

**Dynamische Simulation
des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs**

- am Beispiel der EXPO 2000 -

Dr.-Ing. Fabian Schütte



Schütte, F.
Dynamische Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs
- am Beispiel der EXPO 2000 -
Hannover 2000

Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau
Universität Hannover
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Schnüll
Appelstraße 9 A
D-30167 Hannover

Tel.: 0511/762-2283
Fax: 0511/762-2520

Vorwort des Herausgebers

Im Heft 27 dieser Schriftenreihe haben wir über innovative Beiträge des Institutes zum Verkehrsplanungs- und Verkehrsmanagementkonzept für die Weltausstellung EXPO 2000 berichtet. In die Reihe dieser Arbeiten gehören zweifellos auch die umfangreichen Weiterentwicklungen der am Institut vorhandenen Verkehrsplanungsmodelle für die Simulation von Fahrtenströmen in regionalen und kommunalen Straßennetzen. Mit ihnen entstanden in gutachterlichen Untersuchungen

- grundlegende Prognosen für die EXPO-bedingten Zusatzbelastungen auf den wichtigsten Straßen des Großraums Hannover,
- eine wochentagsgenaue Schwachstellenanalyse für das Bundesautobahnnetz bei verschiedenen Besucherszenarien,
- eine Einschätzung der Leistungsfähigkeit von Alternativrouten bei Überlastung der Bundesautobahnen A2 und A7 und
- eine Abschätzung der Emissionsreduktionen durch die in der EXPO-Verkehrslenkung vorgesehene Konzentration des Straßenverkehrs auf die Bundesfernstraßen.

Diese gutachterlichen Untersuchungen führten maßgeblich zur Festlegung der Öffnungszeiten am Weltausstellungsgelände, zur Begrenzung der Besucherzahlen auf allerhöchstens 400.000 Besucher je Tag, zur vorrangigen Lenkung des straßengebundenen Zusatzverkehrs über die Autobahnen und zur Verbesserung der Akzeptanz des EXPO-Verkehrskonzeptes in den Kommunen des Großraums Hannover.

Während die gutachterlichen Untersuchungen des Institutes vorrangig praktische Aussagen zum Verkehrsmanagement zum Ziele hatten, widmete sich Herr Schütte in der parallel erarbeiteten Promotionsschrift mehr der wissenschaftlichen Weiterentwicklung der institutseigenen Verkehrsplanungsmodelle.

Kern der wissenschaftlichen Arbeit ist das Kapitel 5, in dem die Integration eines dynamischen Modellbausteines, der nunmehr on-line-Simulationen erlaubt, behandelt wird. Das neu entwickelte **Simulationsmodell SIMVER** ist speziell auf die Simulation lenkbarer Veranstaltungsverkehre ausgerichtet und ermöglicht die Einbeziehung aller P+R-Plätze in die Abbildung des Verkehrsgeschehens während der An- und Abreise zu Großveranstaltungen auf dem Messegelände. Das neue **Netz- und Verkehrsumlegungsmodell ROUML** erlaubt nunmehr über verkehrsartenspezifische Graphen auch die sukzessive Umlegung von Schwerverkehr, Normalverkehr und wegweisungsgelenktem Veranstaltungsverkehr und die realistischere Einbeziehung der in Knotenpunkten auftretenden Wartezeiten in die Wegewahl.

Dank sage ich dem Niedersächsischen Ministerium für Wirtschaft, Technologie und Verkehr für die Förderung der Untersuchungen und der "Dr. Joachim und Hanna Schmidt Stiftung für Umwelt und Verkehr" für die Erteilung eines Forschungsauftrages zur Aktualisierung unserer Emissionsmodelle mit den aktuellen Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes.

Robert Schnüll

Kurzfassung

Die in der regionalen Planung normalerweise ausreichende Modellierung des mittleren werktäglichen Normalverkehrs, die auch für den Großraum Hannover schon vorlag, ist zur Beurteilung der Verkehrsqualität im Straßennetz der Region Hannover während einer Großveranstaltung wie der EXPO 2000 nicht geeignet. Bei dem Kraftfahrzeugverkehr während einer Großveranstaltung wie der EXPO 2000 handelt es sich um einen extrem gerichteten Verkehr zum und vom Weltausstellungsgelände. Dieser veranstaltungsbedingte Kraftfahrzeugverkehr wird deutlich ausgeprägte Spitzenstunden aufweisen, die jedoch nicht mit den Hauptverkehrszeiten im werktäglichen Normalverkehr zusammenfallen müssen bzw. sollen.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die Erzeugung von stundengenauen Verkehrsnachfragematrizen für den werktäglichen Personenverkehr im Großraum Hannover mit dem ökonomischen Verkehrsnachfragemodell SAN [4]. Aus der beim Kommunalverband Großraum Hannover vorliegenden Wirtschaftsverkehrsmatrix für einen mittlere Werktag wurden in dieser Arbeit Fahrtenmatrizen für den Schwerverkehr in Stundengenauigkeit abgeleitet. Die Kalibrierung dieser stundengenauen Wirtschaftsverkehrsmatrizen für den Großraum Hannover erfolgte überwiegend mit Hilfe von Auswertungen von Dauerzählstellendaten rund um Hannover. Für den Zeitraum der EXPO 2000 erfolgte für die Verkehrsnachfragematrizen des werktäglichen Normalverkehrs eine Trendprognose von dem Basisjahr 1997 auf das Jahr 2000.

Die bisher in der Region Hannover eingesetzten Verkehrsumlegungsmodelle DIAL-IV und VISUM konnten das Verkehrslenkungskonzept für die EXPO 2000 nicht bzw. nicht realitätsnah umsetzen, da diese Programmsysteme keine ausreichend flexiblen Möglichkeiten bieten, einzelne Fahrzeugkollektive kontrolliert über vorgegebene Routen zu einem definierten Ziel zu führen. Auch die Abbildung eines dynamischen Verkehrsleitsystems zu P+R-Plätzen ist mit diesen Programmsystemen nicht möglich. Aus diesem Grund wurden in der vorliegenden Arbeit zwei Verkehrsmodelle entwickelt, die es gemeinsam ermöglichen, den Verkehrsablauf einer Region (Region Hannover) während einer Großveranstaltung wie der EXPO 2000 realitätsnah abzubilden.

- Im **Simulationsmodell Veranstaltungsverkehr SIMVER** erfolgt während der simulierten Anreise zur Veranstaltung die Zielwahl der Besucher, die zu P+R-Plätzen fahren. Für die Abreise von den P+R-Plätzen erfolgt die Quelldefinition gemäß der während der Anreise getroffenen Zielwahl. Die Prognosen für den Besucherverkehr zur EXPO 2000, die der Simulation mit dem Simulationsmodell SIMVER zugrunde liegen, basieren auf den im Arbeitskreis Verkehrsmanagement abgestimmten Szenarien [2]. Das Simulationsmodell protokolliert während der Anreise auch, zu welchem Parkplatz wie viele Personenkraftwagen von Besuchern aus welcher Himmelsrichtung angereist sind. Dies ist erforderlich, um die Personenkraftwagen von Besuchern während der Abreise vom jeweiligen P+R-Platz auch wieder in die entsprechende Richtung abreisen zu lassen.

Als Ergebnis eines Simulationslaufes werden die Fahrtenmatrizen für den veranstaltungsbedingten Besucherverkehr ausgegeben. Der Protokollausdruck der Simulation der An- und Abreise eines ganzen Tages liefert erste Hinweise darauf, von welcher Stunde eines Tages an während der Anreise zur untersuchten Großveranstaltung aus welcher Richtung mit Problemen zu rechnen ist, da Warnungen ausgegeben werden, sobald weniger P+R-Stellplatzkapazitäten für eine Anreiserichtung zur Verfügung stehen, als Fahrzeuge anreisen.

Eine Bewertung unterschiedlicher Verkehrslenkungsstrategien ist mit dem Simulationsmodell SIMVER noch nicht abschließend möglich, da das Simulationsmodell den Verkehrszustand auf den einzelnen

Streckenabschnitten im Netzmodell nicht kennt und somit nicht beurteilt werden kann, ob die Verkehrszustände, die sich aufgrund der aktuell geschalteten Wegweisung im Straßennetz auf den einzelnen Streckenabschnitten im Großraum Hannover einstellen, überhaupt abzuwickeln sind. Abschließend kann eine Bewertung unterschiedlicher Verkehrslenkungsstrategien erst dann erfolgen, wenn die Ergebnisse des Simulationsmodells SIMVER (die Fahrtenmatrizen für den EXPO-bedingten Zusatzverkehr) mit dem Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML zusammen mit den Fahrtenmatrizen für den werktäglichen Normalverkehr (Schwerverkehr und Personenkraftwagen) auf das Netzmodell für den Großraum Hannover umgelegt werden.

- **Das Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML** ermöglicht es, neben der Abbildung des werktäglichen Normalverkehrs (Lkw und Pkw) auch gelenkten und überwiegend ortsunkundigen Veranstaltungsverkehr abzubilden. Der Umlegungsprozess erfolgt im Modell ROUML simultan für den Schwerverkehr, für den ortsunkundigen EXPO-Besucherverkehr und für den ortskundigen Personenkraftwagenverkehr, so dass sich die unterschiedenen Fahrzeugkategorien gegenseitig beeinflussen. In einer multi-sukzessiven Simultanumlegung (vgl. Abb. 84) können die unterschiedenen Fahrtenkategorien (Lkw, ortsunkundige Pkw von Veranstaltungsbesuchern, ortskundige Pkw) mehrfach in unterschiedlich großen Anteilen umgelegt werden.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML ermöglicht es, beliebig viele unterschiedliche Fahrtenmatrizen in einem multi-sukzessiven Simultanumlegungsprozess miteinander zu kombinieren. Für jede Teilumlegung einer Fahrtenmatrix kann zwischen unterschiedlichen Umlegungsverfahren gewählt werden. Für den ortsunkundigen Veranstaltungsverkehr kann während jeder Teilumlegung einer Fahrtenmatrix zusätzlich eine Wegweisung vorgegeben werden. Dies ermöglicht es, für jede An- und Abreiserichtung die vorhandene Wegweisung nachzubilden. Die Verkehrsumlegungen für den Schwerverkehr berücksichtigen die Unterschiede von Lastkraftwagen gegenüber den Personenkraftwagen hinsichtlich des Fahrverhaltens und der Routenwahl.

Während der Verkehrsplanungen für die EXPO 2000 hat sich gezeigt, dass es nur mit einer dynamischen Simulation eines ganzen Veranstaltungstages möglich ist, das Verkehrsaufkommen einer entsprechenden Großveranstaltungen mit der Nutzung von dezentral gelegenen P+R-Plätzen im Modell realitätsnah abbilden.

Während der in dieser Arbeit durchgeführten dynamischen Simulationen eines ganzen Werktages wurden mit dem entwickelten Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML die dynamischen Einzelstundenumlegungen so durchgeführt, dass sich die unterschiedenen Fahrtenkategorien (Lkw, ortsunkundige Pkw von Veranstaltungsbesuchern, ortskundige Pkw) gegenseitig beeinflussen und die Wegweisung für den EXPO-Besucherverkehr mit Personenkraftwagen gemäß dem Lenkungskonzept für die Weltausstellung erfolgte [2]. Die Simulation mit dem Simulationsmodell SIMVER stellen sicher, dass der Zusammenhang der dynamischen Einzelstundenumlegungen über einen ganzen Tag gesehen, gewahrt bleibt.

Abstract

Most metropolitan areas accomplish transportation planning analysis using models based on daily OD-matrixes. Normally, it is sufficient for regional traffic planning to use the middle daily traffic. Even for the region of Hannover existed such data. But for the evaluation of the quality of traffic in the network of the region of Hannover during a big event like the EXPO 2000, it is not sufficient to have a look at the middle daily traffic. The traffic during a big event like the EXPO 2000 is extremely going in one direction, in the morning to and in the evening from the EXPO 2000 ground. The additional EXPO traffic will have significant peak hours that could and should not coincide with the normal peak hours of the daily traffic.

In this work, OD-matrixes for the normal daily traffic of private cars in the region of Hannover were developed for every hour of a day except the hours between 0 and 5 o'clock. For heavy duty vehicles, the OD-matrixes for single hours were produced from the existing OD-matrix for the daily traffic. The data of four continuous counting points on the highways around Hannover were used in order to improve these OD-matrixes for single hours. Using the trend method, the OD-matrixes of the normal traffic for the region of Hannover for the year 2000 were forecasted from the situation of the base year 1997.

The traffic models DIAL-IV and VISUM, used for regional planning in Hannover, could not be used for modeling the additional EXPO 2000 traffic, because they were not able to handle dynamically guided traffic. According to this reason two new models were developed in this work. These models are able to simulate the daily traffic during a big event like the EXPO 2000 in the region of Hannover in a realistic way.

- **The simulation model, SIMVER**, simulates the arrival and departure of the EXPO 2000 visitor's cars, which are driving to and from P+R-parking facilities. The definition of the departure source traffic is based on the definition of the destination parking facilities, which are located during the arrival. The forecasted EXPO traffic, used in SIMVER, is based on the scenarios that are developed and discussed with the working group "traffic management" [2]. SIMVER produces a protocol during the simulation of the arriving traffic. This protocol records the direction the cars driving to the P+R-parking facilities originate from. This is necessary because SIMVER requires these data for the simulation of the departure from the P+R-parking facilities in order to guide the traffic in the right direction, i.e. the direction they came from.

The results of the simulation are OD-matrixes for the additional EXPO traffic for every single hour of a day. The arrival and departure protocol of the additional EXPO traffic provides first hints about the critical hours and critical directions.

A final evaluation of different guiding traffic strategies for the additional EXPO traffic with SIMVER is not possible, because the simulation model does not have any data about the normal traffic. Without assignment, It is not possible to judge if the traffic volumes on single links, which are consequence of actual variable direction signs, can be handled. A final evaluation of different guiding traffic strategies can take place when assignments were performed for every hour of a day.

- **The assignment model, ROUML** that was developed in this work, enables to combine the assignments of the normal daily traffic for heavy duty vehicles and private cars with the assignment of the additional EXPO traffic. The assignment in the model ROUML is simultaneous for all types of OD-matrixes so that the different types of traffic (heavy duty vehicles, private cars and additional EXPO traffic) are influencing each other. With a multi-iterative simultaneous assignment process it is possible to split the assignment process in different parts.

The assignment model ROUML can combine any number of OD-matrixes in one multi-iterative simultaneous assignment process. It is possible to choose between different assignment algorithms for every single assignment step. For the purpose of guiding people who are not in common with the street network (additional EXPO traffic), an own variable guide sign for every single assignment step can be provided. This makes it possible to rebuild the real variable guide signs for every direction. The assignment process for the heavy duty vehicles considers the different behavior and speed limits for heavy duty vehicles.

In the course of the process of EXPO traffic planning, it gets clear that it is only possible to make a realistic simulation considering all decentral P+R-facilities for the big event EXPO performing a simulation over a whole day.

The dynamic simulation with ROUML and SIMVER for a whole day was performed by simulating the traffic flow for every single hour of the day. The assignment model, ROUML, considers that the different types of traffic are influencing each other and that the variable guide signs for the big event EXPO can be considered in a realistic way. The use of the simulation model, SIMVER, ensures that the connection of the simulation over a whole day continues.

1. Problemstellung und Zielsetzung	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Lenkungskonzept für die Weltausstellung EXPO 2000	2
1.2.1 Allgemeines	2
1.2.2 Festlegung der Hauptrouten und der Ausweichrouten	6
1.2.3 Besuchermengen	7
1.2.4 Prognostizierte An- und Abreiseganglinien	8
1.2.5 Prognose der Besucherherkunft	9
1.2.6 P+R-Konzept	10
1.3 Fazit	12
2. Klassische Verkehrsplanungsmodelle	13
2.1 Allgemeines	13
2.2 Verkehrsplanungsmodelle	15
2.2.1 Allgemeines	15
2.2.2 Verkehrsstrommodelle	16
2.2.2.1 Verkehrserzeugungsmodelle	16
2.2.2.2 Verkehrsverteilungsmodelle	17
2.2.2.3 Verkehrsaufteilungsmodelle (Verkehrsmittelwahl)	19
2.2.2.4 Verkehrsumlegungsmodelle	20
2.2.3 Wegekettenmodelle	22
2.2.4 Kritischer Rückblick und Ausblick	24
2.3 Verkehrsnachfragemodell SAN	27
2.3.1 Allgemeines	27
2.3.2 Einflusskomponenten	28
2.3.2.1 Siedlungsstruktur	28
2.3.2.2 Entfernung (Raumstruktur)	30
2.3.2.3 Lage (Raumstruktur)	30
2.3.2.4 Angebot	31
2.4 Netz- und Verkehrsumlegungsmodell DIAL-IV	32
2.4.1 Netzmodell DIAL-IV	32
2.4.1.1 Geographische Struktur (Streckennetz)	32
2.4.1.2 Betriebliche Struktur (Netzbetrieb)	33
2.4.2 Verkehrsumlegungsmodell Individualverkehr DIAL-IV	35
2.5 Wirkungsmodell STRBEW (Version 1.0)	36
3. Methodisches Vorgehen	37

4.	Stundengenaue Verkehrsnachfrage des werktäglichen motorisierten Normalverkehrs	39
4.1	Allgemeines	39
4.2	Stundengenaue Verkehrsnachfrage für den motorisierten Individualverkehr mit Personenkraftwagen	40
4.2.1	Daten der Siedlungs- und Wirtschaftsstruktur	40
4.2.2	Räumliche Gliederung zur Ermittlung der Verkehrsnachfrage	40
4.2.3	Mobilitätskennwerte für den Großraum Hannover	43
4.3	Stundengenaue Verkehrsnachfrage für den Schwerverkehr	50
4.4	Verkehrsnachfrage des MIV im Großraum Hannover	51
4.4.1	Verkehrsnachfrage für den Analysenullfall 1997	51
4.4.2	Verkehrsnachfrage für das Jahr 2000	52
5.	Dynamische Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs	54
5.1	Allgemeines	54
5.2	Simulationsmodell Veranstaltungsverkehr SIMVER	55
5.2.1	Aufgaben des Simulationsmodells	55
5.2.2	Unterschiedene Fahrtenkategorien	56
5.2.3	Eingangsgrößen für die Simulation	56
5.2.4	Simulationsablauf	58
5.2.5	Ergebnis der Simulation	60
5.3	Netz- und Verkehrsumlegungsmodell ROUML	61
5.3.1	Allgemeines	61
5.3.2	Netzmodell ROUML / NETMASTER	62
5.3.2.1	Geographische Struktur (Streckennetz)	62
5.3.2.2	Betriebliche Struktur (Netzbetrieb)	62
5.3.2.3	Netzeditor NETMASTER	66
5.3.3	Umlegungsmodell ROUML	68
5.3.3.1	Allgemeines	68
5.3.3.2	Fahrtenkategorien	68
5.3.3.3	Umlegungsverfahren	68
5.3.3.4	Wegweisung	73
5.3.3.5	Wartezeiten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage	74
5.3.3.6	Wartezeiten an Knotenpunkten mit Kreisverkehrsplätzen	79
5.3.3.7	Wartezeiten an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen	82
5.4	Wirkungsmodell STRBEW (Version 2.0)	89
5.4.1	Allgemeines	89
5.4.2	Verfahren zur Ermittlung der Abgasemissionen	90
5.4.2.1	Fahrtenkategorien	90
5.4.2.2	Fahrmuster	91
5.4.2.3	Verkehrssituationen	93
5.4.2.4	Startzuschläge und Längsneigungen	94
5.4.3	Ausgewählte Verkehrssituationen zur Ermittlung der Abgasemissionen	95
5.4.4	Verfahren zur Ermittlung der Lärmemissionen	97
5.4.5	Datenausgabe bei der Ermittlung der Abgasemissionen mit dem Wirkungsmodell STRBEW	99
5.4.6	Auswertungsmodule BEW / BEWKAN / AUSWERT / BEWLRM	99

6.	Ergebnisse der dynamischen Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs im Großraum Hannover	101
6.1	Allgemeines	101
6.2	Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes auf Bundesautobahnen	101
6.3	Abschätzung der Emissionsbelastungen	103
6.3.1	Allgemeines	103
6.3.2	Entwicklung der Abgasemissionsbelastungen	105
6.3.3	Untersuchte Planfälle	108
6.3.4	Absolute Abgasemissionen	110
6.3.5	Normierte Abgasemissionen	114
6.3.6	Gewichtete Abgasemissionen	116
6.3.7	Lärmemissionen	119
6.4	Ergebnisse der Kapazitätsuntersuchungen und Schwachstellenanalyse	123
6.4.1	Untersuchte Planfälle	123
6.4.2	Simulation des Veranstaltungsverkehrs mit dem Simulationsmodell SIMVER	127
6.4.3	Verkehrsumlegungen mit dem Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML	130
6.4.3.1	Umlegungsmethodik	130
6.4.3.2	Verkehrsstärken auf den Haupttrouten	132
6.4.3.3	Schwachstelle B 443	137
7.	Zusammenfassung und Empfehlungen	140
7.1	Ausgangssituation und Vorarbeiten für eine dynamische Simulation des motorisierten Individualverkehrs	140
7.2	Entwickelte Verkehrsmodelle	141
7.3	Dynamische Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs am Beispiel der EXPO 2000	143
8.	Literaturverzeichnis	145

Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

1. Problemstellung und Zielsetzung

1.1 Allgemeines

Seit mehr als 20 Jahren werden Verkehrsnachfragemodelle und Verkehrsumlegungsmodelle für den motorisierten Individualverkehr in der Praxis zur Verkehrsplanung eingesetzt. Die grundlegenden Algorithmen der Verkehrsplanungsmodelle, wie z.B. die Algorithmen zur Bestimmung der kürzesten Wege zwischen zwei Punkten, sind dabei im wesentlichen unverändert geblieben. Meist hat man sich, so auch in der Region Hannover, bei der Berechnung der Verkehrsnachfrage auf die Ermittlung des werktäglichen Normalverkehrs beschränkt. Durch die enorme Steigerung der Rechenleistung der Computer in den letzten Jahren ist es jedoch heute möglich, Verkehrsumlegungen für große Verkehrsnetzmodelle in so kurzen Zeiträumen zu berechnen, dass online Netzprognosen auch für große Verkehrsnetzmodelle in greifbare Nähe gerückt sind. Verkehrsleitzentralen in Ballungsräumen werden derzeit in Deutschland und anderen Ländern aufgebaut. Diese Verkehrsleitzentralen brauchen, um den Verkehr zuverlässig steuern zu können, Kurzfristprognosemodelle, um die Verkehrsentwicklung auf einzelnen Streckenabschnitten vorherzusagen. In der Region Hannover ist die move Verkehrsleitzentrale im Aufbau.

Zur Verkehrssteuerung in der Region Hannover während der EXPO 2000 wurden bzw. werden unterschiedliche Systeme aufgebaut:

- eine Wechselwegweisungsanlage,
- mehrere Verkehrsbeeinflussungsanlagen,
- Fahrstreifensignalisierungen an Knotenpunkten der Bundesautobahnen und auf dem Messering,
- ein dynamisches Verkehrsleitsystem zu den P+R-Plätzen und
- ein weitgehend automatisches System zum Schalten der betrieblichen Maßnahme A (Anreise) oder R (Rückreise) (Einrichtungsverkehr auf dem Messeschnellweg während der Anreise und Rückreise zum bzw. vom Messegelände).

Die in der regionalen Planung normalerweise meist ausreichende Modellierung des mittleren werktäglichen Normalverkehrs, die auch für den Großraum Hannover schon vorlag, ist zur Beurteilung der Verkehrsqualität im Straßennetz der Region Hannover während einer Großveranstaltung wie der EXPO 2000 nicht geeignet. Bei dem veranstaltungsbedingten Kraftfahrzeugverkehr während der EXPO 2000 handelt es sich um einen extrem gerichteten Verkehr zum und vom Weltausstellungsgelände. Dieser veranstaltungsbedingte Kraftfahrzeugverkehr wird deutlich ausgeprägte Spitzenstunden aufweisen, die jedoch nicht mit den Hauptverkehrszeiten im werktäglichen Normalverkehr zusammenfallen müssen bzw. sollten.

Während der Hauptanreisezeit zur Weltausstellung ist es auf dem Messeschnellweg erforderlich, die betriebliche Maßnahme A (Einrichtungsverkehr auf dem Messeschnellweg zwischen der AS Hannover-Buchholz und dem Weltausstellungsgelände) zur temporären Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Hannoverschen Hauptverkehrsstraßennetzes einzusetzen, wie dies auch schon während der Leitmessen (Hannover Messe Industrie, CeBIT) üblich ist. Aufgrund der deutlich längeren Dauer der Veranstaltung EXPO 2000 im Vergleich zu den Leitmessen wurde es zur Verminderung des ohnehin schon hohen Einsatzes der Polizei erforderlich, ein weitgehend automatisches System zur Aktivierung und Deaktivierung der Maßnahmen A und R zu schaffen.

In der Region Hannover wurde seit dem Jahr 1995 ein Lenkungskonzept für die Weltausstellung EXPO 2000 erarbeitet [2]. Dieses wird von der move GmbH, die den Verkehr während der Weltausstellung EXPO 2000 steuern soll, umgesetzt werden. Die anreisenden Besucher sollen nach dem entwickelten Lenkungskonzept so gesteuert werden, dass die vorhandene Infrastruktur optimal ausgenutzt werden kann.

