mit entsprechender Kurvigkeit, Längsneigung und fehlendem Standstreifen. Sie ist werktags durch starken Berufsverkehr und am Wochenende auch durch Urlauberverkehr stark belastet.

Um der kritischen Verkehrssituation zu begegnen, wurden im Jahr 1999 in Teilstrecken Verkehrsbeschränkungen erlassen. Diese bestehen aus der Tempobeschränkung auf 120 km/h und Lkw-Überholverbot von 6 – 20 Uhr bzw. eine Kombination aus beidem. Für die vier Messquerschnitte stellte sich im Untersuchungszeitraum folgende Situation dar:

MQ Sulzemoos, Ri. Stgt: frei  
 MQ Sulzemoos, Ri. Mch: T120  
 MQ Adelzhausen, Ri, Stgt: frei  
 MQ Augsburg-West, Ri. Stgt: T120 und Lkw-ÜV von 6 – 20 Uhr

Datengrundlage und Untersuchungsumfang

Untersuchung	Messquerschnitt
q-v-Diagramm (Beurteilung verkehrliche Überlastung)	<b>Richtung Stuttgart:</b> MQ Sulzemoos, MQ Adelzhausen, MQ Augsburg-West <b>Richtung München:</b> MQ Sulzemoos
Auswertungen zu Kapazität und Harmonisierung	<b>Richtung Stuttgart:</b> MQ Sulzemoos, MQ Adelzhausen, MQ Augsburg-West <b>Richtung München:</b> Sulzemoos





Schriftenreihe des Instituts für Straßen- und Verkehrswesen

Heft 1	1. Fachkolloquium Straße und Verkehr Stuttgart 1986	9/1987
Heft 2	2. Fachkolloquium Straße und Verkehr Stuttgart 1988	4/1989
Heft 3	Arbeiten aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen	7/1989
Heft 4	Beiträge zum Ruhenden Verkehr	8/1989
Heft 5	Festkolloquium anlässlich der Vollendung des 60. Lebensjahres von Prof. Dr.-Ing. Gerd Steierwald	5/1990
Heft 6	Fachkolloquium Straße und Verkehr Stuttgart 1990	4/1991
Heft 7	Wolfgang Hertkorn Veränderungen des Kraftstoffverbrauchs und der Abgasbelastungen durch Geschwindigkeitsreduktion in untergeordneten städtischen Straßennetzen	2/1992
Heft 8	City Stuttgart - attraktive Innenstadt im Zentrum einer Agglomeration (Autofreie Innenstadt = Attraktive City?)	3/1992
Heft 9	Arbeiten aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen	4/1992
Heft 10	Reinhard Unkhoff Der Einfluß des Schwerverkehrs auf Geschwindigkeitsverhalten und Pulkbildung auf Autobahnen	6/1992
Heft 11	Stefanos Bazis Interaktiver Straßenentwurf mit Hilfe der EDV (in Vorbereitung)	7/1992
Heft 12	Jiann-Sheng Wu Stochastische Simulation des Überholverhaltens auf zweistreifigen Landstraßen	7/1992
Heft 13	4. Fachkolloquium Straße und Verkehr Stuttgart 1992	5/1993



Heft 14	Stephan Herkt Abstimmung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage und knotenpunktfreien Strecken an innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen	4/1994
Heft 15	Von den Anfängen bis zur Gegenwart - Straßen- und Verkehrswesen an der Universität Stuttgart	9/1994
Heft 16	Ashraf Hamed Abwicklung des Lieferverkehrs an innerörtlichen Hauptstraßen	10/1994
Heft 17	5. Fachkolloquium Straße und Verkehr Stuttgart 1994	3/1995
Heft 18	Chronik und Retrospektive - Gerd Steierwald und das Institut für Straßen- und Verkehrswesen	10/1995
Heft 19	Heiko Tempel Zusammenhänge zwischen Verkehrsablauf, Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen im städtischen Busverkehr	11/1995
Heft 20	Volker Mörgenthaler Strategien zur Verminderung der Emissionen von Ozonvorläufersubstanzen des Nutzfahrzeugverkehrs in Ballungsgebieten	2/1996
Heft 21	Martin Schmid Auswirkungen der Kraftstoffbesteuerung auf die Pkw-Fahrleistungen im Freizeitverkehr	11/1996
Heft 22	Burkhard Flasche Fahrraumbewirtschaftung mit Sonderfahrstreifen für ausgewählte Stadtverkehre	2/1998
Heft 23	Szabolcs Törgyekes Ableitung spezifischer Abgas-Emissionsfaktoren für Kraftfahrzeugkollektive anhand von Konzentrationsmessungen in einem städtischen Straßentunnel	3/1998
Heft 24	Konrad von Kirchbach Zur Entwicklung der Straßen in Württemberg bis 1918	3/2000
Heft 25	6. Fachkolloquium Straße und Verkehr Stuttgart 1999 (in Vorbereitung)	

Heft 26	Symposium Stadt und Verkehr Stuttgart 1999	11/1999
Heft 27	„Institut 21“ Aufbruch in Forschung und Lehre (in Vorbereitung)	
Heft 28	Arbeiten aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen	8/2001
Heft 29	Stefan Denzinger Auswirkungen alternierender Telearbeit auf das Verkehrsverhalten	3/2001
Heft 30	6. Fachkolloquium Straße und Verkehr Stuttgart 1999 (in Vorbereitung)	3/2001
Heft 31	Prof. Elisabeth Deakin The Changing Importance of Central Cities	8/2002
Heft 32	Walter Vogt, Matthias Lenz, Henrik Schwarz, Wilhelm Glaser, Margrit Glaser, Thomas Kuder Verkehrliche Auswirkungen von Teleshopping und Telecommerce auf die Mobilität privater Haushalte	6/2002
Heft 33	Christoph Hecht Modellierung des Zeitwahlverhaltens im Personenverkehrs (in Vorbereitung)	
Heft 34	Henrik Schwarz Vergleich von Schall-Immissionsmessungen bei Straßenverkehrslärm mit standardisierten und binauralen Geräten	11/2002
Heft 35	Peter Schick Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie auf die Stabilität des Verkehrsflusses	6/2003
Heft 36	Volker Schmid Reaktivierte Nebenbahnen und alternative Buskonzepte Vergleich der ökologischen Wirkungen	7/2003

**ISSN 0932 - 402X**

**ISBN 3-9808218-4-6**