Die bisher in der Region Hannover eingesetzten Verkehrsumlegungsmodelle DIAL-IV [28] und VISUM [42] konnten jedoch dieses Verkehrslenkungskonzept nicht bzw. nicht realitätsnah umsetzen, da diese Programmsysteme keine ausreichend flexiblen Möglichkeiten bieten, einzelne Fahrzeugkollektive kontrolliert über vorgegebene Routen zu einem definierten Ziel zu führen. Auch die Abbildung eines dynamischen Verkehrsleitsystems zu P+R-Plätzen ist mit diesen Programmsystemen nicht möglich.

Zur Prüfung und Verfeinerung des Verkehrslenkungskonzeptes für die Weltausstellung EXPO 2000 war es erforderlich, mit den am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau (IVH) eingesetzten ökonomischen Verkehrsnachfragemodell SAN [4][55] stundengenaue Verkehrsnachfragematrizen für den Großraum Hannover zu ermitteln. Darüber hinaus musste ein neues Verkehrsmodell entwickelt werden, welches es ermöglicht, den veranstaltungsbedingten Verkehr in der Region realitätsnah und konform zum erarbeiteten Lenkungskonzept abzubilden. Da das Lenkungskonzept für die EXPO 2000 die Rahmenbedingungen für die in dieser Arbeit entwickelten Verkehrsplanungsmodelle vorgegeben hat, wird es hier zunächst kurz erläutert.

1.2 Lenkungskonzept für die Weltausstellung EXPO 2000

1.2.1 Allgemeines

Für die Koordination der Planungen für die Weltausstellung EXPO 2000 wurde im Mai 1995 vom Niedersächsischen Ministerium für Wirtschaft, Technologie und Verkehr der Arbeitskreis Verkehrsmanagement eingerichtet. Im Arbeitskreis Verkehrsmanagement haben Vertreter der zuständigen Verkehrsbehörden, der betroffenen Städte und Landkreise, der Polizei, der Üstra Hannoverschen Verkehrsbetriebe AG, der Deutschen Bahn AG, der move GmbH, der Ingenieurgemeinschaft Schnüll-Haller, der TransTeC Transport und Technologie Consult Hannover GmbH, der Deutschen Messe GmbH, der Flughafengesellschaft, des Institutes für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, sowie der EXPO 2000 GmbH mitgearbeitet

Entsprechend dem Motto der EXPO 2000 "Mensch - Natur - Technik" wurde die Verkehrsplanung für die EXPO 2000 überwiegend auf öffentliche Verkehrsmittel ausgerichtet. Trotzdem ist für den gesamten Zeitraum der EXPO 2000 vom 1. Juni bis zum 31. Oktober mit einem zusätzlichen täglichen EXPO-bedingten Kraftfahrzeugverkehr von etwa 25.000 Pkw und bis zu 1.900 Bussen zum Weltausstellungsgelände zu rechnen. Mit den P+R-Plätzen stehen in der Region Hannover insgesamt etwa 60.000 Stellplätze für Personenkraftwagen von Besuchern der Weltausstellung EXPO 2000 zur Verfügung. Die Veranstaltungsdauer und das Motto der EXPO 2000 "Mensch - Natur - Technik" gestatten es nicht, die EXPO-bedingten Kraftfahrzeugverkehre, wie zu den Leitmessen, über alle denkbaren Zufahrtsstraßen abzuwickeln. Der veranstaltungsbedingte Kraftfahrzeugverkehr soll deshalb auf Bundesautobahnen und Schnellwege konzentriert werden. Die Verträglichkeit der Kraftfahrzeugströme zum Weltausstellungsgelände der EXPO 2000 mit dem Normalverkehr im Großraum Hannover und mit dem täglichen Leben in den angrenzenden Wohnquartieren stand im Vordergrund der Verkehrsplanung für die EXPO 2000.

Der Normalverkehr in der Region Hannover bleibt von einem zusätzlichen Verkehrsaufkommen dieser Größenordnung nicht unbeeinflusst. Mit einer Verlagerung eines Teils des ortskundigen Normalverkehrs von den Bundesautobahnen und Schnellwegen auf andere nachgeordnete Straßen ist während der EXPO 2000 zu rechnen. In der morgendlichen Spitzenstunde ist die Leistungsfähigkeit des Messeschnellweges aus Richtung Norden auch bei dreistreifiger Abmarkierung auf dem eigentlich zweistreifigen Teilstück in unmittelbarer Nähe des Messegeländes überschritten. Die Einführung einer betrieblichen Maßnahme, wie z.B. der Maßnahme A (Anreise) mit Einrichtungsverkehr auf dem Messeschnellweg in der morgendlichen Spitzenstunde, ist zur Abwicklung des Verkehrs auf dem nur dreistreifigen Messering und zur richtungsbetonten Beschickung der Parkplätze am Weltausstellungsgelände notwendig (vgl. Abb. 1).

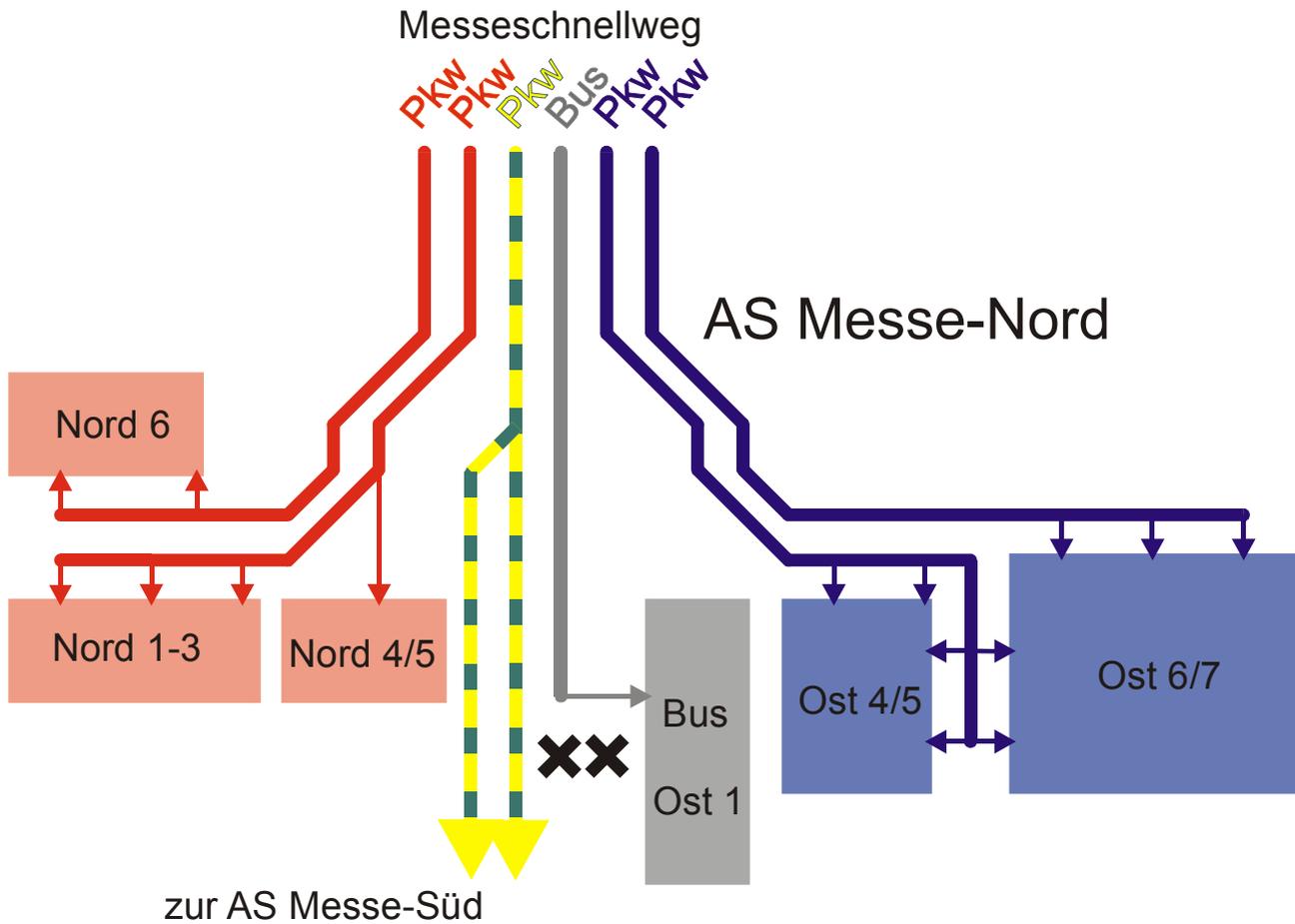


Abb. 1: Beschickung der Parkplätze vom Messeschnellweg an der AS Messe-Nord bei aktivierter Maßnahme A

Damit der Verkehr auf dem Messering optimal verteilt werden kann, wurden die Parkplätze am Weltausstellungsgelände in Parkbereiche unterteilt (vgl. Abb. 2). Die Parkbereiche wurden farblich unterschieden (Rot=Nord, Blau=Ost, Grün=Süd, Gelb=West). Das Parkleitsystem am Messering ermöglicht es den anreisenden Besucherverkehr gezielt zu einem Parkplatz innerhalb eines Parkbereiches zu lenken und gestattet es so alle Parkplätze am Weltausstellungsgelände gleichzeitig zu beschicken.



Abb. 2: Parkbereiche am Weltausstellungsgelände

Durch den Verkauf von Parkberechtigungen für Stellplätze am Weltausstellungsgelände, die den potentiellen Anreiserichtungen zugeordnet sind, lassen sich kritische Situationen im Haupttroutennetz und auf dem Messering verringern (vgl. Abb. 3 und 4). Es ist jedoch bis heute noch unklar, in wie weit das eingesetzte Ticketvertriebssystem diese Möglichkeiten zur Verkehrsoptimierung realisiert.

Wenn während der Anreise zur EXPO 2000 der Messeschnellweg im Einrichtungsbetrieb zum Weltausstellungsgelände genutzt wird, bedeutet dies für den morgendlichen Normalverkehr vor allem aus Richtung Süden eine erhebliche Beeinträchtigung. Der Normalverkehr, der sonst den Messeschnellweg in Fahrtrichtung Norden befährt, wird durch die Einführung des Einrichtungsverkehrs auf dem Messeschnellweg in Fahrtrichtung Süden auf andere parallel verlaufende Straßen verdrängt. Zur Minimierung der nachteiligen Folgen für den werktäglichen Normalverkehr und zur Minimierung der Umweltbeeinträchtigungen für die Einwohner des Großraums Hannover wird die zielorientierte Strategie verfolgt, den An- und Abreiseverkehr zum und vom Weltausstellungsgelände nach Möglichkeit ausschließlich über die Bundesautobahnen und Schnellwege zu lenken (vgl. Abb. 3 und 4).

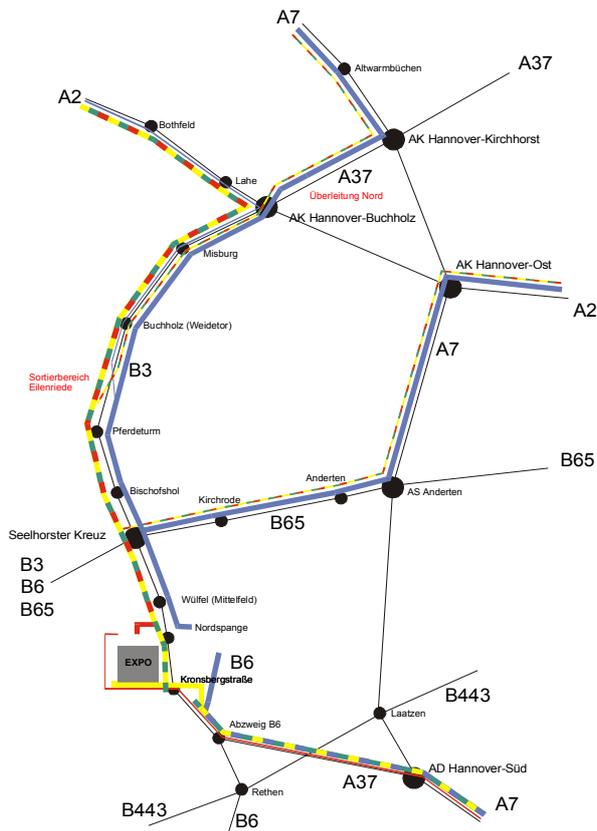


Abb. 3: Verkehrslenkungsstrategie für die Anreise zum Weltausstellungsgelände

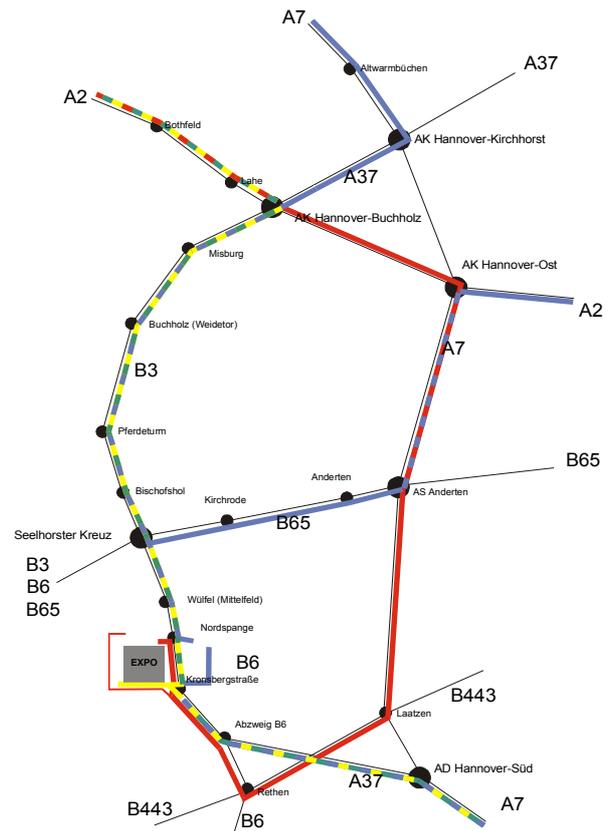


Abb. 4: Verkehrslenkungsstrategie für die Abreise vom Weltausstellungsgelände

Die ersten Verkehrsmodellrechnungen für den motorisierten Individualverkehr während der EXPO 2000 wurden im Jahre 1996 in der Untersuchung „Verkehrliche Auswirkungen EXPO-bedingter Zusatzverkehre im Großraum Hannover“ [47] durchgeführt. Da das P+R-Konzept der EXPO GmbH zum damaligen Zeitpunkt noch nicht abschließend festgelegt war, konnten in dieser Untersuchung lediglich die schon feststehenden 25.000 Stellplätze am Weltausstellungsgelände berücksichtigt werden. Zu dieser Untersuchung ist anzumerken, dass lediglich der werktägliche Verkehr, also die Überlagerung des An- und Abreiseverkehrs zur EXPO 2000 mit dem Berufsverkehr, untersucht wurde. Die Wochenenden, an denen mit den höchsten Besucherzahlen zu rechnen ist, blieben unberücksichtigt. In dieser Untersuchung wurden erstmals die Verlagerungseffekte von den Bundesautobahnen in das nachgeordnete Netz aufgezeigt und auch die Folgen einer Aktivierung der Maßnahme A auf dem Messeschnellweg in Hannover ermittelt.

1.2.2 Festlegung der Hauptrouten und der Ausweichrouten

Im Arbeitskreis Verkehrsmanagement sind die Haupt- und die Ausweichrouten festgelegt worden, über die der EXPO-bedingte Zusatzverkehr abgewickelt werden soll. Es besteht die Zielsetzung, die Routen dieser beiden Kategorien auf die Bundesautobahnen und die Schnellwege bzw. die Bundesstraßen zu begrenzen. Durch das Lenkungskonzept [2] wird die Leistungsfähigkeit des zur Verfügung stehenden Bundesautobahn- und Schnellwegenetzes bis an seine Grenze ausgenutzt werden. Es wird daher zu Minderungen der Verkehrsqualität kommen, die aber insgesamt bisher als hinnehmbar eingestuft wurden. Bei größeren Störungen auf den Hauptrouten, insbesondere auf den Bundesautobahnen, muss jedoch mit stärkeren Behinderungen gerechnet werden. Die drei festgelegten Ausweichrouten B 65 West (zwischen der AS Bad Nenndorf und dem Seelhorster Kreuz), B 65 Ost (zwischen der AS Peine und dem Seelhorster Kreuz) und B 6 Süd (zwischen der AS Hildesheim und dem Weltausstellungsgelände) sind nicht in der Lage, den kompletten Umleitungsverkehr aufzunehmen (vgl. Abb. 5). Ein entsprechender Ausbau ist weder möglich noch sinnvoll oder wünschenswert (vgl. Untersuchung der Ausweichrouten [52]).

Der Arbeitskreis Verkehrsmanagement hat daher folgende Kriterien für eine Aktivierung der Ausweichrouten festgelegt [2]:

- Die Aktivierung der Ausweichrouten ist grundsätzlich das letzte Mittel,
- Ausweichrouten werden nur aktiviert, wenn eine Richtungsfahrbahn der Bundesautobahnen voll gesperrt werden muss,
- die Vollsperrung muss nach der Einschätzung der Polizei länger als eine Stunde dauern,
- auf der Ausweichroute darf keine Störung vorliegen und
- die auf der Ausweichroute erforderlichen Begleit- und Sicherungsmaßnahmen müssen durchgeführt worden sein.

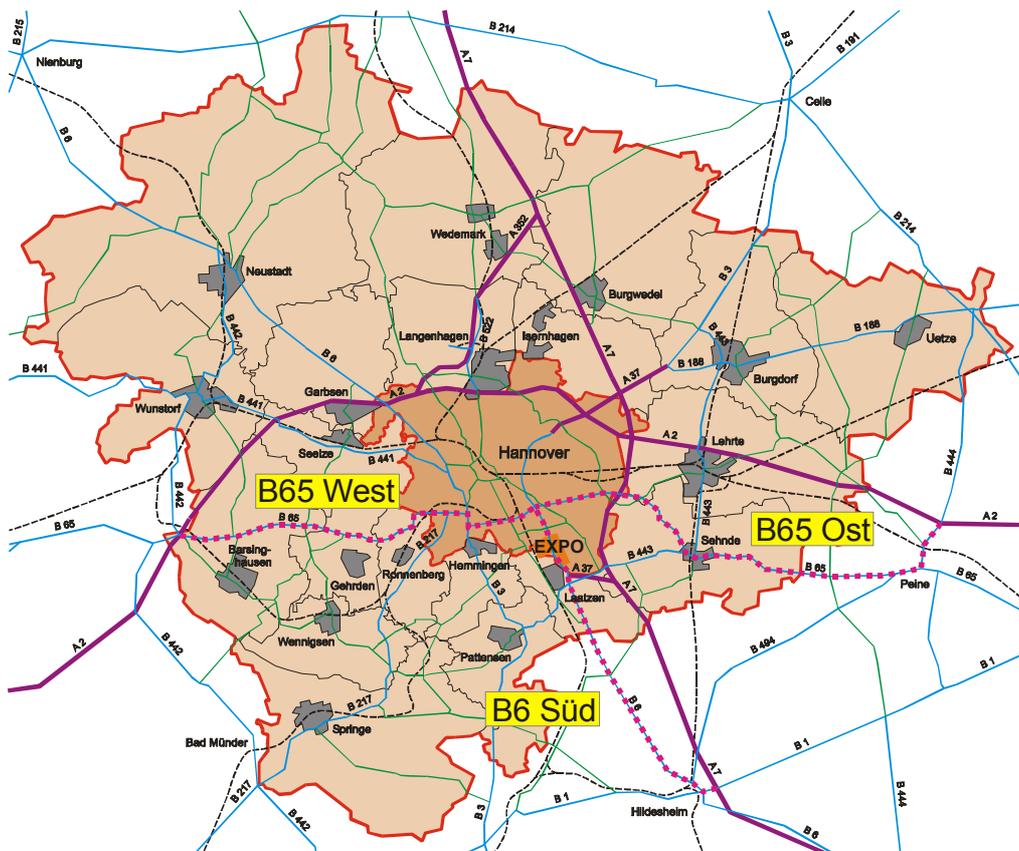


Abb. 5: Ausweichrouten während der Weltausstellung EXPO 2000

1.2.3 Besuchermengen

In den Untersuchungen für die EXPO 2000 sind unterschiedliche Szenarien von möglichen Besuchermengen mit bis zu 450.000 Besuchern an einem Tag geprüft worden. Nach dem Kapazitätsabgleich für alle Verkehrsmittel wurde von der EXPO 2000 GmbH eine Mengenbegrenzung auf maximal 400.000 Besucher an den Wochenenden und 370.000 Besucher an den Werktagen festgelegt (vgl. Abb. 6).

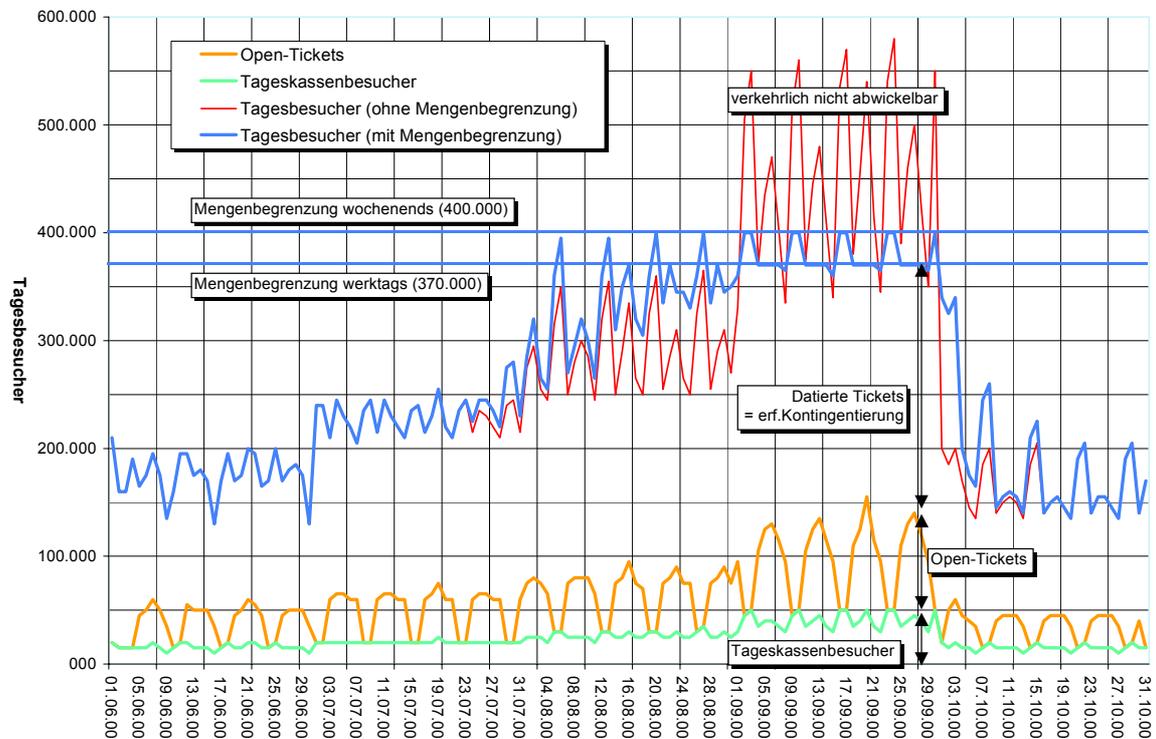


Abb. 6: Prognose der Besuchermengen über den Veranstaltungszeitraum der EXPO 2000 (Quelle: EXPO GmbH)

Ein Aufweichen der angestrebten Mengenbegrenzungen würde nach der Untersuchung „Wochentagspezifische Schwachstellenanalyse für Bundesfernstraßen“ [48] aus dem Jahre 1998 zu Überlastungen der Bundesautobahnen und somit zu erheblichen Staus in der Region führen.

1.2.4 Prognostizierte An- und Abreiseganglinien

Die An- und Abreiseganglinien sind in den Untersuchungen für die EXPO 2000 immer wieder verfeinert worden. In der Untersuchung „Wochentagspezifische Schwachstellenanalyse für Bundesfernstraßen während der EXPO 2000“ [48] wurde zur Reduzierung der morgendlichen Anreisespitze des EXPO-Besucherverkehrs empfohlen, etwa 25% der Stellplätze am Weltausstellungsgelände für Besitzer von Nachmittagskarten zu reservieren. Durch eine Reservierung der Stellplätze für Besucher mit Nachmittagskarten ist eine Reduktion des Spitzenstundenanteils von 28% auf 21% des Anreiseverkehrs zu erreichen (vgl. Abb. 7).

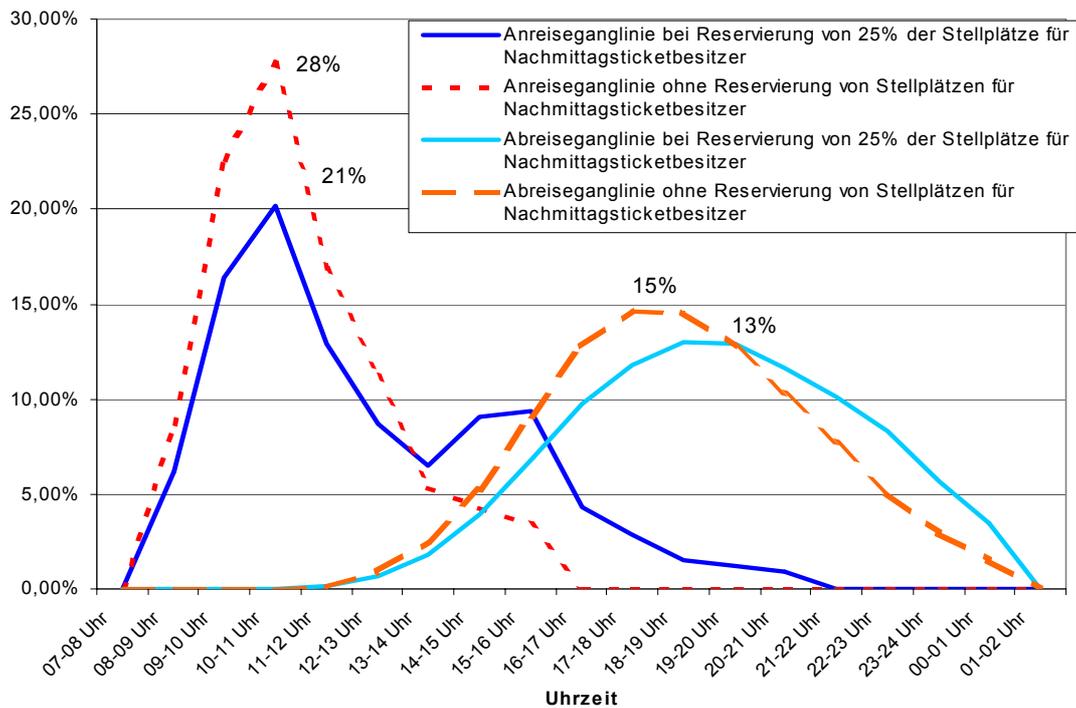


Abb. 7: Prognostizierte An- und Abreiseganglinie für den motorisierten Individualverkehr während der EXPO 2000

Diese Möglichkeit zur Reduktion der Anreisespitzenstunde wurde von der EXPO 2000 GmbH nicht realisiert, da das genutzte Ticketvertriebssystem dafür nicht flexibel genug ist. Es ist daher am Weltausstellungsgelände von einer Anreisespitzenstundenanteil von etwa 28% auszugehen.

1.2.5 Prognose der Besucherherkunft

Basierend auf Auswertungen der Besucherbefragungen im In- und Ausland sind vom Büro Albert Speer & Partner (AS&P) Prognosen über die Besucherherkunft erstellt worden [32]. Entsprechend der dortigen Prognose wurde in dieser Untersuchung die in Tabelle 1 dargestellte Besucherherkunft zugrunde gelegt.

Anreise aus	Fernverkehr	Umland	Anreise aus	Stadt Hannover
Westen	29,6%	3,3%	Hannover Nord	1,2%
Süden	14,8%	3,3%	Hannover Mitte	2,4%
Norden	18,8%	3,3%	Hannover Süd	1,2%
Osten	18,8%	3,3%		
Summe	82,0%	13,2%		4,8%

Tab. 1: Prozentuale Prognose der Besucherherkunft [32]

Die meisten Besucher reisen nach den Prognosen für die EXPO 2000 aus Richtung Westen an (vgl. Tab. 1).

Im Jahre 1999 hat das Büro Albert Speer und Partner eine Fortschreibung der Prognose der Besucherherkunft vorgenommen [33][38]. Diese basiert auf der inzwischen im Auftrag der EXPO GmbH und der move GmbH durchgeführten Befragung zum Thema Verkehr durch das Büro Roland Berger [45]. Die auf dieser Befragung beruhenden neuen Prognosen wurden in der Arbeitsgruppe Simulation nicht mehr abgestimmt und beruhen aus der Sicht des Institutes auf einer zu geringen Datenbasis für die Bundesrepublik Deutschland (vgl. Stellungnahme des IVH [54]).

Die beiden Maximalszenarien für Werktag und für das Wochenende sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Kategorie I	Szenario 370.000 Besucher Werktags				Szenario 400.000 Besucher Samstags / Sonntags			
	Pkw-Fahrten zum Weltausstellungsgelände				Fahrten zum Weltausstellungsgelände			
	Fernverkehr	Umland	Nord	Hannover	Fernverkehr	Umland	Nord	Hannover
West	6.455	1.407		269	West	6.513	1.367	257
Süd	4.695	1.330	Mitte	539	Süd	4.737	1.291	514
Nord	3.717	702	Süd	269	Nord	3.750	682	257
Ost	4.695	922			Ost	4.737	895	
	Summe			25.000	Summe			25.000
Kategorie II	Pkw-Fahrten zu P+R-Plätzen				Pkw-Fahrten zu P+R-Plätzen			
	Fernverkehr	Umland	Nord	Hannover	Fernverkehr	Umland	Nord	Hannover
West	4.951	809	Nord	26	West	5.821	916	29
Süd	3.601	765	Mitte	52	Süd	4.233	865	57
Nord	2.851	404	Süd	0	Nord	3.351	457	0
Ost	3.601	530			Ost	4.233	600	
	Summe			17.590	Summe			20.562
Kategorie III	Pkw-Fahrten zu Parkplätzen an S-Bahn und Stadtbahn				Pkw-Fahrten zu Parkplätzen an S-Bahn und Stadtbahn			
	Fernverkehr	Umland	Nord	Hannover	Fernverkehr	Umland	Nord	Hannover
West	1.238	540	Nord	232	West	1.455	611	258
Süd	900	510	Mitte	465	Süd	1.058	577	517
Nord	713	269	Süd	258	Nord	838	305	287
Ost	900	354			Ost	1.058	400	
	Summe			6.379	Summe			7.364
	gesamt			48.969	gesamt			52.926

Tab. 2: Prognose der Besucherherkunft [32]

1.2.6 P+R-Konzept

Während der EXPO 2000 stehen am Weltausstellungsgelände nur 25.000 Stellplätze zur Verfügung. Dies sind deutlich weniger Stellplätze als während der großen Leitmessen der CeBIT und der Hannover Messe Industrie zur Verfügung stehen (ca. 40.000 Stellplätze). An Spitzentagen werden zur EXPO 2000 deutlich mehr Besucher erwartet als während der Leitmessen. Es wurde daher trotz der überwiegend auf den öffentlichen Verkehr ausgerichteten Planung erforderlich zusätzlich zu den 25.000 Stellplätzen am Weltausstellungsgelände auch noch P+R-Plätze in der Region Hannover zu schaffen (vgl. Abb. 8).

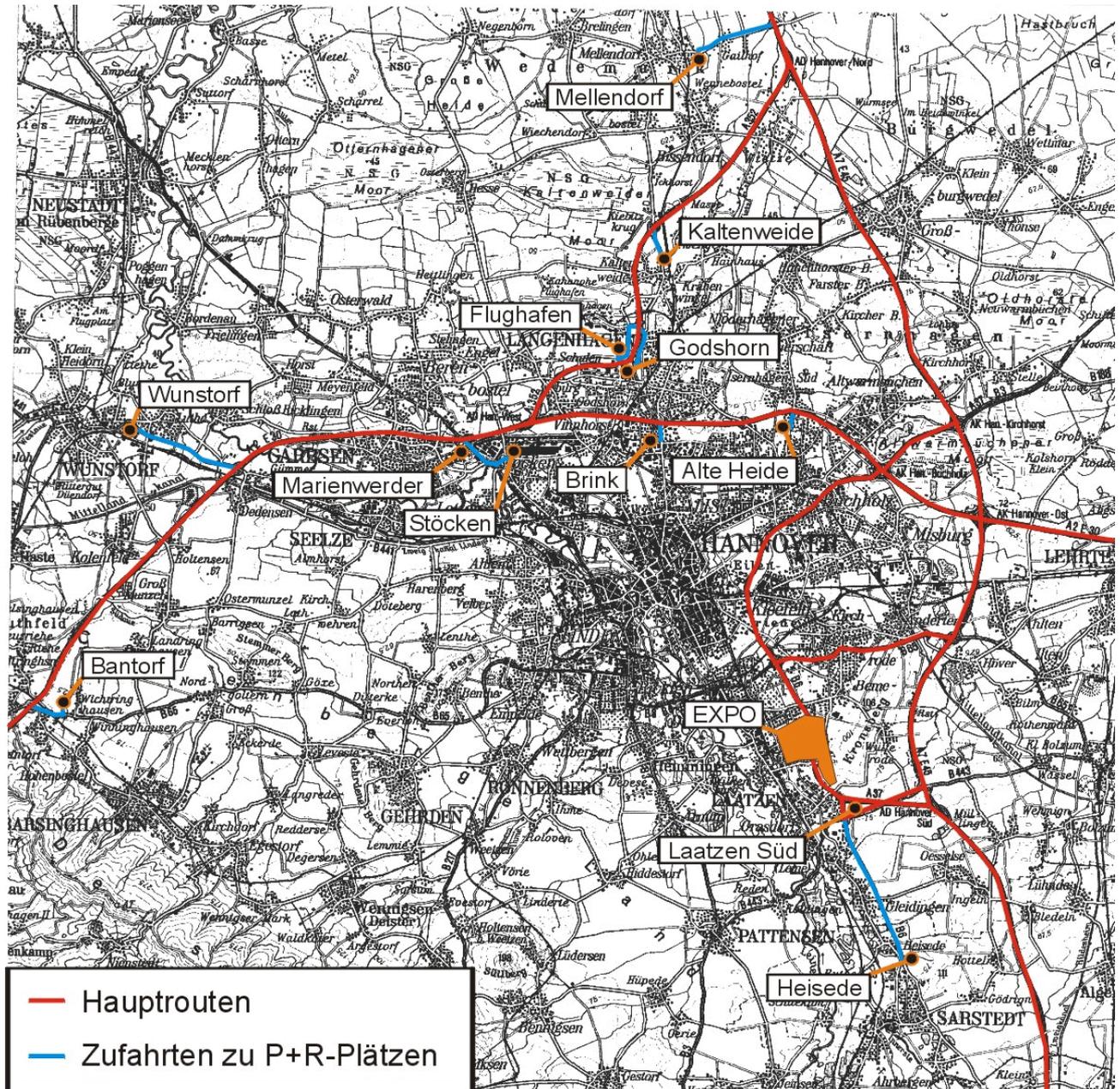


Abb. 8: Parkplätze für die EXPO 2000

Die Nutzung von P+R-Plätzen in der Region ist auch zur Reduktion der kritischen Verkehrsstärken während der Hauptverkehrszeiten des werktäglichen Normalverkehrs und während der An- und Abreisespitzenstunden zur EXPO 2000 erforderlich.

Die etwa 35.000 P+R-Plätze, die während der Weltausstellung EXPO 2000 zur Verfügung stehen, verteilen sich auf die P+R-Plätze wie in Tabelle 3 dargestellt.

P+R-Platz	Stellplätze
Bantorf	1500
Wunstorf	2000
Marienwerder	1.000 (nur Sa/So)
Stöcken	3.000 (nur Sa/So)
Brink	2000
Alte Heide	3000
Mellendorf	1500
Kaltenweide	2000
Flughafen	4000
Langenhagen Mitte	2100
Laatzen Süd	10000
Heisede	3000

Tab. 3: Stellplätze auf den P+R-Plätzen

1.3 Fazit

Schon seit Jahren wird in der Region Hannover bei Großveranstaltungen wie der Hannover Messe Industrie oder der CeBIT auf dem Messegelände der Deutschen Messe AG eine besondere betriebliche Maßnahme auf dem Messeschnellweg eingerichtet. Der an- und abreisende Personenkraftwagenverkehr wird in den Spitzenzeiten auf dem vier- bzw. abschnittsweise sogar sechstreifigem Messeschnellweg jeweils im Einrichtungsverkehr geführt (Maßnahme A, Maßnahme R). Untersuchungen haben gezeigt (vgl. [48][49][50]), dass zumindest die Maßnahme A auch während der Großveranstaltung EXPO 2000 notwendig ist. Es hat sich gezeigt, dass es nur mit einer dynamischen Simulation eines ganzen Veranstaltungstages möglich ist, das Verkehrsaufkommen einer solchen Großveranstaltung mit der Nutzung von dezentral gelegenen P+R-Plätzen im Modell realitätsnah abbilden.

Für eine dynamische Simulation des Verkehrsablaufes ist es erforderlich, auch das Netzmodell dynamisch verändern zu können, um während betrieblicher Maßnahmen wie z.B. der Maßnahme A und R Prognosen für den Verkehrsablauf machen zu können. Zur Abbildung des Verkehrsablaufes während einer Großveranstaltung wie der EXPO 2000 sind Verkehrsmodellrechnungen mit möglichst hoher zeitlicher Differenzierung erforderlich, da sonst die auftretenden Spitzenbelastungen nicht genau genug eingeschätzt werden können. Zur Abbildung des Normalverkehrs und der während großer Veranstaltungen in Hannover üblichen betrieblichen Maßnahmen A und R sind zumindest drei Netzmodellzustände (Normalzustand, Maßnahme A, Maßnahme R) erforderlich.

Zur Abbildung eines Verkehrslenkungs Konzeptes mit der entsprechenden Wegweisung ist es erforderlich, den Verkehr durch die Besucher der EXPO 2000 im Verkehrsmodell so realitätsnah wie möglich abzubilden. Das Verhalten von ortskundigen und ortsunkundigen Besuchern wird sich während der EXPO 2000 deutlich voneinander unterscheiden. Dies muss daher auch in einem Verkehrsumlegungsmodell Berücksichtigung finden, welches eine Großveranstaltung abbilden soll. Der Einfluss des Schwerverkehrs ist in einem dynamischen Simulationsprozess eines ganzen Tages nicht mehr zu vernachlässigen. Den wechselseitigen Beeinflussungen zwischen dem Verkehr mit Personenkraftwagen und dem Schwerverkehr, mit einem anderen Beschleunigungsverhalten und einer anderen Endgeschwindigkeit, muss Rechnung getragen werden. Die Verkehrsumlegung von Schwerverkehr und Verkehr mit Personenkraftwagen muss daher im Modell simultan erfolgen.

Zur Vermeidung von kritischen Verkehrssituationen in der Region Hannover während der EXPO 2000 wird ein dynamisches Verkehrsleitsystem für die P+R-Plätze eingesetzt. Zur realitätsnahen Berücksichtigung eines Verkehrsleitsystems für P+R-Plätze ist es erforderlich, einen Veranstaltungstag als Gesamtsystem zu simulieren, da nur so der richtungsbezogene Zusammenhang zwischen an- und abreisenden Besucherverkehrsströmen erhalten bleiben kann. Wenn in der Anreisespitzenstunde aufgrund von Staus Verkehr aus einer Anreiserichtung auf einen bestimmten P+R-Platz gelenkt wird, ist es erforderlich, dies auch während der Abreise zu berücksichtigen, damit die auf dem P+R-Platz abgestellten Personenkraftwagen von Besuchern auch wieder in dieselbe Richtung, aus der sie gekommen sind, abreisen.

Ziel dieser Arbeit ist es zu überprüfen, ob aufbauend auf dynamischen Verkehrsnachfrageinformationen für den werktäglichen Normalverkehr eine Routensuche und Verkehrsumlegung auch in großen, dicht vermaschten, stark differenzierten Verkehrsnetzmodellen z.B. zur Prognose des Verkehrsablaufes für den jeweils folgenden Tag möglich ist. Als Fallbeispiel wird dabei der Verkehrsablauf im Großraum Hannover während der EXPO 2000 abgebildet. Dem Verkehrsplaner und dem Verkehrslenker soll so ein Werkzeug zur Verfügung gestellt werden, mit dem die Entscheidung zur Verkehrssteuerung im vollen Bewusstsein der Folgen eines steuernden Eingriffes erfolgen kann.

2. Klassische Verkehrsplanungsmodelle

2.1 Allgemeines

Der Verkehrsplanungsprozess kann in drei Phasen unterteilt werden (vgl. Abb. 9):

- Problemanalyse,
- Maßnahmenuntersuchung und
- Entscheidung.

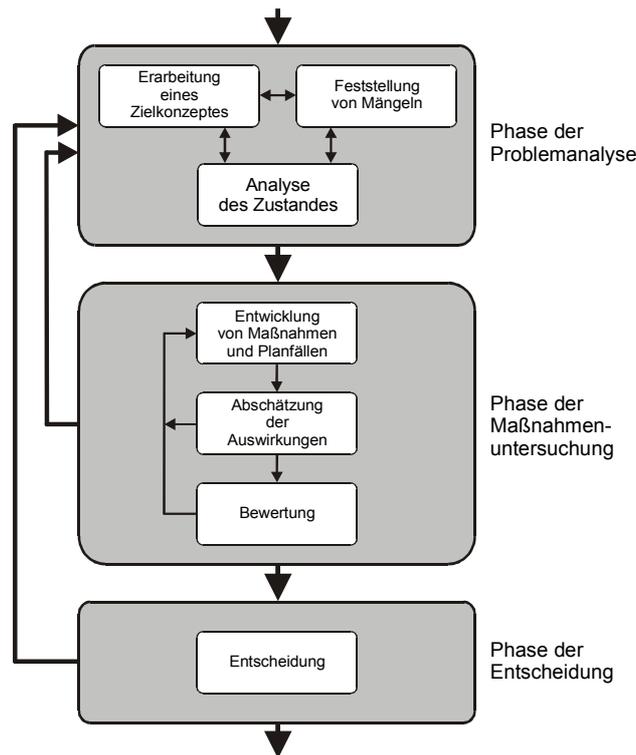


Abb. 9: Verkehrsplanungsprozess [13]

Die **Phase der Problemanalyse** umfasst die Elemente

- Erarbeitung eines Zielkonzeptes,
- Feststellung von Mängeln und
- Analyse des Zustandes.

Die Reihenfolge ist nicht eindeutig definiert, dies sollen die mehrfachen Rückkopplungspfeile verdeutlichen (vgl. Abb. 9). Die heutigen Planungen beginnen in der Regel mit Darstellungen von Zielsetzungen.

Die Phase der Zustandsanalyse umfasst die Ermittlung der für die Modellbildung notwendigen Daten zur Ermittlung der Verkehrsnachfrage.

Die **Phase der Maßnahmenuntersuchung** wird die in die Elemente

- Entwicklung von Maßnahmen und Planfällen,
- Abschätzung der Auswirkungen und
- Bewertung

unterteilt (vgl. Abb. 9). Auch in der Phase der Maßnahmenuntersuchung ist eine Reihe von Rückkopplungen zu beachten, da sich aus der Abschätzung der Auswirkungen einer untersuchten Maßnahme und der Bewertung einer Maßnahme neue Maßnahmen ableiten lassen, die zu anderen Auswirkungen bzw. zu anderen, besseren Bewertungen einer modifizierten Maßnahme führen. Die Phase der Maßnahmenuntersuchung ist fast zwangsläufig in einem iterativen Prozess zu Maßnahmenoptimierung eingebettet. Die Maß-

nahmenentwicklung sollte wie der gesamte Planungsprozess interdisziplinär (ganzheitlich) erfolgen, da sich Maßnahmen heute in der Regel nicht mehr auf bauliche und betriebliche Bereiche beschränken, sondern insbesondere bei integrierten Verkehrskonzepten ökonomische, ökologische, städtebauliche und häufig auch ordnungspolitische Einflussbereiche erfassen. Verkehrsplanungsmodelle sind wichtige Werkzeuge des Planers zur Untersuchung von Maßnahmen.

Nach der **Entscheidung** über die ausgewählte Planungsmaßnahme erfolgt in der Regel ein planungsrechtliches Verfahren, mit dem Ziel den Plan rechtsfähig zu gestalten. Da fast jede Planung in die Rechte Dritter eingreift, bedarf sie der Legitimation nach den jeweiligen Rechtsvorschriften. Im planungsrechtlichen Verfahren, auf dem Wege dazu oder auch schon während des eigentlichen Planungsprozesses ergeben sich intensive Kontakte zu den beteiligten Trägern anderer öffentlicher Belange, zu betroffenen Anwohnern und Betrieben. Jede Planung erfordert daher ihre fallbezogene Öffentlichkeitsarbeit, um die Beteiligten ausreichend zu informieren und Meinungen zu erforschen. Ohne einen Konsens der Beteiligten kann sich die Realisierung einer geplanten Maßnahme deutlich verzögern (WERMUTH [69]).

2.2 Verkehrsplanungsmodelle

2.2.1 Allgemeines

Zur Planung des Verkehrsangebotes und zur Abschätzung der Auswirkungen von Maßnahmen und Planfällen muss die künftige Verkehrsnachfrage bekannt sein. Künftige Verkehrsströme werden daher mit Verkehrsplanungsmodellen berechnet, die die Zusammenhänge zwischen der potenziellen Verkehrsnachfrage und ihren Einflussgrößen in der Form von Regressionsgleichungen beschreiben. Mit Verkehrsplanungsmodellen lassen sich die Anzahl und die räumliche und zeitliche Verteilung künftiger Fahrten zwischen den Quellen und Zielen eines Planungsraumes bzw. die benutzten Strecken eines Straßen- oder Nahverkehrsnetzes berechnen, wenn die künftigen Strukturdaten, die künftigen Verhaltensweisen und die künftige Verkehrsinfrastruktur bekannt sind. Prinzipiell kann man zwei große Gruppen von Verkehrsplanungsmodellen unterscheiden (vgl. Abb. 10):

- **die traditionellen vierstufigen Sequenzmodelle**, die den Entscheidungsprozess von Personen in vier als unabhängig angenommene Teilentscheidungen zerlegen, und
- **die zweistufigen Sequenzmodelle**, bei denen die bestehenden Abhängigkeiten zwischen den Teilentscheidungen durch ein Gesamtmodell für die Verkehrsnachfrage bereits im Modellansatz berücksichtigt werden.

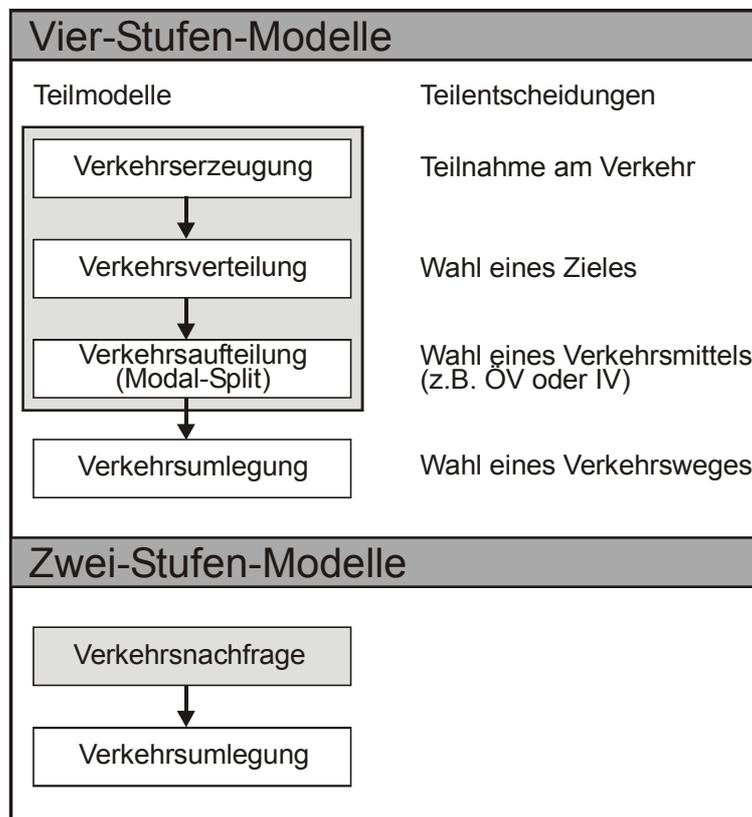


Abb. 10: Gliederung von Verkehrsnachfragemodellen in Teilmodelle

Dabei kann man aufgrund des methodischen Ansatzes unterscheiden nach:

- **Mikro- oder Individualverhaltensmodelle**, bei denen das Verkehrsverhalten von Einzelpersonen oder verhaltenshomogenen Personengruppen nachvollzogen wird und bei denen für die einzelnen Ausprägungen der verschiedenen Wegemerkmale Wahrscheinlichkeiten berechnet werden oder mittels eines stochastischen Simulationsverfahrens (z.B. Monte-Carlo-Simulation) jedem Weg und jedem Wegemerkmale eine bestimmte Ausprägung zugeordnet wird, und
- **Makro- oder Aggregatmodelle**, bei denen die Verkehrsgrößen für eine Menge von Personen mittels analytischer Funktionen in Abhängigkeit von Strukturgrößen ermittelt werden. Erfolgt die Ermittlung der

Menge nach Raumeinheiten (z. B. nach Verkehrszellen), so können als Strukturgrößen z.B. die Einwohner und die Beschäftigtenzahl verwendet werden.

Bei der Verkehrsziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahl wählt der Verkehrsteilnehmer jeweils eine von mehreren Alternativen aus. Deshalb kann bei diesen Modellen die gleiche Modellkonzeption zugrunde gelegt werden. Zu nennen sind die **individuellen Entscheidungsmodelle**

- **Probitmodell** (hoher Rechenaufwand) und
- **Logitmodell**.

Bei dem Logitmodell hängt die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative lediglich von der Differenz der Widerstände, nicht jedoch von den Absolutwerten der Widerstände der beiden Alternativen ab. Dies widerspricht der Erfahrung, dass mit zunehmenden Absolutbeträgen der Widerstände die Bedeutung gleichbleibender Widerstände abnimmt. Genau diese Tatsache berücksichtigt dagegen das Probitmodell [69]. Schwachstelle der mathematischen Ansätze für das Logit- und Probitmodell bleibt die Definition des Nutzens zweier unterschiedlicher zu beurteilender Widerstände. Die individuelle Nutzeneinschätzung z.B. der Wahl eines Zieles zum Einkaufen kann zwischen unterschiedlichen Personen teilweise erheblich differieren. Auch über einen Tag gesehen kann es bei ein und derselben Person bei unterschiedlichen Verkehrssituationen zu einem unterschiedlichen Zielwahlverhalten kommen.

Das häufigste Klassifikationsmerkmal für Verkehrsnachfragemodelle ist der Simulationsgegenstand, d.h. der Einzelweg oder die Wegeketten (WERMUTH [69]).

- **Verkehrsstrommodelle** bestimmen die Verkehrsströme zwischen jeweils zwei Verkehrszellen für jedes Verkehrsmittel ohne Beachtung des Kontextes der einzelnen Ortsveränderungen in den Wegeketten der betreffenden Personen.
- **Wegekettensmodelle** verfolgen das Ziel, die gesamte Wegeketten einer Person über einen definierten Zeitraum zu simulieren und die im Rahmen dieser Wegeketten aufgesuchten Ziele und benutzten Verkehrsmittel zu ermitteln. Damit bleibt der Bezug zwischen den einzelnen Wegen einer Kette und zur durchführenden Person bzw. zur Personengruppe erhalten.

2.2.2 Verkehrsstrommodelle

2.2.2.1 Verkehrserzeugungsmodelle

Verkehrserzeugungsmodelle werden nach den unterschiedlichen Bezugsgrößen des Verkehrsaufkommens in

- **Raumaggregatmodelle**, mit denen Verkehr von Raumeinheiten (Verkehrszellen) auf der Basis von Strukturdaten ermittelt wird, und
- **Individualverhaltensmodelle**, mit denen Verkehr aus dem Verkehrsaufkommen für einzelne Personen oder Personengruppen in Abhängigkeit von ihren soziodemographischen Merkmalen ermittelt und anschließend über die Personen der Verkehrszelle aggregiert wird.

Raumaggregatmodelle (strukturorientierte Modelle)

Mit einem Raumaggregatmodell wird die Gesamtanzahl aller Wege aus einem Gebiet heraus (Q) oder in ein Gebiet hinein (Z) in Abhängigkeit von den Strukturgrößen einer Raumeinheit (Verkehrszelle) für einen bestimmten Zeitraum (z.B. einen Werktag) ermittelt. Raumaggregatmodelle für größere Gebiete enthalten i.d.R. zumindest die Einwohner, die Arbeitsplätze und die Mobilitäten als variable Strukturgrößen.

Individualverhaltensmodelle (verhaltensorientierte Modelle)

Für die Verkehrsnachfrageermittlung auf der Basis von Individualverhaltensmodellen werden drei Modelltypen unterschieden:

- **Personengruppenmodelle** (soziodemographische Modelle), bei denen die Verkehrsnachfrage aus verhaltenshomogenen Personengruppen und zugehörigen Tätigkeits- bzw. Verhaltensmustern errechnet wird,
- **ökonomische Modelle**, bei denen das individuelle Verhalten aus einer Nutzenmaximierung der Individuen abgeleitet wird und
- **Individualfaktorenmodelle**, die die Wirkungen von Individualfaktoren (Merkmale der Individuen) auf die Aktivitätennachfrage und damit das Verkehrsaufkommen der einzelnen Individuen (mikroskopisch) abschätzen.

Keiner dieser drei Gruppen von Individualverhaltensmodellen eindeutig zuzuordnen ist das Modell SAN von SCHOLZ, BIERSCHENK und WOLFF [4][55], in dem für Personengruppen nach Wegezwecken und Verkehrsmitteln differenzierte „Standard-Mobilitätsfaktoren“ eingeführt werden, aus denen dann die Wegeanzahl ermittelt wird.

2.2.2.2 Verkehrsverteilungsmodelle

Verkehrsverteilungsmodelle haben die Aufgabe, das erhobene oder berechnete Verkehrsaufkommen der Verkehrszellen potenziellen Zielen zuzuordnen. In der klassischen Formulierung des Problems nach Raumaggregaten geht es darum, aus den Quell- und Zielverkehrsvektoren Q_i und Z_j die Matrix der Verkehrsbeziehungen F_{ij} zu berechnen.

Die am häufigsten angewandten Verteilungsmodelle sind:

- das **Gravitationsmodell** und
- das **Nutzenmaximierungsmodell**.

Gravitationsmodell

Der erste Verkehrsverteilungsmodellansatz wurde aus dem aus Gravitationsgesetz der Mechanik abgeleitet.

$$F_{ij} = k \cdot Q_i \cdot Z_j \cdot f(w_{ij})$$

- mit F_{ij} = Fahrten je Zeiteinheit zwischen den Verkehrszellen i und j
 k = empirisch ermittelte Konstante (Verteilungsfaktor)
 Q_i = „Masse“ (Potential) der Verkehrszelle i
 Z_j = „Masse“ (Attraktivität) der Verkehrszelle j
 $f(w_{ij})$ = Widerstandsfunktion $f(w_{ij})=w_{ij}^{-\alpha}$ mit w_{ij} als Widerstand zwischen den Verkehrszellen i und j

In dieser Form erfüllt das Gravitationsmodell nicht die Bedingung der logischen Konsistenz, da die Randbedingungen nicht erfüllt werden. Der Verteilungsfaktor k muss daher so gewählt werden, dass die Randbedingung der Verteilungsmodelle (wenigstens näherungsweise) eingehalten werden.

$$\sum_j F_{ij} = Q_i \quad \text{und} \quad \sum_i F_{ij} = Z_j$$

Bei gleichzeitiger Einhaltung der Randbedingungen wird von Quell-Ziel-Kopplung gesprochen. Mit der Hilfe von Randausgleichsverfahren kann die Konsistenz nachträglich hergestellt werden.

Das Quell- und das Zielverkehrsaufkommen wird mit Hilfe des Gravitationsverfahrens folgendermaßen berechnet:

$$F_{ij}^Q = Q_i \cdot \frac{Z_j \cdot f(w_{ij})}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Z_j \cdot f(w_{ij})} \quad \text{und} \quad F_{ij}^Z = Z_j \cdot \frac{Z_i \cdot f(w_{ij})}{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n Z_i \cdot f(w_{ij})}$$

- mit Q_i = Quellverkehrsaufkommen der Verkehrszelle i [Persf/h]
 Z_j = Zielverkehrsaufkommen der Verkehrszelle j [Persf/h]
 $F(w_{ij})$ = Widerstandsfunktion = $w_{ij}^{-\alpha}$

Nutzenmaximierungsmodell

Zur Ermittlung der Annahmewahrscheinlichkeit p_{ij} der Verkehrszelle j als Ziel einer Ortsveränderung von der Verkehrszelle bei mehreren alternativen Verkehrsmitteln ist zunächst ein Ansatz für die deterministische Nutzenkomponente u_{gj} im multinominalen Logitmodell für die Alternative j zu bestimmen. Das Verteilungsmodell in der allgemeinen Form ergibt sich zu:

$$F_{ij} = Q_i \cdot \frac{Z_j \cdot \exp(-w_{ij})}{\sum_j Z_j \cdot \exp(-w_{ij})}$$

Das Nutzenmaximierungsmodell erfüllt definitionsgemäß die notwendigen Nebenbedingungen.

Widerstandsfunktionen

Die aus unterschiedlichen Prinzipien abgeleiteten Verteilungsmodelle sind durch eine entsprechende Wahl der Widerstandsfunktion ineinander überführbar. Die Anpassung an empirische Verkehrsnachfragedaten führte zu einer Vielzahl von Widerstandsfunktionen, von denen hier eine Auswahl genannt sei (WERMUTH [69]):

$$\begin{aligned}
 f(w) &= \exp(-\alpha \cdot w) && (\alpha > 0) \\
 f(w) &= w^{-\alpha} && (\alpha > 0) \\
 f(w) &= w^{-\alpha} \cdot \exp(-\beta \cdot w) && (\alpha > 0, \beta > 0) \\
 f(w) &= \exp(-\alpha \cdot w^2) && (\alpha > 0)
 \end{aligned}$$

Die Verhaltensparameter α und β in den verschiedenen Widerstandsfunktionen hängen von den Merkmalen der Verkehrsteilnehmer sowie vom Reisezweck ab. Auch spielt die Entfernungszone eine gewisse Rolle. Aus praktischen Untersuchungen wurden die folgenden Werte ermittelt (WERMUTH [69]).

Berufsverkehr	$0,9 < \alpha < 1,3$
Ausbildungsverkehr	$2,0 < \alpha < 3,0$
Einkaufs- und Geschäftsverkehr	$2,0 < \alpha < 2,5$
Sonstiger privater Verkehr	$0,8 < \alpha < 1,2$
Innenstadt	$0,5 < \alpha < 1,2$
Stadtbereich	$0,8 < \alpha < 1,8$
Zonen bis 30 km	$1,7 < \alpha < 2,3$
Zonen über 30 km	$2,0 < \alpha < 3,0$

2.2.2.3 Verkehrsaufteilungsmodelle (Verkehrsmittelwahl)

Einfache Modelle ermitteln lediglich den bimodalen Modal-Split d.h. die Fahrtenanteile des individuellen Kraftfahrzeugverkehrs und des öffentlichen Verkehrs, während genauere Modelle auch den Rad und Fußgängerverkehr einbeziehen.

Die traditionellen Modelle befassen sich ausschließlich mit den objektiven Merkmalen der Verkehrsteilnehmer, während die neueren Verkehrsmittelwahlmodelle zunehmend auch subjektive Situationen berücksichtigen.

Eine Verbesserung der Verkehrsmittelwahlmodelle und der Maßnahmeempfindlichkeit lässt sich erreichen, wenn man berücksichtigt, dass Verkehrsteilnehmer in vielen Fällen infolge objektiver Ursachen (z.B. Sachzwänge durch nicht verfügbare Verkehrsmittel) oder aus subjektiven Gründen (Einstellungen für oder gegen die Nutzung einzelner Verkehrsmittel, fehlende Information o.ä.) hinsichtlich der Verfügbarkeit von Verkehrsmitteln eingeschränkt oder sogar auf ein bestimmtes Verkehrsmittel festgelegt sind.

In einem Aufsatz von SCHÖNHARTING [56] werden die Modal-Splitt-Modelle als „Ein Sammelsurium untauglicher Mittel zur Beschreibung der Verkehrsmittelwahl“ bezeichnet. (Das in dieser Arbeit verwendete ökonometrische Verkehrsnachfragemodell SAN enthält kein Modul zur Ermittlung des Modal-Split vgl. Ziffer 2.3).

2.2.2.4 Verkehrsumlegungsmodelle

Routensuchverfahren

Für die Verkehrswegewahl gelten die folgenden Arbeitshypothesen:

- Die Verkehrsteilnehmer verhalten sich subjektiv vernünftig und wählen unter den ihrer Ortsveränderung zugrunde liegenden Umständen bzw. Verkehrswegenetzuständen in dem ihnen bekannten Netzteil einen Weg, der ihnen günstiger erscheint.
- Die Auswahl des günstigsten Weges erfolgt im Modell mit Hilfe der für die Netzmodellstrecken definierten Widerstandswerte.

Die Verfahren zur Bestimmung kürzester Wege lassen sich unterteilen in

- **Baumverfahren** und
- **Matrixverfahren**.

Effizient und allgemein üblich sind Baumverfahren, bei denen jeweils von nur einer Quelle (der Baumwurzel) jeweils die kürzesten Wege zu allen anderen Knoten (Zielverkehrszellen) ermittelt werden.

Bei der Ermittlung kürzester Wege in einem Graphen G unterscheidet man drei unterschiedliche Probleme:

- **Kürzeste Wege von einem Knoten zu allen anderen Knoten** (Single-Source-Shortest-Path)
 - DIJKSTRA (1959) [11]
 - MOORE (1957) [35]
 - DANTZIG (1959) [9]
- **Kürzeste Wege zwischen allen Knoten** (All-Pairs-Shortest-Path)
 - FLOYD-WARSHALL (1967) [12]
- **Kürzester Weg von einem Knoten zu einem Ziel** (Single-Pair-Shortest-Path)
 - HART-NILSSON-RAPHAEL (1968) [24]
 - PEARL (1984) [39]

Der asymptotisch schnellste Algorithmus ist der von DIJKSTRA. Für einige relativ dichte Graphen ist der Algorithmus zur Ermittlung kürzester Wege zwischen allen Knoten von FLOYD-WARSHALL [12] sehr effizient. Bei Verkehrsnetzen handelt es sich jedoch in der Regel um relativ lichte Graphen, so dass der Algorithmus selten für Verkehrsnetze zum Einsatz kommt.

Die Algorithmen zur Suche eines kürzesten Weges von einem Knoten zu einem Ziel (Single-Pair-Shortest-Path) wurden längere Zeit nicht beachtet, da das Problem asymptotisch nicht schneller zu lösen war, als das Problem der Suche der kürzeste Wege von einem Knoten zu allen anderen Knoten (Single-Source-Shortest-Path). Die Verwendung von Heuristiken hat jedoch auch für dieses Problem einen Algorithmus hervorgebracht. Dieser Algorithmus wurde unter dem Namen A*-Algorithmus oder „Best-First-Search“ bekannt [24][39]. Der Sinn des Einsatzes von Heuristiken ist es, die Zeit für das Finden des kürzesten Weges zu verkürzen. Anders als beim Algorithmus von DIJKSTRA, in dem alle Knoten untersucht werden, betrachten die heuristischen Verfahren nur Knoten, die sinnvoll erscheinen. Die Eigenschaft *sinnvoll* wird dabei mit Hilfe einer Priorität für jeden Knoten gemessen, die sich aus der Summe der Entfernung des Knotens zum Startknoten und der geschätzten Entfernung vom Zielknoten (gemessen mit der Heuristik h) ergibt. Je besser die Heuristikfunktion den tatsächlichen Abstand zum Zielknoten approximiert, um so effizienter ist der A*-Algorithmus im Vergleich zum Algorithmus von DIJKSTRA.

Routenwahlmodelle

Bei den Routenwahlmodellen unterscheidet man

- die **klassischen Bestwegverfahren** (Alles-oder-Nichts),
- die **klassischen Mehrwegverfahren** (Alternativroutensuchverfahren),
- die **belastungsabhängigen Mehrwegverfahren** (Sukzessivverfahren) und
- die **Gleichgewichtsmodelle**.

Den Gleichgewichtsverfahren liegen folgende Arbeitshypothesen zugrunde:

- Die Verkehrsteilnehmer wählen ihre Route so, dass die Fahrtdauer auf allen alternativen Routen gleich und auf allen anderen Routen höher ist; somit kann kein Verkehrsteilnehmer seine Fahrtdauer durch die Wahl eines anderen Weges verringern (Erstes Wardrop'sches Prinzip).
- Jeder Verkehrsteilnehmer wählt seine Route so, dass die Summe aller Fahrzeiten minimal wird (Zweites Wardrop'sches Prinzip).

Die Entscheidung über die Anzahl der zu berücksichtigenden Alternativrouten ist aufgrund der Örtlichkeit zu treffen. Es werden jedoch selten mehr als vier alternative Wege als effiziente Wege einzustufen sein.

Zur Verkehrsumlegung auf mehrere Wege (Alternativroutenverfahren) wird ein Ansatz verwendet, der dem aus der Elektrizitätslehre bekannten Kirchhoffschen Gesetz ähnelt.

$$F_{ijr} = \frac{w_{ijr}^{-\alpha}}{\sum_{k=1}^n w_{ijk}^{-\alpha}} \cdot F_{ij}$$

- mit w_{ijr} = Streckenwiderstand für die Route r zwischen i und j [Zeiteinheiten]
 F_{ij} = Anzahl der Fahrzeuge zwischen i und j [Pkw/Zeiteinheit]
 F_{ijr} = Anzahl der Fahrzeuge zwischen i und j auf der Route R [Pkw/Zeiteinheit]
 Index r = betrachtete Route
 Index k = laufender Index über alle Routen

VISUM / DYNEMO

Das in der Bundesrepublik Deutschland am häufigsten eingesetzte Verkehrsumlegungsmodell ist das Modell VISUM [41][42]. Das Verkehrsumlegungsmodell VISUM ermöglicht es, den Verkehr für unterschiedliche Fahrtenkategorien (in VISUM Verkehrssysteme) mit unterschiedlichen Methoden auf das Netzmodell umzulegen.

Die möglichen Umlegungsalgorithmen zur Routensuche und Umlegung mit VISUM sind:

- **Bestwegverfahren** (Sukzessivverfahren (100%))
- **Sukzessivverfahren** (z.B. 40%, 30%, 30%)
- **Gleichgewichtsverfahren**
- **Lernverfahren** (SCHNABEL und LOHSE 1997)

Außerdem ist es möglich, Simultanverfahren zur gleichzeitigen Umlegung von mehreren Fahrtenmatrizen anzuwenden. Die gleichzeitige Umlegung mehrerer Nachfragematrizen auf das Netzmodell dient in VISUM jedoch nicht primär der gegenseitigen Beeinflussung der umgelegten Fahrtenmatrizen sondern vielmehr der späteren graphischen Auswertung der Umlegungsergebnisse. Da die Nachfragearten eines Verkehrssystems das gleiche Verkehrsnetz und die gleiche Widerstandsfunktion nutzen unterscheiden sich die Umlegungsergebnisse nicht von einer Umlegung, bei der die Gesamtmatrix (= Matrix1 + Matrix2) umgelegt wird [42].

Simultanverfahren existieren in VISUM für das Sukzessiv-, das Gleichgewichts- und das Lernverfahren. Sie unterscheiden sich von den einfachen Umlegungsverfahren nur dadurch, dass bei der Routensuche für jedes Verkehrssystem eine eigene Routensuche durchgeführt wird, die den verkehrsmittelspezifischen Widerstand berücksichtigt (vgl. VISUM [42]).

Das Teilmodul DYNEMO in VISUM erlaubt es, in einem mesoskopischen Umlegungsprozess mehr als 100.000 Einzelfahrzeuge in einem Umlegungsprozess auf ein Netzmodell umzulegen. Die dabei betrachteten Streckenteilabschnitte sind in der Regel 100 bis 200 m lang. Ein Einsatzgebiet für DYNEMO ist dann gegeben, wenn räumlich und zeitlich feinteilige Leistungskennwerte wie die Verkehrsdichte, mittlere Geschwindigkeit oder auch Emissionen ermittelt werden sollen (vgl. DYNEMO [41]). Für die Simulation des gesamten relevanten Netzmodells des Großraumes Hannover mit mehr als 1.600.000 Fahrten von Personenkraftwagen und fast 300.000 Fahrten von Lastkraftwagen an einem Werktag kann das mesoskopische Umlegungsmodell DYNEMO derzeit nur eingeschränkt eingesetzt werden.

DYNEMO ermöglicht es, Wegweisungen zu berücksichtigen. Die Routenwahl eines Fahrzeuges einer Fahrtenkategorie erfolgt mit der Hilfe von sogenannten Entscheidungspunkten. Entscheidungspunkte enthalten die Routeninformationen zu allen Zielen. Ohne besondere Definitionen ist jeder Verkehrszelle ein Entscheidungspunkt zugeordnet. Es ist zusätzlich möglich, auf jedem Streckenteilabschnitt einen Entscheidungspunkt für ein oder mehrere Fahrtenkategorien zu definieren. Ein simuliertes Fahrzeug folgt so lange der Route des am Quellbezirk gewählten Zieles, bis es auf einen weiteren Entscheidungspunkt trifft, der auf die entsprechende Fahrzeugkategorie zutrifft. Am Entscheidungspunkt erfolgt dann erneut die Wahl eines Zieles mit der dazugehörigen vorgegebenen Route.

2.2.3 Wegekettenmodelle

Im Gegensatz zu den Verkehrsverteilungsmodellen, die räumlich aggregierte Verkehrsströme ermitteln, steht hinter den Wegekettenmodellen die nach heutigem Kenntnisstand realistischere Auffassung, dass die einzelne Ortsveränderung einer Person im Zusammenhang mit der gesamten Folge von Wegen des betrachteten Zeitraumes, also dem Wegemuster bzw. dem Aktivitätenmuster, gesehen werden muss (SCHNÜLL [46]).

Als Erzeugungsmodell eignen sich für Wegekettenmodelle nur Individualverhaltensmodelle oder Personen-gruppenmodelle. Für die Ziel- und Verkehrsmittelwahl sind dieselben Prinzipien des Entscheidungsverhaltens anwendbar wie bei den Verteilungsmodellen. Als Entscheidungsmodell werden häufig das Logit- oder das Probitmodell eingesetzt.

Die Verkehrsmittelwahl wird bei den heutigen Wegekettenmodellen meist nur am Beginn einer Wegekette durchgeführt. Alle Teilwege einer Wegekette werden also meist mit demselben Verkehrsmittel durchgeführt. Die Zielwahl einer Aktivität erfolgt immer vom Standort des letzten erreichten Zieles, allerdings so, dass die Wegekette im Rahmen eines vorgegebenen Zeit- oder Kostenbudgets realisierbar bleibt (SCHNÜLL [46]).

Im Gegensatz zu den individuellen Wegemodellen oder den Verkehrsstrommodellen gehen die Wegekettenmodelle von der individuellen Aktivitätenfolge (Aktivitätenmuster, Aktivitätenkette) innerhalb eines Zeitraumes aus und ermitteln sequentiell für die einzelnen Wege der Kette jeweils das Ziel und unter gewissen Randbedingungen teilweise auch das benutzte Verkehrsmittel. Auf diese Weise ist es möglich, die einzelnen Ortsveränderungen einer Person im Zusammenhang des gesamten Wegeablaufes im betrachteten Zeitraum zu sehen und Abhängigkeiten hinsichtlich der Ziel- und Verkehrsmittelwahl zwischen den einzelnen Wegen zu berücksichtigen (WERMUTH [69]).

Die spezifischen Randbedingungen der Wegekettenmodelle führten dazu, dass ihrer Realisation zunächst mit Hilfe der Simulationstechnik erfolgte. Die ersten Modelle dieser Art wurden in der Bundesrepublik von POECK/ZUMKELLER [40] und, darauf aufbauend, von SPARMANN [68] entwickelt (vgl. Abb. 11). Spätere Modelle wie z.B. das Verkehrsnachfragemodell VISEM (**V**erkehr**I**nformations**S**ystem **E**rzeugung**M**odel) des Marktführers in der Bundesrepublik Deutschland basieren meist auf einem Personengruppenansatz [43].

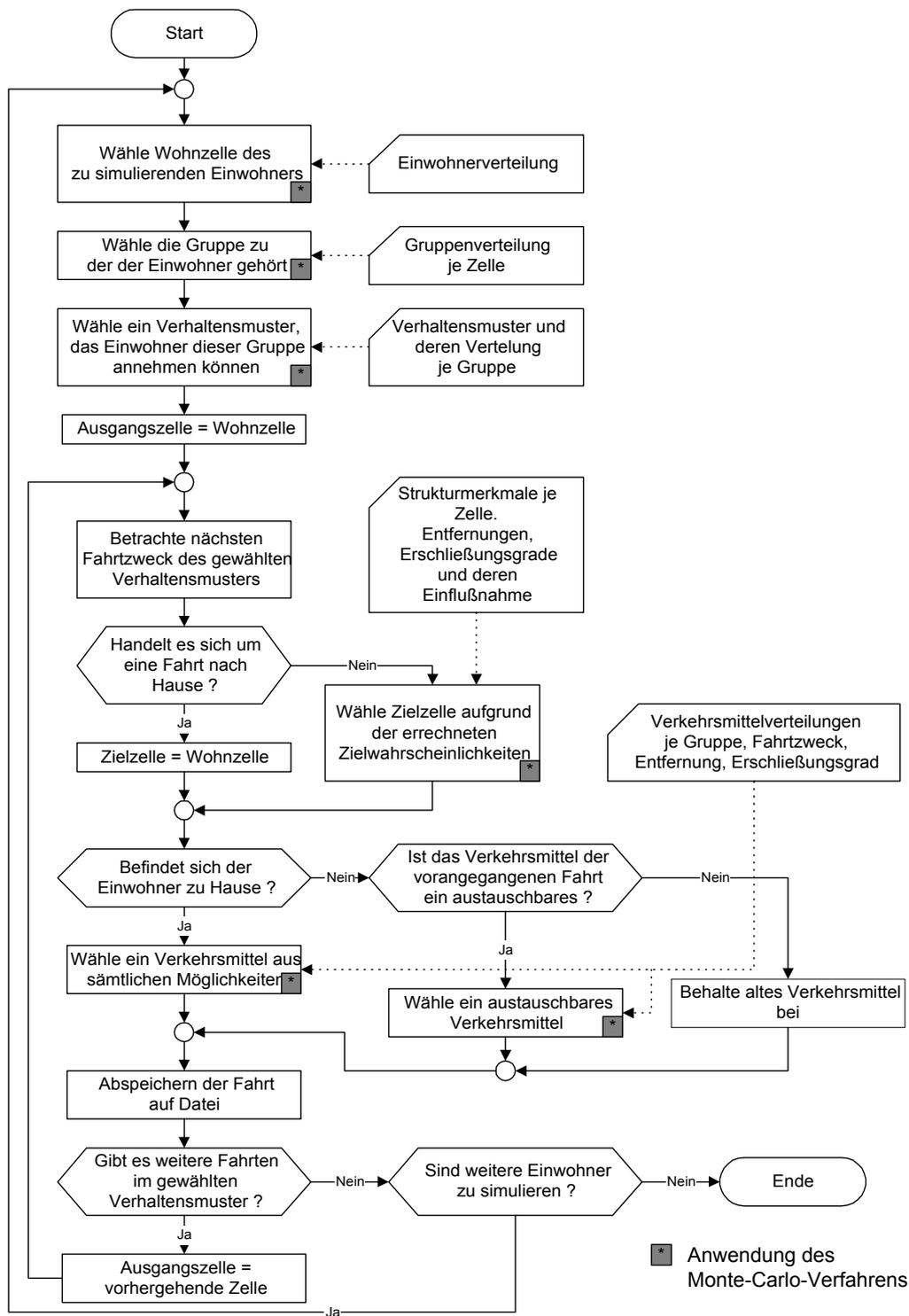


Abb. 11: Ablaufdiagramm Orient, verhaltensorientiertes Simulationsmodell zur Verkehrsprognose (SPARMANN [68])

2.2.4 Kritischer Rückblick und Ausblick

Verkehrsumlegungs- und Einzelfahrzeugsimulationsmodelle

Hinsichtlich der Modelltechnik haben sich in den letzten Jahren die Bemühungen verstärkt auf die immer feinere Simulation von Einzelfahrzeugen in Verkehrsnetzen konzentriert. Der Abbildungsgenauigkeit der Simulation des Verkehrsflusses wurde die höchste Aufmerksamkeit gewidmet.

Mit mikroskopischen dynamischen Simulationsmodellen lassen sich eindrucksvolle bewegte Simulationen in Echtzeit am Bildschirm des Computers betrachten (teilweise sogar schon dreidimensional vgl. VISSIM [44]).

Besonders bei den mikroskopischen Einzelfahrzeugsimulationsmodellen bleibt in der Praxis schon einmal die Qualität der Ergebnisse erheblich hinter der Qualität der graphischen Präsentation zurück. Auch und gerade bei graphisch beeindruckenden Präsentationen sollten daher die Auftraggeber von dynamischen Verkehrsumlegungen und Simulationen nicht unkritisch sein.

Die demoskopischen Eingangswerte in die Verkehrsnachfrageermittlung basieren in den letzten Jahren meist nur auf Erhebungen zum Mobilitätsverhalten mit relativ geringem Stichprobenumfang. Teilweise muss in der Planung für Verkehrsentwicklungspläne bei der Ermittlung der Verkehrsnachfrage in erheblichem Umfang auf mittlere Kennwerte für die Bundesrepublik z.B. aus der Kontiv'89-Befragung zurückgegriffen werden.

Die Verbesserungen an Verkehrsnachfragemodellen konnten mit der rasanten Verbesserung der Einzelfahrzeugsimulationen und der Entwicklung von dynamischen Umlegungsverfahren nicht Schritt halten. Zur weiteren Verbesserung der Erkenntnisse hinsichtlich der Verkehrsnachfrageermittlung fehlt auch die gesicherte Datenbasis durch große Erhebungen. Vielversprechende Ansätze zur Verbesserung der Erkenntnisse über das individuelle Mobilitätsverhalten scheinen in den letzten Jahren durch Modellversuche zur Verfolgung von Einzelpersonen mit Handys [29] gegeben zu sein. In wie weit sich die Ergebnisse solcher Modellversuche aber auch auf andere Räume übertragen lassen, ist derzeit noch weitgehend offen.

Die Zeitschritte, in denen mikroskopische dynamische Verkehrsumlegungs- und Simulationsmodelle arbeiten können (und manchmal leider auch angewendet werden), sind zu stark differenziert für die existierenden Verkehrsnachfragemodelle. Auf der Seite der Verkehrsnachfragemodelle finden die weiterentwickelten mikroskopischen Verkehrsumlegungs- und Simulationsmodelle keinen Modellpartner mit gleicher Abbildungsgenauigkeit. Die Ergebnisse der mikroskopischen dynamischen Verkehrsumlegungsmodelle und Simulationsmodelle müssen daher generell kritisch hinterfragt werden.

Netzweite Simulationen des werktäglichen Verkehrsablaufes werden teilweise bis hin zur Ermittlung von Abgasemissionskonzentrationswerten in 10-Minuten-Intervallen in einzelnen Straßenräumen ausgewertet (vgl. DRUM [58]).

Typisch für die Problematik sind Formulierungen wie die folgende [7]:

„Für die geforderte zeitliche Auflösung der OD-Matrizen wurden im Bereich des Stadtverkehrs zeitlich feinteilige Verkehrsverhaltensparameter aufgestellt. Aus verschiedenen aktuellen Erhebungen zum Verkehrsverhalten wurden zeitlich und räumlich abhängig Eingangsgrößen ermittelt und auf die spezielle Situation in Wuppertal übertragen.“

Faktisch heißt das,

- es gab leider keine Informationen zur ausreichend genauen Ermittlung der Verkehrsnachfrage für Wuppertal,
- es wurden bundesweit aktuelle Untersuchungen zu Mobilitätsverhalten herangezogen und
- es wurde versucht, aus dem vorhandenen Datenmaterial die bestmöglich stundengenaue Verkehrsnachfrage zu ermitteln.

Das Modell DRUM ermittelt aus einer Fahrtenmatrix für eine Stunde an Hand von „normierten Pegeln“ Teilmatrizen für die insgesamt sechs Zeitschritte, die während der Simulation des Verkehrsablaufes einer Stunde dynamisch auf das Netzmodell umgelegt werden. Das dynamische Umlegungsmodell DRUM ist konzeptionell der richtige Ansatz für eine dynamische Routensuche und Umlegung, nur muss ein kritischer Betrachter ernsthaft die Frage stellen, auf Basis welcher Eingangsdaten überhaupt eine dynamische Verkehrsumlegung in 10 min-Intervallen oder gar 5 min-Intervallen erfolgen kann bzw. darf.

Dass eine Kritik zumindest teilweise berechtigt ist, zeigt auch ein Aufsatz von BECKMANN und WULFHORST [3] über das erweiterte Modell DRUM-CR, in dem erläutert wird, wie die für die dynamische Routensuche und Umlegung mit dem Modell DRUM-CR notwendigen zeitteligen und kategoriespezifischen Verflechtungsmatrizen zum Zweck der Untersuchung des Stadtgebietes Meerbusch bei Düsseldorf aus bestehendem Datenmaterial generiert wurden. Gleichzeitig wird jedoch erläutert, dass eine empirische Validierung der Eingangsgrößen und eine Kalibrierung des Modells im Rahmen der vorliegenden Untersuchung für das Stadtgebiet Meerbusch nicht erfolgen konnte. Insgesamt kann man hier den Eindruck gewinnen, dass das eigentliche Interesse nicht den Ergebnissen der dynamischen Routensuche und Umlegung, sondern der dynamischen Simulation selbst gilt. Die gewählte Intervallgröße von 5 min ist daher äußerst kritisch zu bewerten. Die Autoren des Aufsatzes weisen zwar darauf hin, dass die praktische Anwendbarkeit des Modells DRUM-CR durch die hohen Anforderungen an die Eingangsgrößen eingeschränkt wird. Es wurde jedoch trotzdem ohne empirische Validierung der Eingangsdaten und ohne Kalibrierung, in 5-Min-Intervallen simuliert. Besonders im Hinblick auf die dynamische Routensuche und Umlegung erscheint die Verwendung von statischen Verkehrsnachfragedaten, die für bestimmte Intervallgrößen normiert wurden, kritisch.

Viele der mikroskopischen Simulationsmodelle erlauben es, die Anzahl der Simulationen zu variieren (z.B. VISSIM [44]). Jede Teilumlegung bzw. Teilsimulation führt dabei zu unterschiedlichen Ergebnissen. Im Prinzip ist das Ergebnis von mikroskopischen Simulationen als ein möglicher Verkehrszustand (unter vielen) im betrachteten Gesamtnetzmodell zu verstehen. Ähnliches gilt auch für die mikroskopischen dynamischen Routensuch- und Umlegungsmodelle wie z.B. DRUM [3]. Der Aufwand zur Ermittlung stabiler Ergebnisse mit mikroskopischen dynamischen Verkehrsumlegungs- und Simulationsmodellen wird nur selten in Kauf genommen. Im Unterschied dazu bilden die makroskopischen Umlegungsmodelle einen mittleren Verkehrsablauf im Netzmodell ab.

Zum leichteren Verständnis für den Anwender von Verkehrsplanungsmodellen wird in der Praxis teilweise mit Bemessungsverkehrsstärken (von manchen auch Streckenkapazitäten genannt) für einen ganzen Tag im Netzmodell gearbeitet (so auch im VISUM-Netzmodell des Kommunalverbandes Großraum Hannover). Dieses Vorgehen bei den normalerweise für den täglichen Verkehr durchgeführten Verkehrsumlegungen auf der Basis von Fahrtenmatrizen für den mittleren täglichen Verkehr führt jedoch dazu, dass sich im Modell Kraftfahrzeugverkehr, der zu völlig unterschiedlichen Zeiten das Netz befährt (z.B. in der morgendlichen und nachmittäglichen Hauptverkehrszeit), sich gegenseitig beeinflusst. Dieser systembedingte Fehler verschwindet bei der Verwendung von Bemessungsverkehrsstärken für einen ganzen Tag völlig aus dem Sichtkreis des Anwenders. Richtig und empirisch auch abgesichert, sind die Capacity-Restaint-Funktionen auf der Basis von Bemessungsverkehrsstärken von Stunden. Damit dem Anwender des Modells der systembedingte Fehler bei der Verwendung von Tagesverkehrsmatrizen offensichtlich wird, sollten besser Bemessungsverkehrsstärken für Stunden im Netzmodell Verwendung finden. Die Tagesverkehrsmatrix muss dann für eine Umlegung mit einem Faktor (z.B. $F_{\text{Stunde}}=0,1$) auf eine mittlere Spitzenstunde umgerechnet werden.

Die auf der Basis von Tagesverkehrsumlegungen ermittelten mittleren Reisegeschwindigkeiten und die direkt von der mittleren Reisegeschwindigkeit abhängige Routenwahl, ist prinzipiell nicht so realistisch, wie bei einer zeitlich geschichteten Routensuche und Umlegung für einzelne Stunden, wie sie in dieser Arbeit durchgeführt wurden.

Verkehrsnachfragemodelle

Die in der Realität stattfindende Zielwahl unter Abschätzung der Netzauslastung für alle Verkehrsmittel, die aus der individuellen Erfahrung als bekannt vorzusetzen ist, bleibt in den bestehenden Modellen zur Verkehrsnachfrageermittlung weitgehend unberücksichtigt. Dies gilt auch für die Zielwahl eines Teilweges in den Wegekettenmodellen.

Konsequenter wäre es, die Zielwahl eines Weges als Teil einer Wegekette sofort in eine Fahrt im Netzmodell des gewählten Verkehrsmittels mit der damit verbundenen sukzessiven Auffüllung des Netzmodells umzusetzen, d.h. die einzelnen Teilwege einer Wegekette sofort auf das Netzmodell umzulegen. Der dann sukzessiv wechselweise stattfindende Zielwahl-/Umlungsprozess der einzelnen Wege einer Wegekette von Einzelpersonen oder sozioökonomischen Personengruppen würde dazu führen, dass die Zielwahl für einen Weg und auch für eine ganze Wegekette realitätsnäher ausfallen würde als im klassischen Wegekettenmodell, da die Einschätzung der Reisezeiten bei dem steigenden Auslastungsniveau des Netzmodells immer realistischer würde. Die im klassischen Wegekettenmodell stattfindende Integration der drei Teilmodelle Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung würde damit konsequent um die Integration der Einflüsse eines Verkehrsumlegungsmodells erweitert werden. Die Reihenfolgenabhängigkeit dieses sukzessiven wechselweisen Zielwahl-/Umlungsprozesses kann in einem iterativen Lernprozess beseitigt werden. Auch die Tageszeitabhängigkeit der Netzauslastungen für die unterschiedlichen Verkehrsmittel sollte dabei Berücksichtigung finden.

Der Grund für bisher beibehaltene Zweistufigkeit der Modelle (Verkehrsnachfrage und Verkehrsumlegung) liegt zum einen in der hohen erforderlichen Rechenzeit zum anderen aber auch in der immer noch erforderlichen Kalibrierung der erzeugten Fahrtenmatrizen zur Berücksichtigung von Faktoren, die in den Verkehrsnachfragemodellen bisher noch keine ausreichende Berücksichtigung finden. Der Faktor Rechenzeit sollte bei der rasanten Entwicklung der Computertechnologie nicht mehr als Hindernis für die beschriebene Vorgehensweise gelten. Klar ist aber auch, dass es weiterhin erforderlich sein wird, die Einflüsse, die von Verkehrsnachfragemodellen noch nicht ausreichend genau genug berücksichtigt werden können, durch eine Kalibrierung in die Fahrtenmatrizen einzuarbeiten. Es wird daher hier auch nicht empfohlen, auf die erforderliche Kalibrierung der Fahrtenmatrizen zur Kontrolle und Verifizierung der Modellergebnisse zu verzichten. Der Zweck der Verkehrsnachfrageermittlung mit dem vorgeschlagenen sukzessiven wechselweisen Zielwahl-/Umlungsmodell sollte vielmehr die Berücksichtigung der Netzauslastung für alle Verkehrsmittel und die Bildung von noch realitätsnäheren Wegeketten während der Verkehrsnachfrageermittlung sein.

2.3 Verkehrsnachfragemodell SAN

2.3.1 Allgemeines

Die Verkehrsnachfrage wird im ökonomischen Verkehrsnachfragemodells SAN aus Daten der Siedlungs-, Raum- und Angebotsstruktur errechnet. Das Verkehrsnachfragemodell wurde von BIERSCHEK [4] im Jahre 1980 erarbeitet. Mit dem ökonomischen Verkehrsnachfragemodell SAN lässt sich die Verkehrsnachfrage in Abhängigkeit vom Angebot ermitteln und darstellen.

Einflusskomponenten des Verkehrsnachfragemodells SAN sind:

- **die Grundmobilität,**
 - Erhebungsdaten zum Mobilitätsverhalten
- **die Siedlungs- und Wirtschaftsstruktur,**
 - Einwohner,
 - Erwerbstätige,
 - Arbeitsplätze insgesamt
 - Arbeitsplätze im tertiären Sektor
 - Schüler/Studenten/Auszubildende
 - Ausbildungsplätze
- **die Raumstruktur und**
 - Siedlungsdichte und Entfernung
- **die Angebotsstruktur.**
 - Merkmale des Verkehrsnetzes

Das Modellsystem SAN gliedert sich in mehrere Schritte. In den einzelnen Modellschritten finden die jeweiligen Einflussvariablen der Siedlungs-, Raum- sowie der Angebotsstruktur Eingang in das Modell. Der Modellansatz für das betrachtete Verkehrssystem besteht aus gekoppelten Modellgleichungen, die durch multiplikativ verknüpfte Faktoren charakterisiert sind. Bei der Anwendung des Modells werden zunächst nur durchschnittliche Verhaltensweisen unabhängig von Besonderheiten des speziellen Untersuchungsraumes durch Basisfunktionen berücksichtigt. Dann werden je Modellschritt die relativen Abweichungen dieser durchschnittlichen Verhaltensweisen aufgrund der konkreten Gegebenheiten des Untersuchungsraumes ermittelt. Diese untersuchungsraumspezifischen Verlagerungsfaktoren werden schließlich mit den Elementen der berechneten Fahrtenmatrix aus dem vorhergehenden Schritt multipliziert (vgl. Tab. 4).

Einflusskomponente	Grundmobilität, Siedlungsstruktur	Raumstruktur			Angebotsstruktur			
F_{ij}	=	S_{ij}	•	G_{ij}	•	C_{ij}	•	H_{ij}
▲		▲		▲		▲		▲
▼		▼		▼		▼		▼
Verkehrsnachfrage		Standardverkehrsnachfrage		Nutzungsintensität infolge Abstandseinfluss		Nutzungsintensität infolge Lageeinfluss		Nutzungsintensität infolge Angebotseinfluss

Tab. 4: Allgemeine Gleichung zur Ermittlung der Verkehrsnachfrage mit dem ökonomischen Verkehrsnachfragemodell SAN

Die Verlagerungsfaktoren G_{ij} , C_{ij} und H_{ij} werden auch als Nutzungsintensität oder als relative Fahrtenhäufigkeit bezeichnet, die sich in Abhängigkeit bestimmter Einflussvariablen errechnen. Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über die einzelnen Einflusskomponenten gegeben.

2.3.2 Einflusskomponenten

2.3.2.1 Siedlungsstruktur

Die Berechnung der Verkehrsnachfrage beginnt mit einer Aufteilung der bezirksbezogenen Personendaten auf die Verkehrsbeziehungen. Die daraus resultierenden quell-ziel-bezogenen Personendaten bilden in Verbindung mit mittleren Mobilitätsparametern je Personengruppe, Fahrtzweck, Verkehrsart und Zeitintervall die sogenannte Standardverkehrsnachfrage.

Personendaten

Im ersten Modellschritt von SAN werden analog zu dem Ansatz, der bereits in den Gravitationsmodellen enthalten ist, die bezirksbezogenen Personendaten s_i und s_j auf die Quell-Ziel-Beziehungen verteilt. Die Aufteilung erfolgt nach dem Multiplikationssatz aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung, also unter der Voraussetzung unabhängiger Ereignisse.

$$S_{ij} = s_i^Q \cdot \frac{s_j^Z}{\sum s_j^Z} \quad [Personen]$$

Beispiel: Fahrtzweck Ausbildung

- s_i^Q : Schüler am Wohnort im Quellbezirk i
- s_j^Z : Schulplätze am Ausbildungsort im Zielbezirk j
- $\sum s_j^Z$: Schulplätze am Ausbildungsort in allen Zielbezirken

Zuordnung Personendaten - Wegezwecke

Das Verkehrsaufkommen der Bezirke ist die Summe aller Ortsveränderungen der Personen, die in einem Bezirk leben bzw. eine Tätigkeit ausüben. Die Ortsveränderungen resultieren aus unterschiedlichen Tätigkeiten gleicher Personen an unterschiedlichen Orten, wobei die Verknüpfung von Tätigkeiten einen Wegezweck beschreibt (z.B. Berufsverkehr: Tätigkeit am Ort A: Wohnen, Tätigkeit am Ort B: Arbeiten).

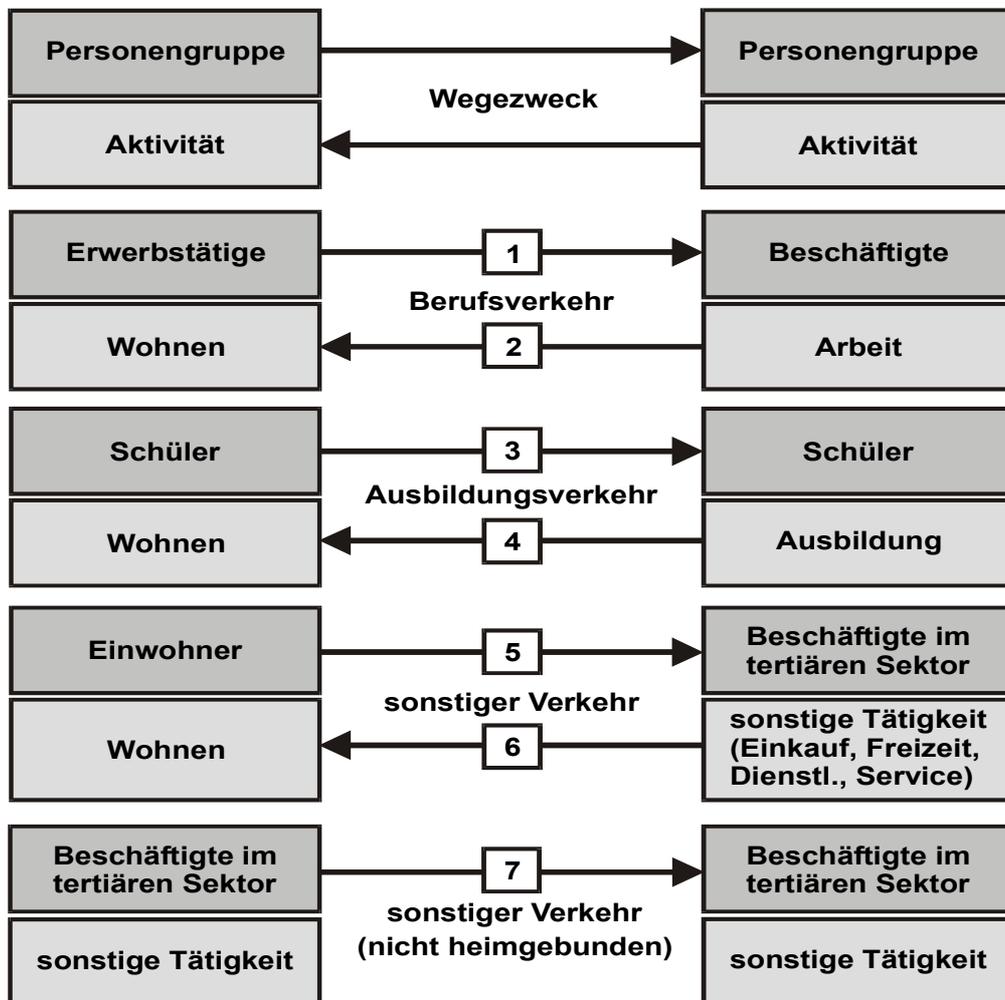


Abb. 12: Zuordnungen der quell-ziel-bezogenen Personengruppen zu den Wegezwecken im ökonomischen Verkehrsnachfragemodell SAN

Über die Wegezwecke lassen sich quell- und zielbezogene Personengruppen unmittelbar einander zuordnen (vgl. Abb. 12). Andere Fahrtzwecke, die vom Modell SAN derzeit nicht erfasst werden (z.B. der Urlaubsreiseverkehr) müssen im Rahmen der Kalibrierung nachträglich eingearbeitet werden.

Standardmobilität

Die Standardmobilitätsparameter berücksichtigen die mittleren Auswirkungen der Eigenschaften von Personen bestimmter Personengruppen auf die Verkehrsmobilität je Verkehrszweck und Verkehrsart. Die tatsächlichen, untersuchungsraumspezifischen, mittleren Mobilitätsparameter (Anzahl der Wege/Person und betrachteten Zeitraum) weichen davon zum Teil erheblich ab. Letztendlich spiegeln die Abweichungen die Wirkung anderer Einflussgruppen auf die Verkehrsmobilität wieder.

Standardverkehrsnachfrage

Das Produkt aus den quell-zielbezogenen Personendaten und der Standardmobilität der Personengruppen je Fahrtzweck ergibt die Standardverkehrsnachfrage. Bei der Berechnung der Standardverkehrsnachfrage werden die Fahrten ausschließlich nach den Kriterien Quellpotential und Zielattraktivität bzw. Zielpotential und Quellattraktivität unabhängig von möglichen Widerständen wie z.B. Entfernungen verteilt.

2.3.2.2 Entfernung (Raumstruktur)

Der Abstand r_{ij} wird als Luftlinienentfernung zwischen den Koordinaten der Schwerpunkte der Verkehrsbezirke definiert und wirkt sich unmittelbar auf die Nutzungsintensität jeder Verkehrsbeziehung aus. Die zugehörige Funktion gibt die Distanzempfindlichkeit der Verkehrsteilnehmer an. Zusätzlich liegt jedoch auch eine mittelbare Wirkung in Kopplung mit der Raumstruktur (Lage) und mit dem Angebot (Netz) vor. Die Abstandsfunktion ist auf eine durchschnittliche Siedlungsdichte und ein durchschnittliches Verkehrsangebot bezogen und wird in einem iterativen, zyklischen Ableitungsprozess ermittelt (vgl. Abb. 13).

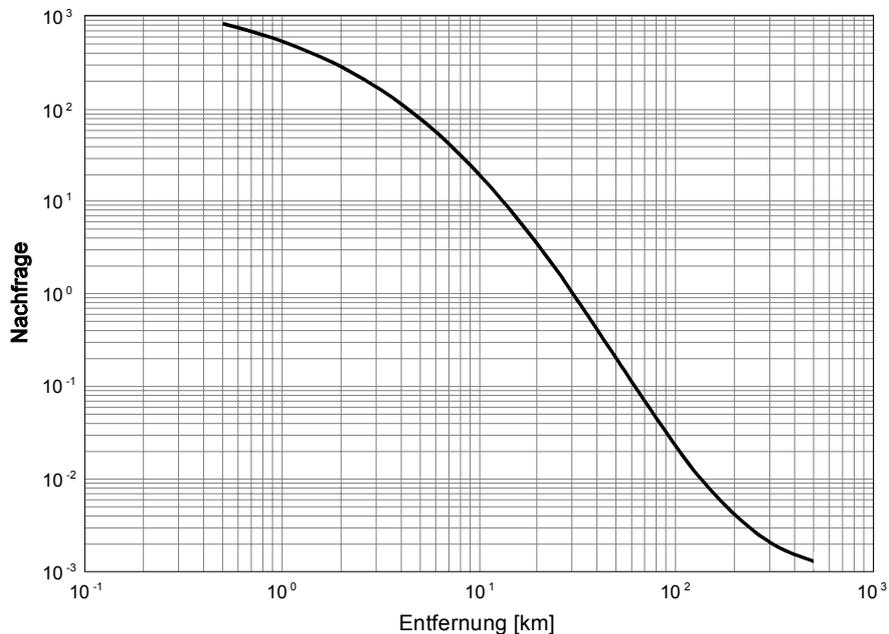
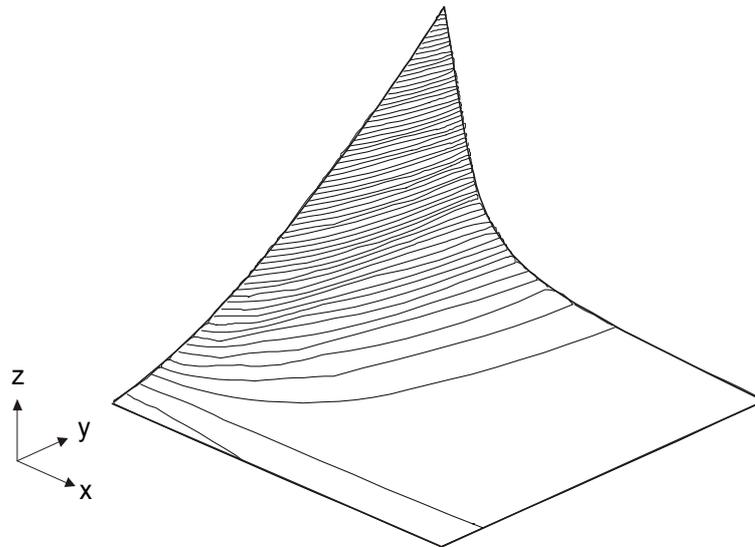


Abb. 13: Abstandsfunktion BIRSCHENK [4]

Der Funktionsverlauf gibt an, in welcher Weise die Nutzungsintensität mit zunehmender Entfernung abnimmt.

2.3.2.3 Lage (Raumstruktur)

Im nächsten Schritt wird der Einfluss der Lage (oder Siedlungsdichte) eingerechnet. Die Lage beschreibt die Konkurrenzsituation zwischen den Verkehrsgelegenheiten. Mit zunehmender Siedlungsdichte nimmt die Konkurrenz zwischen den Verkehrsgelegenheiten zu und damit die Nutzungsintensität einer bestimmten Verkehrsbeziehung ab. Im Gegensatz dazu ist in den Randbereichen eines Siedlungsraumes, d.h. bei einer geringen Zahl von Zielgelegenheiten, die Attraktivität eines einzelnen Zieles groß. Mit zunehmender Entfernung zwischen den Verkehrsbezirken nimmt der relative Einfluss der Lage auf die Verkehrsnachfrage ab. Die Lagefunktion ist abhängig von den modellendogen ermittelten Lagefaktoren c_{ij} und von den Luftlinienentfernungen r_{ij} (vgl. Abb. 14).



x: Luftlinienentfernung r_{ij} [km]

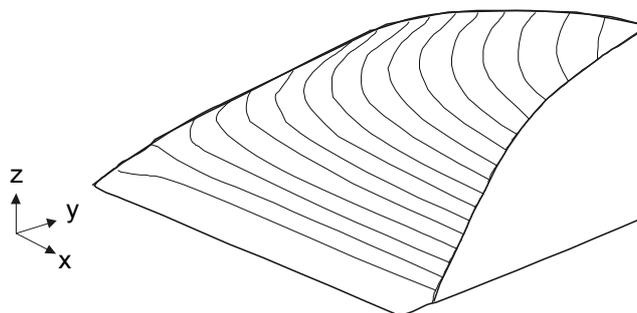
y: Lagefaktor c_{ij} [-]

z: Nutzungsintensität c_{ij} [-]

Abb. 14: Einflussgröße Raumstruktur (Lagefunktion) BIER-SCHENK [4]

2.3.2.4 Angebot

Durch die multiplikative Verknüpfung der Standardverkehrsnachfrage mit den Einflussgrößen der Raumstruktur wird die potentielle Nachfrage ermittelt. In einem weiteren Schritt ist diese Nachfragematrix durch den Einfluss des Verkehrsangebotes zu korrigieren. Die Reisezeit als quell-ziel-bezogenes Merkmal beeinflusst dabei die Verkehrsnachfrage. Die Nutzungsintensität steigt mit höheren Reisegeschwindigkeiten abhängig von der Luftlinienentfernung zwischen den Verkehrsbezirken (vgl. Abb. 15).



x: Luftlinienentfernung r_{ij} [km]

y: Reisegeschwindigkeit V_{ij} [km/h]

z: Nutzungshäufigkeit H_{ij} [-]

Abb. 15: Einfluss Angebot (qualitativ), BIERSCHEK [4]

Durch die Anwendung des Verkehrsnachfragemodells SAN kann auf umfangreiche Verkehrsbefragungen verzichtet werden. Anhand von vorliegenden Erhebungswerten sind die Berechnungsergebnisse des Modells allerdings noch zu kontrollieren und ggf. anzupassen, da in das Modell zwar die wesentlichen aber nicht alle Einflussgrößen Eingang finden. Als Ergebnis erhält man Matrizen der Wegebeziehungen differenziert nach Wegezwecken und Zeitintervallen. Die mit dem Modell SAN berechnete Verkehrsnachfrage dient als Eingabe für ein Verkehrsumlegungsmodell, also zur Ermittlung von Verkehrsstärken und Reisegeschwindigkeiten in Verkehrsnetzen.

Das ökonomische Verkehrsnachfragemodell SAN errechnet keinen Model-Split. Eingangsgröße in das Modell SAN sind die Mobilitätskennwerte. Je nachdem welche Mobilitätskennwerte (MIV, ÖPNV, NMV) zugrunde gelegt werden, erzeugt das Modell die zugehörigen Wegematrizen. Die unterschiedliche Distanzempfindlichkeiten der einzelnen Verkehrsarten können und müssen dabei berücksichtigt werden.

2.4 Netz- und Verkehrsumlegungsmodell DIAL-IV

2.4.1 Netzmodell DIAL-IV

Bei einem für eine Verkehrsuntersuchung relevanten Straßennetz spricht man von der Angebotsstruktur, bestehend aus:

- **geographischer Struktur** (Streckennetz) und
- **betrieblicher Struktur** (Netzbetrieb).

Das Modell des Streckennetzes bildet die Struktur des Verkehrsnetzes ab. Zur Beschreibung des Netzbetriebes werden die Strecken und Knotenpunkte unter verkehrstechnischen Gesichtspunkten klassifiziert und bewertet.

2.4.1.1 Geographische Struktur (Streckennetz)

In Netzmodell sind alle relevanten Strecken enthalten. Die einzelnen Strecken sind richtungsgetreunt durch die Nummern der Anfangs- und Endknoten gekennzeichnet und durch Gauß-Krüger Koordinaten der Knotenpunkte geographisch lokalisiert. Der Netzzusammenhang ist durch die knotenbezogene Angabe aller Nachbarknoten (fortführende Strecken) hergestellt. Für detailliertere Betrachtungen oder zur Darstellungen von Abbiegeverboten können Knoten im Netzmodell auch aufgelöst werden. In diesem Fall werden alle möglichen Fahrtbeziehungen innerhalb eines Knotenpunktes einzeln abgebildet. Dies erfordert jedoch eine erheblich höhere Anzahl von Netzknoten (vgl. Abb. 16).

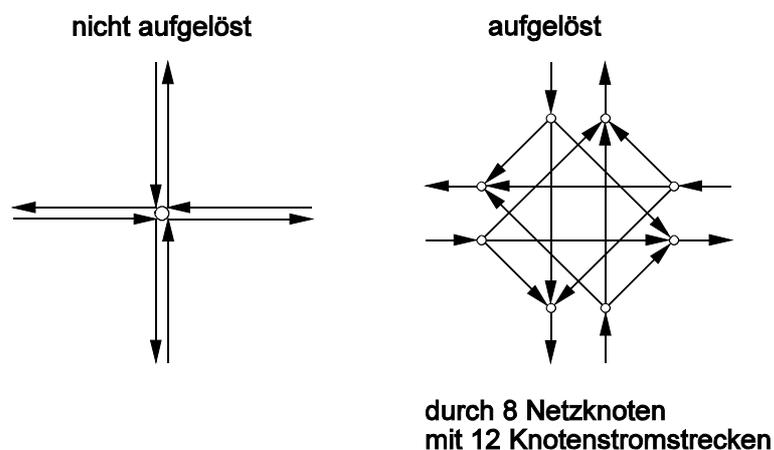


Abb. 16: Auflösung eines vierarmigen Knotenpunktes

Neben den realen Knotenpunkten sind im Netzmodell auch sogenannte Scheinknoten sowie Bezirksknoten enthalten. Mit Hilfe der Scheinknoten wird die Topographie des Netzmodells besser an die Realität angepasst (Kurven im Straßenverlauf). Dies ist neben Darstellungsgründen auch notwendig, um die Streckenlängen, die als Luftlinienentfernungen zwischen Knotenpunkten automatisch berechnet werden, genauer bestimmen zu können. Bezirksknoten sind als Schwerpunkte aller individuellen Quell- und Zielpunkte in einem Verkehrsbezirk definiert, durch die Koordinaten des Schwerpunktes lokalisiert und über fiktive Anbindungsstrecken an das Verkehrsnetz angebunden. Durch die Bezirksknoten, die auch die Anfangs- und Endpunkte aller Fahrten darstellen, wird eine Verknüpfung des Netzes (Angebotsstruktur) mit der Nachfragestruktur hergestellt.

2.4.1.2 Betriebliche Struktur (Netzbetrieb)

Zur Beschreibung der betrieblichen Struktur (Netzbetrieb) im Netzmodell sind zu unterscheiden:

- **streckenbezogene Merkmale** und
- **knotenbezogene Merkmale**.

Streckenbezogene Merkmale

Jeder in das Netzmodell aufgenommene Streckenabschnitt wird mit einem vierstelligen Streckentyp versehen, um ihm über diese Verschlüsselung eine Reihe von Merkmalen zuzuordnen. In der allgemeinen Form des Streckentyps a b c d haben die 4 Ziffern folgende Bedeutung:

- a:** Lage der Strecke (1=innerorts/2=außerorts)
- b:** Streckenfunktion bzw. Netzhierarchie
- c:** Ausbauqualität
- d:** Anzahl der Fahrspuren pro Richtung

Die zugelassenen Kombinationsmöglichkeiten werden in einer Streckentypentabelle, aus der die jeweils zugehörigen Merkmale Bemessungsverkehrsstärke und Bemessungsgeschwindigkeit zu entnehmen sind, zusammengestellt. Die Streckentypentabelle (vgl. Tab. 5) ist entsprechend den speziellen Anforderungen der Verkehrsuntersuchung modifiziert und an die Richtlinien (RAS Q [14]/ EAHV [17] / EAE 85/95 [15]) angepasst worden.

Lage	Typgruppe (Straßenkategorie) (RAS-N/RAS-Q)		Ausbaustan- dard	V_B [km/h]	Q_B [Kfz/h]	Bemerkungen				
a		b	c							
1 außerorts	großräumig I/AI	1	1 2 3	120 110 100	1400 1300 1000	a6ms/a4ms				
	überregional II/AI		2	1 2 3	100 90 80	1000 950 900	b4ms c4ms d4			
	regional III/AII			3	1 2 3	90 80 70	650 600 500	b2s b2 d2		
	zwischen-gemeindlich IV/AIII/AIV	4	1 2 3		80 70 60	600 500 400	b2 d2 e2			
	Fiktivstrecke (Anbindung)		5	1 2 3	100 50 20	1000 1000 1000				
2 innerorts	Schnellverkehrsstraße / Kfz-Straße	1		1 2 3	80 70 60	1400 1300 1000	b4ms c4m d4			
	Hauptverkehrsstraße		2	1 2 3 4 5 6	50 50 40 50 50 40	800 700 500 800 700 500	anbaufrei angebaut angebaut anbaufrei, Gr.W. angebaut, Gr.W. angebaut, Gr.W.			
				Hauptsammelstraße	3	1 2 3 4 5 6	50 40 40 50 40 40	400 350 300 400 350 300	anbaufrei angebaut angebaut anbaufrei, Gr.W. angebaut, Gr.W. angebaut, Gr.W.	
		Anliegerstraße				4	1 2 3	40 40 40	400 300 200	
							Fiktivstrecke (Anbindung)	5	1 2 3	30 20 10

Erläuterungen:

V_B : Geschwindigkeit im unbelasteten Zustand
 Q_B : Bemessungsverkehrsstärke des Modells je Fahrstreifen
Gr.W. : Koordinierte Lichtsignalregelung (Grüne Welle)

Ausbaustandard 1 und 4: gut
2 und 5: mittel
3 und 6: niedrig

Allgemeine Form des vierstelligen Streckentyps:
a b c d mit a,b,c : siehe Tabelle
d : Anzahl Fahrspuren/Richtung

Tab. 5: Streckentypentabelle DIAL-IV (Stand 01.1996) [47]

Knotenbezogene Merkmale

Die Knotenpunkte werden nach den Merkmalen gemäß Tabelle 6 typisiert. Unterschieden wird vor allem, ob der Knoten aufgelöst ist oder nicht und ob eine Lichtsignalregelung existiert.

Typ	Bedeutung
0	Scheinknoten (ohne betriebliche Bedeutung)
1	nicht aufgelöst, nicht lichtsignalgeregelt
2	nicht aufgelöst, lichtsignalgeregelt
3	aufgelöst, nicht lichtsignalgeregelt
4	aufgelöst, lichtsignalgeregelt
5	planfreier Knotenpunkt

Tab. 6: Knotentypentabelle DIAL-IV

In Abhängigkeit von den Knotenmerkmalen und den Merkmalen der vorausgehenden Strecke wird im Netzmodell die Verkehrsregelung an den Knotenpunkten durch Vorgabe von Zeitzuschlägen abgebildet. Da an den fiktiv eingeführten Scheinknoten wie auch an den planfreien Knoten keine Behinderung des Verkehrsablaufs vorliegt, werden hier keine Zeitzuschläge vorgegeben. Für die nicht aufgelösten Knoten lässt sich jeweils nur ein Zeitzuschlag angeben. Dagegen werden in den aufgelösten Knoten je Fahrbeziehung neben der Fahrzeit innerhalb des Knotens zwei Zeitzuschläge ermittelt, je einer am Anfangs- und am Endknoten. Dies wird durch den Ansatz niedrigerer Zeitzuschläge bei aufgelösten Knotenpunkten kompensiert. Bei den Zeitzuschlägen für lichtsignalgeregeltete Knotenpunkte wird zunächst von einer nicht koordinierten Signalregelung ausgegangen. An Streckenzügen mit koordinierter Signalregelung werden an den Knoten im Netzmodell keine Zeitzuschläge vergeben.

2.4.2 Verkehrsumlegungsmodell Individualverkehr DIAL-IV

Das Routensuch- und Verkehrsumlegungsmodell DIAL-IV [10][28] ermittelt für einen bestimmten Netzzustand auf Basis einer vorgegebenen Verkehrsnachfragematrix die zugehörigen Verkehrsstärken auf den einzelnen Strecken. In Abhängigkeit von den Knotenmerkmalen und den Merkmalen der vorausgehenden Strecke wird die Verkehrsregelung an den Knotenpunkten durch Vorgabe von Zeitzuschlägen bewertet. Mit Hilfe des Routensuchmodells wird die Wegewahl der Verkehrsteilnehmer im Netz nachgebildet. Der Aufbau der Wege (Streckenfolge) zwischen allen Verkehrsbezirken erfolgt anhand des Kriteriums Reisezeit. In einem zweiten Schritt wird mit Hilfe des Umlegungsmodells die Verkehrsnachfragematrix auf die ermittelten Fahrtrouten umgelegt. Aus der abschließenden Addition der Fahrtenhäufigkeiten aller Verkehrsbeziehungen, die über einen Streckenabschnitt verlaufen, ergeben sich dann die Verkehrsstärken für die einzelnen Strecken.

Das Modell DIAL-IV stellt bezüglich der Routenwahl ein Alternativroutensuchverfahren dar [10][28]. Bezüglich der Umlegung vereinigt es die Vorteile einer Alternativroutenumlegung mit denen einer rein kapazitätsabhängigen Umlegung über möglichst optimale Wege. Die Alternativroutensuche im Verkehrsumlegungsmodell DIAL-IV berücksichtigt im Prinzip sämtliche möglichen effizienten Wege, zwischen Quell- und Zielknoten. Diese Wege werden in Abhängigkeit von ihrer Bewertung (Reisezeit oder Weglänge) durch eine probabilistische Verteilungsfunktion (nach DIAL [10]) gewichtet. Um bei diesem Verfahren auch Streckenkapazitäten und von den Verkehrsstärken auf den einzelnen Strecken abhängige Bewertungen (Reisezeiten) berücksichtigen zu können, wird das Verfahren in einen übergeordneten Iterationsprozess eingebettet.

Der Modell-Algorithmus beginnt mit der Routensuche im unbelasteten Netz. Die dabei verwendeten Bewertungen sind die aus der betrieblichen Netzstruktur ermittelten Grundfahrzeiten auf den Netzstrecken. Auf das so bewertete unbelastete Netz wird die Verkehrsnachfragematrix vollständig umgelegt. In Abhängigkeit von den berechneten Streckenbelastungen, die zum Teil erheblich über den Bemessungsverkehrsstärken (vgl. Tab. 5) liegen können, wird eine neue Bewertung der Kanten vorgenommen. Die Fahrzeiten auf den einzelnen Strecken werden dabei in Abhängigkeit von ihrem Auslastungsgrad verändert. Basierend auf den korrigierten Fahrzeiten wird anschließend eine erneute Routensuche durchgeführt, wobei wiederum die Verkehrsnachfrage vollständig auf das Netz umgelegt wird. Im iterativen Prozess, wird die gesamte Routensuche und Umlegung so lange wiederholt, bis die Standardabweichungen aller im vorangegangenen und nachfolgenden Umlegungsschritt ermittelten Streckenbelastungen eine vorgegebene Schranke unterschreiten. Im Algorithmus findet durch die Iterationen ein Lernprozess statt, den man sich in ähnlicher Weise auch bei den Verkehrsteilnehmern vorstellen kann. Das Verkehrsumlegungsmodell DIAL-IV ist ein Umlegungsprogramm für den motorisierten Individualverkehr mit Personenkraftwagen. Der Schwerverkehr kann vom Umlegungsmodell DIAL-IV nicht berücksichtigt werden.

2.5 Wirkungsmodell STRBEW (Version 1.0)

Das Wirkungsmodell STRBEW (**ST**recken**BE**wertung) ermöglichte es, aufbauend auf den Umlegungsergebnissen des Umlegungsmodells DIAL-IV die Abgas- und Lärmemissionen für die einzelnen Strecken im Netzmodell zu ermitteln [57][10]. Die im Umlegungsmodell ermittelten mittleren Verkehrsstärken und Reisegeschwindigkeiten werden genutzt, um mittlere Abgas- und Lärmemissionen zu ermitteln. Da weder Beschleunigungs- noch Bremsvorgänge einzelner Fahrzeuge noch Abgasemissionen infolge von Stausituationen berücksichtigt werden können, sind die so ermittelten Abgasemissionen nur bedingt geeignet die Überschreitung von Grenzwerten zu überprüfen. Die qualitative Abbildung der netzweiten Abgas- und Lärmemissionen ist dagegen möglich.

Da das Umlegungsmodell DIAL-IV nur den Kraftfahrzeugverkehr mit Personenkraftwagen abbilden kann, ist auch nur die Ermittlung der Abgasemissionen durch den Kraftfahrzeugverkehr mit Personenkraftwagen möglich. Das Wirkungsmodell STRBEW Version 1.0 gestattet es, aufbauend auf den Werten der MLuS 92 [18] und der RLS 81 [21] die Emissionen von:

- CO Kohlenmonoxid,
- CO₂ Kohlendioxid,
- SO₂ Schwefeldioxid,
- NO_x Stickoxide,
- HC Schwefelwasserstoff und
- die Lärmemissionen

zu ermitteln.

Zur Ermittlung der Lärmemissionen wurde im Programm STRBEW (Version 1.0) in Abhängigkeit vom Streckentyp pauschal ein Schwerverkehrsanteil geschätzt, da der Schwerverkehrsanteil einen sehr hohen Einfluss auf die Lärmemissionen hat und eine Ermittlung der Lärmemissionen alleine auf der Basis der Verkehrsstärken von Personenkraftwagen nicht sinnvoll gewesen wäre. Speziell für die Berechnung der Lärmemissionen sind in der Regel sehr viel mehr Eingangsparameter erforderlich, als im Netzmodell von ROUML kodiert sind. Es musste daher das Verfahren zur Ermittlung der Lärmemissionen deutlich vereinfacht werden. Im Wirkungsmodell STRBEW fehlen Informationen zur Fahrbahnoberflächenbeschaffenheit und zum Abstand der Randbebauung. Es ist daher mit dem Wirkungsmodell STRBEW nicht möglich Aussagen über die eigentlich interessanteren Immissionswerte, die den Menschen erreichen, zu machen.

3. Methodisches Vorgehen

Für die Beurteilung einer betrieblichen Maßnahme, wie z.B. der Maßnahme A auf dem Messeschnellweg (Einrichtungsverkehr in Fahrtrichtung zum Messegelände), ist die tageszeitabhängige Lastrichtung des Verkehrs von erheblicher Bedeutung. Sofern die Anreiserichtung zur EXPO 2000 oder zu Leitmessen mit der Lastrichtung des Normalverkehrs zusammenfällt, kommt es zu einer ungünstigen Überlagerung der Fahrzeugströme. In der Gegenrichtung ist dagegen von einem möglichen Einrichtungsbetrieb auf dem Messeschnellweg eine geringere Anzahl von Kraftfahrzeugen als bei symmetrischer Fahrtrichtungsbelastung betroffen und zum Ausweichen auf andere Fahrtrouten gezwungen. Anreise- und Abreiseströme zur EXPO 2000 oder zu Leitmessen sind extrem gerichtete Verkehrsströme. Eine Überlagerung des morgens in die Stadt gerichteten Berufsverkehrs mit den zur EXPO 2000 anreisenden Besucherverkehren kann mit einem mittleren täglichen Verkehrsaufkommen nicht mehr ausreichend genau abgebildet werden. Daher wurde schon bei der Ermittlung der Verkehrsnachfrage eine Entwicklung von Fahrmatrizen für unterschiedlichen Tageszeiten unumgänglich. Zur Ermittlung der tageszeitabhängigen Verkehrsstärken für den Großraum Hannover wurden daher stundengruppenbezogene Mobilitätskennwerte differenziert nach Fahrtzwecken verwendet. Aufgrund der relativ guten Datenbasis zum Mobilitätsverhalten in der Region Hannover konnte die Verkehrsnachfrageermittlung für Stundengruppen auf der Basis eines abgesicherten Stichprobenumfangs erfolgen ([59][60][61][62][63][64][66][67]).

Die für Stundengruppen mit dem ökonomischen Verkehrsnachfragemodell SAN [4] berechneten Verkehrsnachfragematrizen für den motorisierten Verkehr mit Personenkraftwagen wurden anhand einer mittleren Tagesganglinie anteilig auf die einzelnen Stunden innerhalb der Stundengruppen aufgeteilt (vgl. Abb. 21, S. 49). Die mittlere Tagesganglinie für den motorisierten Individualverkehr mit Personenkraftwagen im Großraum Hannover wurde aus einer Kordonauswertung von Verkehrszählungen an Einfallstraßen in die Stadt Hannover ermittelt. Für den Schwerverkehr wurde aus den Daten des Kommunalverbandes Großraum Hannover, die ebenfalls nur für Stundengruppen vorlagen, eine mittlere stundengenaue Schwerverkehrsganglinie für Werktag gebildet und der Schwerverkehr auf einzelne Stunden aufgeteilt. Die bei den Aufteilungen der stundengruppenbezogenen Fahrtenmatrizen für den Schwerverkehr und den Verkehr mit Personenkraftwagen erforderlichen Abschätzungen waren der Grund dafür, dass auf eine an sich wünschenswerte noch feinteiligere zeitliche Unterteilung der Fahrtenmatrizen verzichtet wurde. Für eine noch feinteiligere Ermittlung der Verkehrsnachfrage sind zeitlich deutlich stärker differenziertere Eingangsdaten zum Mobilitätsverhalten erforderlich, die jedoch nicht zur Verfügung standen.

Da mit den bestehenden Modellen der EXPO-bedingte Zusatzverkehr nicht realitätsnah abzubilden war, wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei neue Modelle konzipiert und implementiert. Zur Ermittlung der mittleren Verkehrsstärken und der mittleren Geschwindigkeiten auf den einzelnen Streckenabschnitten unter Berücksichtigung einer Großveranstaltung wie der EXPO 2000 wurden im Rahmen dieser Arbeit das **Simulationsmodell Veranstaltungsverkehr SIMVER** und das **Routensuch- und Umliegungsmodell ROUML** entwickelt.

Für den veranstaltungsbedingten Verkehr einer Großveranstaltung wie der EXPO 2000 kann mit dem in dieser Arbeit entwickelten Simulationsmodell SIMVER eine Simulation eines dynamischen Verkehrsleitsystems zu unterschiedlichen Parkplätzen durchgeführt werden. Berücksichtigt werden dabei auch die Stellplatzkapazitäten der einzelnen Parkplätze. Durch den Einsatz des Simulationsmodells SIMVER bleibt trotz der zur Abschätzung der Auswirkungen einer Großveranstaltung notwendigen dynamischen Einzelstundenumlegungen der dynamische Zusammenhang zwischen dem an- und abreisenden veranstaltungsbedingten Besucherverkehr zu und von Parkplätzen, über einen ganzen Tag gesehen, gewahrt (Personen, die während der Anreise zur EXPO 2000 zu einem Parkplatz anreisen, reisen während der Abreise auch wieder von diesem P+R-Platz ab). Gleichzeitig können mit dem Simulationsmodell SIMVER die für die dynamischen Einzelstundenumlegungen benötigten und zur Berücksichtigung einer vorhandenen Wegweisung notwendigen Fahrtenmatrizen für den

veranstaltungsbedingten Verkehr erstellt werden.

Die Fahrtenmatrizen für mittlere werktägliche Stunden für

- den Verkehr mit Personenkraftwagen,
- den Schwerverkehr und
- den veranstaltungsbedingten Verkehr

können mit dem Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML in dynamischen Einzelstundenumlegungen simultan auf das Straßennetzmodell umgelegt werden. Das heißt Verkehr, der sich nach dem üblichen Vorgehen bei Tagesverkehrsumlegungen in unrealistischer Weise gegenseitig beeinflusst hätte (z.B. die morgendliche Hauptverkehrszeit und die nachmittägliche Hauptverkehrszeit), kann so wirklichkeitsnah und völlig unabhängig voneinander auf das Straßennetzmodell umgelegt werden. Gleichzeitig kommt es innerhalb der dynamischen Einzelstundenumlegungen durch die multi-sukzessive Simultanumlegung zu einer realitätsnahen gegenseitigen Beeinflussung der betrachteten Fahrtenkategorien. Der mittlere Tagesverkehr kann im Anschluss an die dynamischen Einzelstundenumlegungen durch die Addition der Verkehrsstärken in den einzelnen Stunden ermittelt werden.

Um die Umweltbeeinträchtigungen während einer Großveranstaltung wie der EXPO 2000 abschätzen zu können, wurde das Wirkungsmodell STRBEW (**Strecken-Bewertung**) im Rahmen dieser Arbeit aktualisiert und um die Berücksichtigung des Schwerverkehrs erweitert (vgl. Ziff. 5.4).

4. Stundengenaue Verkehrsnachfrage des werktäglichen motorisierten Normalverkehrs

4.1 Allgemeines

Bei der Ermittlung der Verkehrsnachfrage ist generell die Frage zu stellen, bis zu welcher Größe eines Zeitintervalls eine dynamische Abbildung der Verkehrsnachfrage mit Verkehrsmodellen sinnvoll und verifizierbar bleibt. Sowohl die mikroskopischen als auch die makroskopischen Routensuch- und Umlegungsmodelle sind in der Lage, kleinste Zeitintervalle z.B. Minutenintervalle umzulegen. Die eigentlich schwierigere Aufgabe in der Verkehrsplanung ist jedoch nicht die dynamische Routensuche und Umlegung, sondern die Ermittlung realitätsnaher Verkehrsnachfragematrizen für kurze Zeitintervalle. Für eine zeitlich stark differenzierte dynamische Routensuche und Umlegung sind auch die entsprechend feinteilige Verkehrsnachfragematrizen erforderlich. Theoretisch ist es mit den bestehenden Verkehrsnachfragemodellen möglich Verkehrsnachfragematrizen in Sekundengenauigkeit zu ermitteln, jedoch ist dies als **nicht sinnvoll** anzusehen, da das individuelle Verhalten sich nicht mit einer solchen Genauigkeit vorhersagen lässt. Die zufälligen Einflüsse im Verkehrsverhalten sind bei zu kurzen Zeitintervallen zu groß, um noch eine realistische Verkehrsnachfrage berechnen zu können.

Für eine realitätsnahe Ermittlung der Verkehrsnachfrage ist es erforderlich, die zur Verfügung stehenden Mobilitätskennwerte hinsichtlich ihrer zeitlichen Differenzierung und hinsichtlich ihrer räumlichen Übertragbarkeit kritisch zu hinterfragen. Wenn die Verkehrsnachfragemodelle auf Eingangsgrößen beruhen, die maßgeblich auf den inzwischen als veraltet anzusehenden Daten aus der Kontiv'89 aufbauen, so ist es fraglich, ob es zur konkreten Ermittlung der Verkehrsstärken für einen Planungsraum im Modell sinnvoll ist, bis zur Simulation von 10-min-Intervallen herunterzugehen. Nicht nur die Größe der simulierten Zeitschritte bestimmt die Genauigkeit der Ergebnisse eines Umlegungsprozesses sondern auch die Eingangsgrößen, d.h. die Verkehrsnachfragematrizen. Durch die Wahl von zu kleinen Zeitintervallen wird dem Betrachter eine Genauigkeit der Umlegungsergebnisse suggeriert, die eigentlich nicht existiert. Wie groß oder klein ein Zeitintervall für die Verkehrsmodellrechnungen gewählt werden kann bzw. sollte, ist daher auf der Basis der zur Verfügung stehenden Eingangsdaten für die Verkehrsnachfrageermittlungen zu entscheiden. Dynamische Systeme mit Unterstützung durch online-Datenerfassung können ohne Zweifel deutlich höhere Genauigkeiten erreichen als Verkehrsmodellrechnungen auf der Basis von mittleren Mobilitätskennwerten. Ein solches System (Visum-Online) entsteht derzeit im Auftrag der move GmbH zur Steuerung des Verkehrs während der EXPO 2000. Mesoskopische Modelle wie z.B. DYNEMO [41] und mikroskopische Modelle wie DRUM [58] ermöglichen es die dynamische Routensuche- und Umlegung mit Hilfe von zeitlich geschichteten Fahrtenmatrizen durchzuführen. Die betrachteten Zeitintervalle können in beiden Modellen so klein gewählt werden, dass ein vorgegebenes Ziel nicht unbedingt in einem simulierten Zeitschritt zu erreichen sein muss. Beide Modelle beinhalten jedoch keine Teilmodelle für eine entsprechend feinteilige Ermittlung der Verkehrsnachfrage.

Die Eingangsdaten für eine Verkehrsnachfrageermittlung in der Region Hannover sind im Vergleich zu anderen Regionen außergewöhnlich gut. Zwischen 1990 und 1998 wurden durch die ÜSTRA Hannoversche Verkehrsbetriebe AG fast jährlich Erhebungen zum Mobilitätsverhalten in Auftrag gegeben (Stichprobenumfang ca. 1.800 Personen). Trotzdem sind die Informationen die erhoben wurden noch lange nicht differenziert genug, um eine Verkehrsnachfrageermittlung unterhalb von Stundenintervallen zu gestatten. Schon für die Ermittlung von Verkehrsnachfragematrizen für einzelne Stunden musste das zur Verfügung stehende Datenmaterial anhand einer mittleren Ganglinie des Verkehrs im Großraum Hannover aufgeteilt werden. Die Wahl noch kleinerer Zeitschritte ist generell möglich, doch sind nach der Einschätzung des Autors für noch feinere Aufteilung des Verkehrsaufkommens zusätzliche Informationen z.B. durch online-Zählschleifen erforderlich.

4.2 Stundengenaue Verkehrsnachfrage für den motorisierten Individualverkehr mit Personenkraftwagen

4.2.1 Daten der Siedlungs- und Wirtschaftsstruktur

Als Grundlage für die Ermittlung der Verkehrsnachfrage mit Hilfe des ökonometrischen Verkehrsnachfragemodells SAN von BIERSCHENK [4] dienten im vorliegenden Fall die für die Stadt und den Landkreis Hannover fortgeschriebenen Siedlungs- und Wirtschaftsstrukturdaten aus den Jahren 1996 bis 1998 [31]. Für das Umland wurden Einwohnerzahlen aus dem Jahr 1998 verwendet. Eingangsgrößen für das verwendete ökonometrische Verkehrsnachfragemodell SAN sind Angaben zur fahrtzweckspezifischen Mobilität und Daten zur Siedlungs- und Wirtschaftsstruktur. Für jeden Verkehrsbezirk sind Strukturdaten für die folgenden Personengruppen erforderlich:

- Einwohner
- Erwerbstätige insgesamt
- Auszubildende (Schüler, Studenten)
- Beschäftigte insgesamt
- Beschäftigte im tertiären Sektor
- Auszubildende am Ausbildungsort (Ausbildungsplätze)

4.2.2 Räumliche Gliederung zur Ermittlung der Verkehrsnachfrage

Die Gebietseinteilung orientiert sich an der räumlichen Differenzierung der vorhandenen Siedlungsstrukturdaten und an dem relevanten Verkehrsnetz. Den Anforderungen des Verkehrsnachfragemodells an die Größe des Einflussgebietes und an den Detaillierungsgrad ist dabei Rechnung getragen worden. Schon bei der Erstellung der Matrix der Verkehrsbeziehungen für den Verkehrsentwicklungsplan der Stadt Hannover [25] wurde darauf geachtet, dass die Verkehrsbezirkseinteilung im Landkreis Hannover ausreichend genau differenziert ist.

In Anlehnung an die am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau im Jahr 1992 für den Verkehrsentwicklungsplan der Stadt Hannover entwickelte Matrix der Verkehrsbeziehungen für den motorisierten Individualverkehr [25] wurde die Verkehrsbezirkseinteilung für die Ermittlung der Verkehrsnachfrage mit dem ökonometrischen Verkehrsnachfragemodell SAN wie folgt gewählt:

- 174 Verkehrsbezirke in der Stadt Hannover,
- 199 Verkehrsbezirke im Großraum Hannover,
- 77 Verkehrsbezirke im Umland.

Für das Stadtgebiet Hannover wurde eine Einteilung in Verkehrsbezirke vorgenommen, die unterhalb der Ebene der statistischen Bezirke der Stadt liegt. In der Stadt Hannover sind aus den 118 statistischen Bezirken 174 Verkehrsbezirke definiert worden. Eine graphische Darstellung der innerstädtischen Verkehrsbezirkseinteilung beinhaltet Abbildung 17.



Abb. 17: Verkehrsbezirke in der Stadt Hannover (174 Verkehrsbezirke)

Abweichend von der für den Verkehrsentwicklungsplan der Stadt Hannover entwickelten Matrix der Verkehrsbeziehungen wurde für das auf dem Kronsberg neu entstandene Wohngebiet im Stadtgebiet Hannover im Hinblick auf die Nähe zum Weltausstellungsgelände noch ein weiterer Verkehrsbezirk hinzugefügt. Im Landkreis Hannover entsprechen die Verkehrsbezirke des Modells den statistischen Bezirken (vgl. Abb. 18).



Abb. 18: Verkehrsbezirkseinteilung im Großraum Hannover (199 Verkehrsbezirke)

Die Verkehrsbezirkseinteilung, die 1992 im Rahmen der Entwicklung der Matrix der Verkehrsbeziehungen für den Verkehrsentwicklungsplan der Stadt Hannover erstellt wurde, wurde beibehalten. Die Vergleichbarkeit mit der Matrix der Verkehrsbeziehungen für den Verkehrsentwicklungsplan der Stadt Hannover bleibt somit erhalten.

Das verkehrliche Einflussgebiet reicht (mit einer entsprechend groben Gebietseinteilung) weit über den Bereich des Landkreises hinaus. Um den Landkreis Hannover herum sind alle angrenzenden Gemeinden als Verkehrsbezirk definiert. Darüber hinaus sind alle niedersächsischen Landkreise, die Städte Hamburg und Bremen sowie unmittelbar angrenzende Landkreise und Städte in Nordrhein-Westfalen berücksichtigt (vgl. Abb. 19).

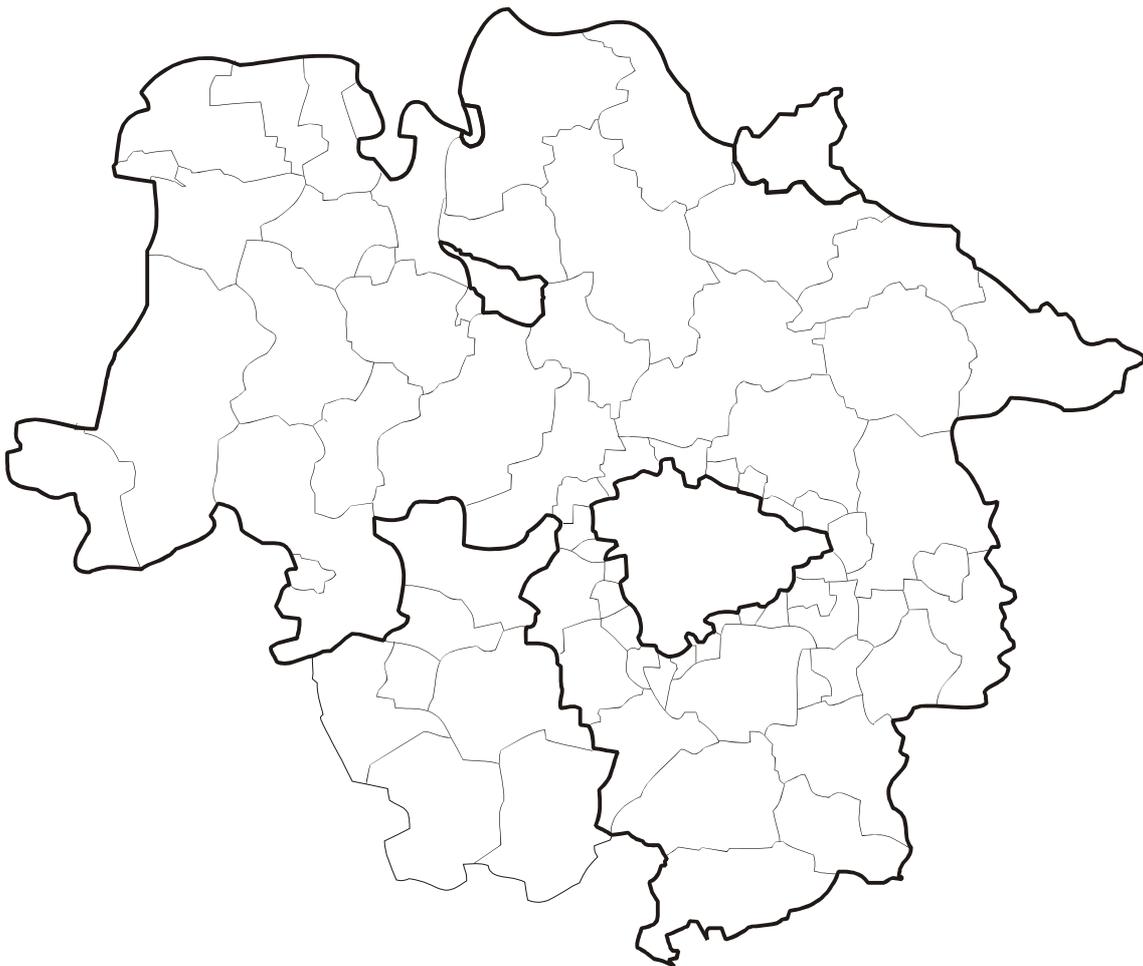


Abb. 19: Verkehrsbezirkseinteilung im Umland (verkehrliches Einflussgebiet, 77 Verkehrsbezirke)

Der Durchgangsverkehr auf den Bundesautobahnen, der außerhalb des definierten Einflussgebietes beginnt und endet, wurde im späteren Kalibrierungsprozess der Fahrtenmatritzen aus den Dauerzählstellendaten auf den Bundesautobahnen rund um Hannover ermittelt.

4.2.3 Mobilitätskennwerte für den Großraum Hannover

Die Daten zur wegezweckspezifischen Mobilität konnten aus Erhebungen der SOCIALDATA GmbH ([59][60][61][62][63][64][65][66][67]) zum Mobilitätsverhalten in der Region Hannover entnommen werden.

Für die Beurteilung einer betrieblichen Maßnahme, wie z.B. der Maßnahme A (Anreise) auf dem Messe-schnellweg ist die tageszeitabhängige Lastrichtung des Verkehrs von erheblicher Bedeutung. Sofern die Anreiserichtung zur EXPO 2000 oder zu Leitmessen mit der Lastrichtung des Normalverkehrs zusammenfällt, kommt es zu einer ungünstigen Addition der Fahrzeugströme. In der Gegenrichtung ist dagegen von einem möglichen Einrichtungsbetrieb auf dem Messeschnellweg eine geringere Anzahl von Kraftfahrzeugen als bei symmetrischer Fahrtrichtungsbelastung betroffen und zum Ausweichen auf andere Fahrtrouten gezwungen.

Anreise- und Abreiseströme während Großveranstaltungen wie der EXPO 2000 oder der Leitmessen sind extrem gerichtete Fahrzeugströme. Eine Überlagerung des morgens in die Stadt gerichteten Berufsverkehrs mit den zur EXPO 2000 anreisenden Besucherverkehren kann nicht mehr mit einer mittleren Tagesverkehrsmatrix bzw. eines pauschalen Anteils für die Hauptverkehrszeiten beurteilt werden. Schon bei der Ermittlung der Verkehrsnachfrage ist daher eine Entwicklung von Matrizen der Fahrtbeziehungen zu unterschiedlichen Tageszeiten notwendig. Zur Ermittlung der tageszeitabhängigen Verkehrsstärken im Straßennetz werden dafür stundengruppenbezogene Mobilitäten differenziert nach Wegezwecken benötigt.

Die im Rahmen der Untersuchung „Verkehrliche Auswirkungen EXPO-bedingter Zusatzverkehre im Großraum Hannover“ [47] verwendeten Daten zum Mobilitätsverhalten bildeten die Basis für die in dieser Untersuchung fortgeschriebenen Daten zum Mobilitätsverhalten im Großraum Hannover. Die durch SOCIALDATA in den Jahren 1990 [59] und 1995 [60] veröffentlichten Untersuchungen zum Mobilitätsverhalten haben den höchsten Detaillierungsgrad für den Großraum Hannover. Alle nachfolgenden Untersuchungen ([61][62][63][64][66][67]) lieferten keine ähnlich differenzierten Informationen zum Mobilitätsverhalten für das Umland der Stadt Hannover und konnten lediglich zur Aktualisierung der wichtigsten Mobilitätsparameter für die Stadt Hannover herangezogen werden.

Der Planungsraum für die den Verkehrsnachfrageberechnungen folgenden Verkehrsumlegungen wurde schließlich auf den Großraum Hannover begrenzt, da die Datengrundlagen über das Mobilitätsverhalten nur für diesen Raum in hinreichend genauer Form vorlagen. Tatsächlich weichen die Ergebnisse der dynamischen Einzelstundenumlegung über einen Tag von den Ergebnissen einer mittleren Tagesverkehrsumlegung erkennbar ab, da nur in der dynamischen Einzelstundenumlegung die jeweils realistische Verkehrssituation im Netzmodell wiedergespiegelt wird.

Die Mobilitätskennwerte der Stadt Garbsen aus dem Jahr 1990, die von SOCIALDATA [59] erhoben wurden, wurden auf den gesamten Landkreis Hannover übertragen. Genauere Erhebungen zum Mobilitätsverhalten für den Landkreis Hannover liegen derzeit nicht vor oder liegen zeitlich zu weit zurück. Auch für die Entwicklung der Matrix der Fahrtbeziehungen für den Verkehrsentwicklungsplan der Stadt Hannover bildete die Mobilitätsdatenerhebung für die Stadt Garbsen die Grundlage für die Ermittlung der Verkehrsnachfrage im gesamten Landkreis Hannover. Für die Stadt Hannover konnten die Mobilitätskennwerte aus der neueren Untersuchung von SOCIALDATA [60][65] aus dem Jahren 1995 und 1997 verwendet werden.

Verkehrsmittel	Stundengruppen						gesamt
	0-5 Uhr	5-9 Uhr	9-12 Uhr	12-15 Uhr	15-19 Uhr	19-24 Uhr	
NMV [%]	56	37	49	45	37	32	40
MIV [%]	27	38	33	33	43	51	39
ÖV [%]	17	25	18	22	31	11	21
Summe [%]	100	100	100	100	100	100	100
von allen Wegen [%]	1	20	19	18	31	11	100

Tab. 7: Stadt Hannover 1995: Wege an Werktagen nach Verkehrsmitteln und Stundengruppen [60]

Verkehrsmittel	Stundengruppen						gesamt
	0-5 Uhr	5-9 Uhr	9-12 Uhr	12-15 Uhr	15-19 Uhr	19-24 Uhr	
NMV [%]	-	29	34	35	25	25	30
MIV [%]	-	51	55	51	63	68	58
ÖV [%]	-	20	11	14	12	7	12
Summe [%]	-	100	100	100	100	100	100
von allen Wegen [%]	-	22	16	18	34	10	100

Tab. 8: Landkreis Hannover 1990: Wege an Werktagen nach Verkehrsmitteln und Stundengruppen [59]

In der Stadt Hannover hat sich der Modal Split im Jahr 1994 gegenüber dem aus dem Jahr 1990 insgesamt leicht zugunsten des MIV verändert. Die Veränderung ist jedoch so gering, dass die weitere Verwendung der Daten aus dem Jahr 1990 für den Landkreis Hannover unkritisch erscheint. Aus den Daten zum Mobilitätsverhalten in der Region Hannover ist zu erkennen, dass in den Nachmittags- und Abendstunden besonders häufig der Personenkraftwagen das gewählte Verkehrsmittel ist. Insgesamt ist die zur Ermittlung der Verkehrsnachfrage notwendige Datenbasis in den Nachtstunden zu gering. Es wird daher darauf verzichtet eine Verkehrsnachfrageermittlung für die Nachtstunden von 0 bis 5 Uhr durchzuführen.

In den Nachmittagsstunden wird der Personenkraftwagen überwiegend im Freizeitverkehr und zum Einkaufen verwendet (vgl. Tab. 9 u. Tab. 10). In den Nachmittags- und Abendstunden steigt der Anteil der im Freizeitverkehr mit dem Personenkraftwagen zurückgelegten Wege stark an.

Wegezweck	Stundengruppen						gesamt
	0-5 Uhr	5-9 Uhr	9-12 Uhr	12-15 Uhr	15-19 Uhr	19-24 Uhr	
Arbeit	52	50	9	21	22	11	19
dienstlich/geschäftlich	0	3	5	4	3	5	5
Ausbildung	0	26	12	22	8	8	11
Einkauf	0	7	43	26	29	2	24
Dienstleistungen	0	5	15	6	5	1	6
Service	0	6	4	5	2	1	4
Freizeit	48	3	12	16	31	72	31
Summe	100	100	100	100	100	100	100
Anteil MIV [%]	0,3	7,6	6,3	5,9	13,3	5,6	39

Tab. 9: Stadt Hannover 1995: Wege an Werktagen nach Wegezweck und Stundengruppen in [%] [60]

Wegezweck	Stundengruppen						gesamt
	0-5 Uhr	5-9 Uhr	9-12 Uhr	12-15 Uhr	15-19 Uhr	19-24 Uhr	
Arbeit	0	54	9	29	26	21	24
dienstlich/geschäftlich	0	3	1	1	4	8	4
Ausbildung	0	27	9	27	6	1	15
Einkauf	0	7	55	18	36	4	23
Dienstleistungen	0	3	17	5	6	1	7
Service	0	3	2	5	1	0	3
Freizeit	0	3	7	15	21	65	24
Summe	100	100	100	100	100	100	100
Anteil MIV [%]	0	11,2	8,8	9,3	21,4	6,8	57,5

Tab. 10: Landkreis Hannover 1990: Wege an Werktagen nach Wegezweck und Stundengruppen in [%] [59]

Ebenfalls von Bedeutung ist die starke Konzentration der Wege im Berufsverkehr (Wegezweck Arbeit) während der morgendlichen Hauptverkehrszeit. Im Unterschied dazu ist nachmittags eine zeitliche Entzerrung der Spitzen im Berufsverkehr (Wegezweck Arbeit) zu erkennen (vgl. Tab. 9 und Tab. 10). Die meisten Wege im motorisierten Individualverkehr werden sowohl in der Stadt Hannover als auch im Landkreis Hannover in den Nachmittagsstunden zwischen 15.00 und 19.00 Uhr zurückgelegt. Die morgendliche Hauptverkehrszeit wird fast ausschließlich durch die Wegezwecke Arbeit und Ausbildung verursacht. Demgegenüber wird die nachmittägliche Hauptverkehrszeit durch die Überlagerung von Verkehren mit den Wegezwecken Arbeit, Einkauf und Freizeit gebildet.

Wegezweck	Stadt Hannover 1997				Landkreis Hannover 1990/1997			
	MIV		gesamt		MIV		gesamt	
	Wege pro Person	[%]	Wege pro Person	[%]	Wege pro Person	[%]	Wege pro Person	[%]
Arbeit	0,2827	21	0,589	19	0,6178	37	0,8664	30
dienstlich/geschäftlich	0,107	8	0,155	5	0,0796	5	0,0846	3
Ausbildung	0,0716	5	0,341	11	0,0931	6	0,4232	15
Einkauf	0,2778	20	0,744	24	0,4841	29	0,7335	26
Dienstleistungen	0,0818	6	0,186	6	0,0901	5	0,1693	6
Service	0,0756	6	0,124	4	0,0508	3	0,0564	2
Freizeit	0,4613	34	0,961	31	0,2488	15	0,5078	18
Summe	1,3479	100	3,1	100	1,6657	100	2,8212	100

Tab. 11: Hannover 1997 / Landkreis 1990/1997: Zweck der Wege im MIV und insgesamt je Tag [60][61][65]

Wegezweck	Stadt Hannover 1997				Landkreis Hannover 1990/1997			
	MIV	ÖV	NMV	Summe	MIV	ÖV	NMV	Summe
Arbeit	48	29	23	100	73	16	11	100
dienstlich/geschäftlich	69	12	19	100	94	6	0	100
Ausbildung	21	41	38	100	22	38	40	100
Einkauf	36	18	46	100	66	7	27	100
Dienstleistungen	44	24	32	100	54	11	35	100
Service	81	4	35	100	90	0	10	100
Freizeit	48	19	33	100	49	5	46	100

Tab. 12: Verkehrsmittelnutzung nach Wegezweck in Prozent [60][61][65]

Für das verwendete ökonomische Verkehrsnachfragemodell SAN von BIRSCHENK [4] werden die Wegezwecke nicht in der von SOCIALDATA GmbH erhobenen Differenzierung benötigt. Sie wurden daher zu den folgenden Gruppen zusammengefasst:

- Beruf,
- Ausbildung,
- sonstige heimbundene Verkehre (beginnend und endend am Wohnort) und
- sonstige nicht heimbundene Verkehre (z.B. dienstliche Wege vom Arbeitsplatz).

Im betrachteten Zeitraum während der Weltausstellung EXPO 2000 vom 1. Juni bis 31. Oktober ist auf den Bundesautobahnen mit einem höheren Freizeitverkehrsaufkommen (Urlaubsreiseverkehr) als im Jahresmittel zu rechnen. Dieser zusätzliche Verkehr wurde im Rahmen der Kalibrierung der Fahrtenmatrizen durch eine Auswertung und Fortschreibung der Zählwerte der vier Dauerzählstellen auf den Bundesautobahnen ermittelt.

Die nachmittägliche Hauptverkehrszeit liegt für das Gesamtnetz des Großraumes Hannover zwischen 16.00 und 17.00 Uhr. Die morgendliche Hauptverkehrszeit für das Gesamtnetz liegt für den Großraum Hannover zwischen 7.00 und 8.00 Uhr. Die örtlichen Hauptverkehrszeiten können aber von diesen auf das Gesamtnetz bezogenen Hauptverkehrszeiten abweichen. Ermittelt wurden die morgendliche und die nachmittägliche Hauptverkehrszeit für das Gesamtnetz des Großraumes Hannover durch eine Kordonauswertung der Zählwerte für die Verkehrsmengenkarte für Niedersachsen. Aus der täglichen Mobilität, differenziert nach Wegezweck im motorisierten Individualverkehr (vgl. Tab. 11), konnte durch Aufteilung der Mobilitäten auf Stundengruppen (vgl. Tab. 9 und 10) und benutzte Verkehrsmittel (vgl. Tab. 12) die nach Stundengruppen und Wegezweck differenzierten Mobilitäten für den motorisierten Individualverkehr ermittelt werden (vgl. Tab. 13 und 14).

Fahrtzweck	Stundengruppen					Summe	[%]
	05-09 Uhr	09-12 Uhr	12-15 Uhr	15-19 Uhr	19-24 Uhr		
Beruf	0,0494	0,0407	0,0386	0,0866	0,0352	0,2536	21
Ausbildung	0,0125	0,0103	0,0098	0,0219	0,0092	0,0642	5
heimgeb. Verkehr	0,1549	0,1278	0,1211	0,2717	0,1143	0,7952	66
nicht heimgeb. Verkehr	0,0187	0,0154	0,0146	0,0328	0,0138	0,0959	8
Summe	0,2355	0,1943	0,184	0,413	0,1738	1,209	100

Tab. 13: Stadt Hannover 1997: Wege pro Person (MIV) nach Stundengruppen

Fahrtzweck	Stundengruppen					Summe	[%]
	05-09 Uhr	09-12 Uhr	12-15 Uhr	15-19 Uhr	19-24 Uhr		
Beruf	0,1186	0,093	0,097	0,2264	0,0719	0,607	37
Ausbildung	0,0179	0,014	0,0146	0,0341	0,0108	0,0915	6
heimgeb. Verkehr	0,168	0,1318	0,1374	0,3207	0,1018	0,8597	53
nicht heimgeb. Verkehr	0,0153	0,012	0,0125	0,0292	0,0093	0,0782	5
Summe	0,3197	0,2508	0,2616	0,6104	0,1938	1,6363	100

Tab. 14: Landkreis Hannover 1990/1997: Wege pro Person (MIV) nach Stundengruppen

Diese Mobilitäten sind neben den Strukturdaten wichtige Eingangsdaten für das ökonomische Verkehrsnachfragemodell SAN. Sie ermöglichen die Erzeugung von Fahrtenmatrizen der Verkehrsbeziehungen im motorisierten Individualverkehr für unterschiedliche Stundengruppen. Tatsächlich ist die schon sehr weitgehende Differenzierung der Mobilitäten nach Stundengruppen und Wegezwecken zur Abbildung von gerichteten Hauptverkehrszeiten jedoch noch nicht ausreichend. Innerhalb der Wegezwecke ist für die Abbildung im Modell zusätzlich noch eine Unterteilung der Fahrtrichtung notwendig. Hierzu konnte für die nachmittägliche Hauptverkehrszeit auf eine Forschungsarbeit von SCHOLZ, BIERSCHENK und WOLFF [55] zurückgegriffen werden, in der durch Zusammenfassung mehrerer größerer Untersuchungen für das Verkehrsnachfragemodell SAN sogenannte Standardmobilitätsfaktoren für die nachmittägliche Spitzenstunde entwickelt wurden. Diese liefern für die vom ökonomischen Verkehrsnachfragemodell SAN benötigte Wegezweckaufteilung die prozentuale Richtungsverteilung der Wege pro mobiler Person nach Wegezwecken. Die für die nachmittägliche Hauptverkehrszeit übernommen wurden. Für die übrigen Stundengruppen wurden die in der Tabelle 15 angegebenen prozentualen Richtungsverteilungen zugrunde gelegt, die in einem iterativen Optimierungsprozess erarbeitet wurden. Randbedingung des Optimierungsproblems war dabei,

das über einen ganzen Tag gesehen für die heimgewundenen Wegewecke die Summe der Hin- und Rückwege jeweils wieder gleich groß sein muss. Erschwert wurde dies durch die unterschiedlichen Gewichte der einzelnen Stundengruppen (vgl. Abb. 20).

Wegezweck	Stundengruppe				
	5-9 Uhr	9-12 Uhr	12-15 Uhr	15-19 Uhr	19-24 Uhr
1 Wohnung->Arbeit	100	97	40	5	1
2 Arbeit->Wohnung	0	3	60	95	99
Summe	100	100	100	100	100
3 Wohnung->Ausbildungsplatz	95	90	30	30	10
4 Ausbildungsplatz->Wohnung	5	10	70	70	90
Summe	100	100	100	100	100
5 Wohnung->sonstige Ziele	75	60	50	46	20
6 sonstige Quelle->Wohnung	25	40	50	54	80
Summe	100	100	100	100	100
7 Sonstige nicht heimgewundene ¹	100	100	100	100	100

Tab. 15: Prozentuale Richtungsverteilung der Wege pro Person nach Wegewecken

Mit dem ökonomischen Verkehrsnachfragemodell SAN erfolgte für die fünf betrachteten Stundengruppen mit den für den motorisierten Individualverkehr ermittelten Wegen pro Person (vgl. Abb. 20) und den prozentualen Richtungsverteilungen (vgl. Tab. 15) die Ermittlung der Verkehrsnachfrage.

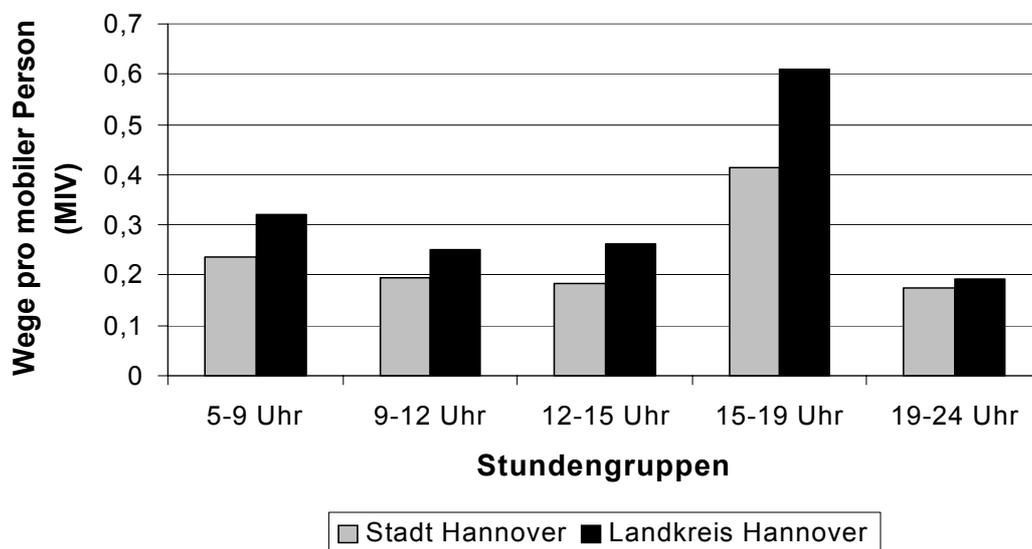


Abb. 20: Wege Pro Person im motorisierten Individualverkehr im Jahr 1997

¹ Unter „nicht heimgewundenen“ sind hier alle Wege mobiler Personen zusammengefasst worden, die nicht an der eigenen Wohnung beginnen oder enden.

Die mit Hilfe von stundengruppenbezogenen Mobilitäten für die Wegezwecke erzeugten Matrizen der Fahrtbeziehungen im MIV wurden anhand einer mittleren Tagesganglinie anteilig auf die einzelnen Stunden innerhalb der Stundengruppen aufgeteilt (vgl. Abb. 21). Die mittlere Tagesganglinie für den motorisierten Individualverkehr im Großraum Hannover wurde aus einer Kordonauswertung von Verkehrszählungen an Einfallstraßen in die Stadt Hannover ermittelt.

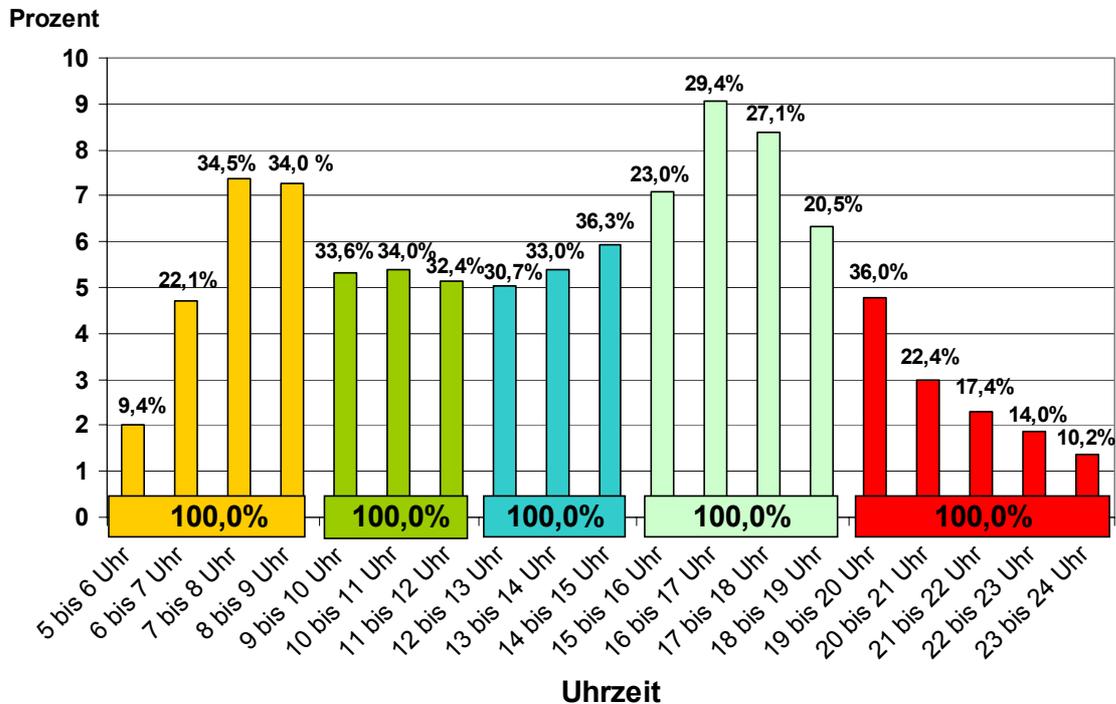


Abb. 21: Mittlere Tagesganglinie der im MIV im Großraum Hannover zurückgelegten Wege

Die Matrizen der Fahrtbeziehungen für einzelne Stunden wurden anschließend mit dem Verkehrsumlegungsmodell ROUML auf das Straßennetzmodell umgelegt. Verkehr, der sich bei Verkehrsumlegungen auf der Basis von Tagesverkehrsmatrizen in unrealistischer Weise gegenseitig beeinflusst hätte (z.B. die morgendliche Hauptverkehrszeit und die nachmittägliche Hauptverkehrszeit), konnte so wirklichkeitsnah völlig unabhängig voneinander auf das Straßennetz umgelegt werden. Der Tagesverkehr kann im Anschluss an den Umlegungsprozess durch Addition der Verkehrsstärken der einzelnen Stundenumlegungen ermittelt werden.

Die zur Verfügung stehende Datenbasis, die durch die jährlichen Erhebungen zum Mobilitätsverhalten im Auftrag der ÜSTRA im Zeitraum vom Jahr 1990 bis zum Jahr 1998 im bundesweiten Vergleich mit Sicherheit zumindest als gut einzustufen ist, ließ es nicht zu, die Ermittlung der Verkehrsnachfrage für noch kleinere Zeiträume durchzuführen. Die in dieser Arbeit ermittelten Verkehrsnachfragematrizen für Stundenzeiträume erforderten eine hohe Disaggregation des zur Verfügung stehenden Datenmaterials, die aus dem erhobenen Datenmaterial zum Mobilitätsverhalten für die Region Hannover alleine nicht mehr herzuleiten war. Auf die eigentlich für die Beurteilung von Anreisespitzenstunden für Großveranstaltungen wünschenswerte noch höhere Disaggregation des Datenmaterials wurde daher bewusst verzichtet, da keine Überinterpretation des bestehenden Datenmaterials erfolgen sollte.

4.3 Stundengenaue Verkehrsnachfrage für den Schwerverkehr

Der Schwerverkehr im Großraum Hannover wurde durch die IVU - Gesellschaft für Informatik, Verkehrs- und Umweltplanung mbH für das europäische Projekt COST 321 ermittelt [34]. Der von der IVU GmbH ermittelte Tagesgang lag nur für Stundengruppen vor (vgl. Abb. 22).

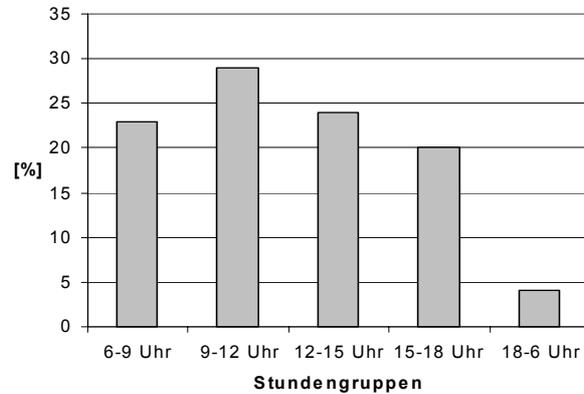


Abb. 22: Werktäglicher Schwerverkehr im Großraum Hannover in Stundengruppen [34]

Für die dynamischen Einzelstundenumlegungen in dieser Untersuchung wurde der Schwerverkehr auf die einzelnen Stunden aufgeteilt (vgl. Abb. 23).

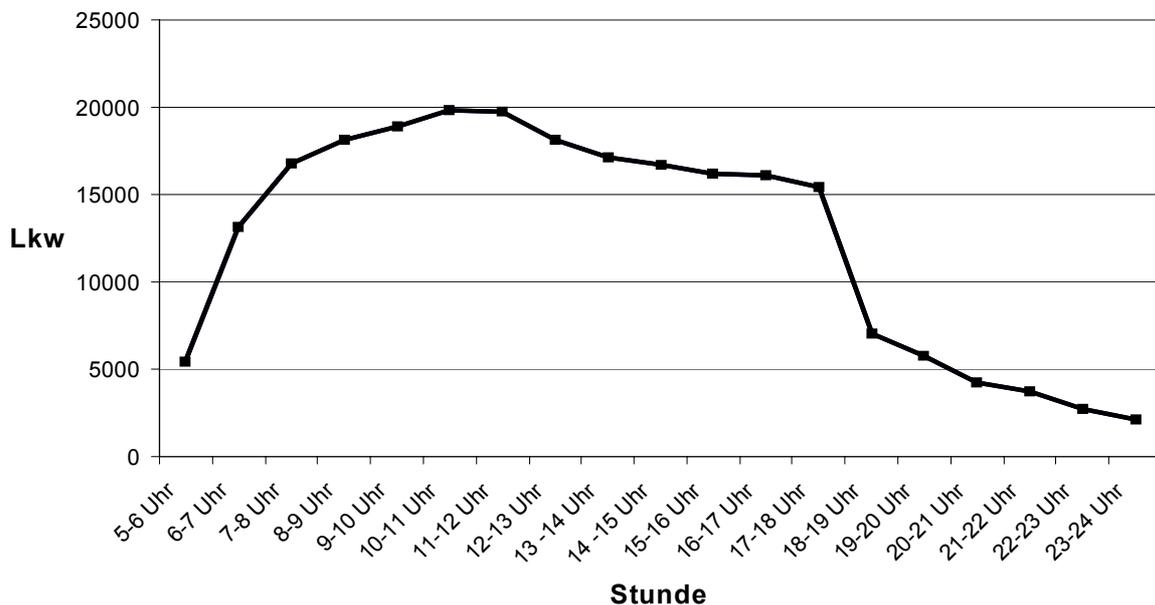


Abb. 23: Tagesganglinie für den werktäglichen Schwerverkehr in der Region Hannover

Der Wirtschaftsverkehr mit Personenkraftwagen wird bei dem verwendeten ökonomischen Verkehrsnachfragemodell SAN schon erfasst und musste daher nicht gesondert ermittelt werden. Die vom Kommunalverband Großraum Hannover zur Verfügung gestellten Wirtschaftsverkehrsdaten lagen lediglich als Binnenverkehr im Großraum Hannover für einen ganzen Tag vor. In der Untersuchung „Reduktion der Emissionsbelastungen bei Großveranstaltungen“ von SCHNÜLL und SCHÜTTE [51] wurden bereits aus den stundengenauen Fahrtenmatrizen für den werktäglichen Verkehr mit Personenkraftwagen iterativ stundengenau Fahrtenmatrizen für den Schwerverkehr abgeleitet und mit den Dauerzählstellen rund um Hannover abgegli-

chen. Daher wurden die aus den Daten der IVU abgeleiteten stundengenauen Schwerverkehrsmatrizen in die am Großraumrand schon kalibrierten Fahrtenmatrizen eingearbeitet. Die Qualität der Verkehrsnachfragedaten für den Wirtschaftsverkehr ist aufgrund des weniger detaillierten Datenmaterials nicht so hoch, wie für den motorisierten Individualverkehr. Auch dies war ein Grund dafür die Disaggregation des Datenmaterials nicht noch weiter voranzutreiben.

4.4 Verkehrsnachfrage des MIV im Großraum Hannover

4.4.1 Verkehrsnachfrage für den Analysenullfall 1997

Für den Großraum Hannover wurden Strukturdaten aus dem Jahr 1996 zugrunde gelegt. Lediglich die Einwohnerzahlen konnten für das Jahr 1997 aktualisiert werden. Für das verkehrliche Einflussgebiet (Umland) wurden für die Ermittlung der Verkehrsnachfrage Einwohnerdaten aus dem Jahr 1998 zugrunde gelegt. Als Bezugsjahr für die Verkehrsnachfrageermittlung wurde für die Kalibrierung das Bezugsjahr 1997 festgelegt. Den Tabellen 16 und 17 ist die ermittelte Verkehrsnachfrage für das mittlere werktägliche Verkehrsaufkommen während der EXPO 2000 (1. Juni bis 31. Oktober) unterteilt nach Stadt, Landkreis und Umland dargestellt. Die Verkehrsnachfrageermittlung erfolgte dabei für fünf Stundengruppen für den Zeitraum von 5.00 bis 24.00 Uhr. Für den Zeitraum von 0.00 bis 5.00 Uhr morgens war die erhobene Stichprobe der Erhebungen zum Mobilitätsverhalten durch die SOCIALDATA GmbH zu gering. Für den Zeitraum von 0.00 bis 5.00 Uhr wurde daher ein prozentualer Anteil von 2,31 % des Tagesverkehrsaufkommens zugrunde gelegt. Zum Vergleich kann das im Jahr 1992 aus den Daten der Volkszählung (1987) im Rahmen der Untersuchung „Verkehrsbeziehungen im Raum Hannover“ von HECK, FABIAN und MARX [25] ermittelte Fahrtenaufkommen von insgesamt 1.355.500 Pkw-Fahrten/Tag (IV-Matrix „87“) herangezogen werden.

	Stadt Hannover (LHH)	Landkreis (LKH)	Umland (U)	Summe
	175 Verkehrsbezirke	199 Verkehrsbezirke	76 (18 Leerbezirke)	450 Verkehrsbezirke
LHH	492.585	216.908	60.155	769.648
LKH	207.612	350.120	90.881	648.613
U	57.803	93.304	88.794	239.901
Summe	758.000	660.332	239.830	1.658.162

Tab. 16: MIV Fahrtenmatrix für Personenkraftwagen 1997 [Pkw-Fahrten/Tag]

	Stadt Hannover (LHH)	Landkreis (LKH)	Umland (U)	Summe
	175 Verkehrsbezirke	199 Verkehrsbezirke	76 (18 Leerbezirke)	438 Verkehrsbezirke
LHH	61.865	26.128	13.549	101.542
LKH	26.128	31.587	20.113	77.828
U	13.522	21.188	28.360	63.070
Summe	101.515	78.903	62.022	242.440

Tab. 17: MIV Fahrtenmatrix für Lastkraftwagen 1997 [Lkw-Fahrten/Tag]

4.4.2 Verkehrsnachfrage für das Jahr 2000

Die Prognose der Verkehrsnachfrage für Personenkraftwagen für das Jahr 2000 erfolgte jeweils getrennt für die Stadt Hannover, den Landkreis Hannover und das Umland. Es wurden regionale und überregionale Trends in die Prognose für den Großraum Hannover eingearbeitet.

Für die Entwicklung des motorisierten Individualverkehrs mit Personenkraftwagen wurde der in Tabelle 18 dargestellte Anstieg des Fahrtenaufkommens in Bezug auf das Bezugsjahr 1997 zugrunde gelegt.

Anstieg des Fahrtenaufkommens	Bezugsraum
2,0%	Stadt Hannover (LHH)
4,0%	Landkreis Hannover (LKH)
3,3%	Umland (U)

Tab. 18: Anstieg des Fahrtenaufkommens für den MIV mit Personenkraftwagen (1997-2000)

Für den Wirtschaftsverkehr in der Region wird für den Großraum Hannover im Zeitraum von 1990 bis zum Jahr 2000 ein deutlicher Anstieg von mehr als 60 Prozent prognostiziert (vgl. [34][25]). Für den Anstieg des Schwerverkehrs in der Region Hannover wurde ein Anstieg des Fahrtenaufkommens um **7%** für den Zeitraum von 1997 auf das Jahr 2000 zugrunde gelegt. Dies entspricht in etwa dem regionalen Anstieg des Lkw-Bestandes. Für die Abschätzung der Entwicklung des Schwerverkehrs auf den Bundesautobahnen wurden die Dauerzählstellen rund um Hannover für den Zeitraum der EXPO 2000 ausgewertet und für die Kalibrierung genutzt.

Das mittlere werktägliche Fahrtenaufkommen (ohne den EXPO-bedingten Zusatzverkehr) während der EXPO 2000, also für den EXPO-Zeitraum von Juni bis Oktober 2000, ist den Tabellen 19 und 20 zu entnehmen.

	Stadt Hannover (LHH)	Landkreis (LKH)	Umland (U)	Summe
	175 Verkehrsbezirke	199 Verkehrsbezirke	76 (18 Leerbezirke)	450 Verkehrsbezirke
LHH	502.438	223.404	61.748	787.590
LKH	213.832	364.128	94.197	672.157
U	59.334	96.709	91.724	247.767
Summe	775.604	684.241	247.669	1.707.514

Tab. 19: MIV Fahrtenmatrix für Personenkraftwagen 2000 [Pkw-Fahrten/Tag]

	Stadt Hannover (LHH)	Landkreis (LKH)	Umland (U)	Summe
	175 Verkehrsbezirke	199 Verkehrsbezirke	76 (18 Leerbezirke)	450 Verkehrsbezirke
LHH	66.196	27.956	14.497	108.649
LKH	27.956	33.798	21.542	83.296
U	14.469	22.671	30.345	67.485
Summe	108.621	84.425	66.384	259.430

Tab. 20: MIV Fahrtenmatrix für Lastkraftwagen 2000 [Lkw-Fahrten/Tag]

5. Dynamische Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs

5.1 Allgemeines

Für eine dynamische Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs unter Berücksichtigung einer Großveranstaltung wie der EXPO 2000 sind zwei Arbeitsschritte erforderlich. Im ersten Arbeitsschritt müssen zur Vorbereitung der dynamischen Simulation die Verkehrsnachfragematrizen für den werktäglichen Normalverkehr (Personenkraftwagen und Schwerverkehr) in Stundengenauigkeit erarbeitet werden. Im zweiten Arbeitsschritt kann dann die dynamische Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs erfolgen. Durch die Vorbereitung der Verkehrsnachfragematrizen für den Schwerverkehr und den Verkehr mit Personenkraftwagen ist es möglich, die eigentliche dynamische Simulation eines ganzen Werktages unter Einbeziehung einer Prognose (z.B. für den nächsten Tag) und einer Simulation des veranstaltungsbedingten Verkehrs in relativ kurzer Zeit durchzuführen.

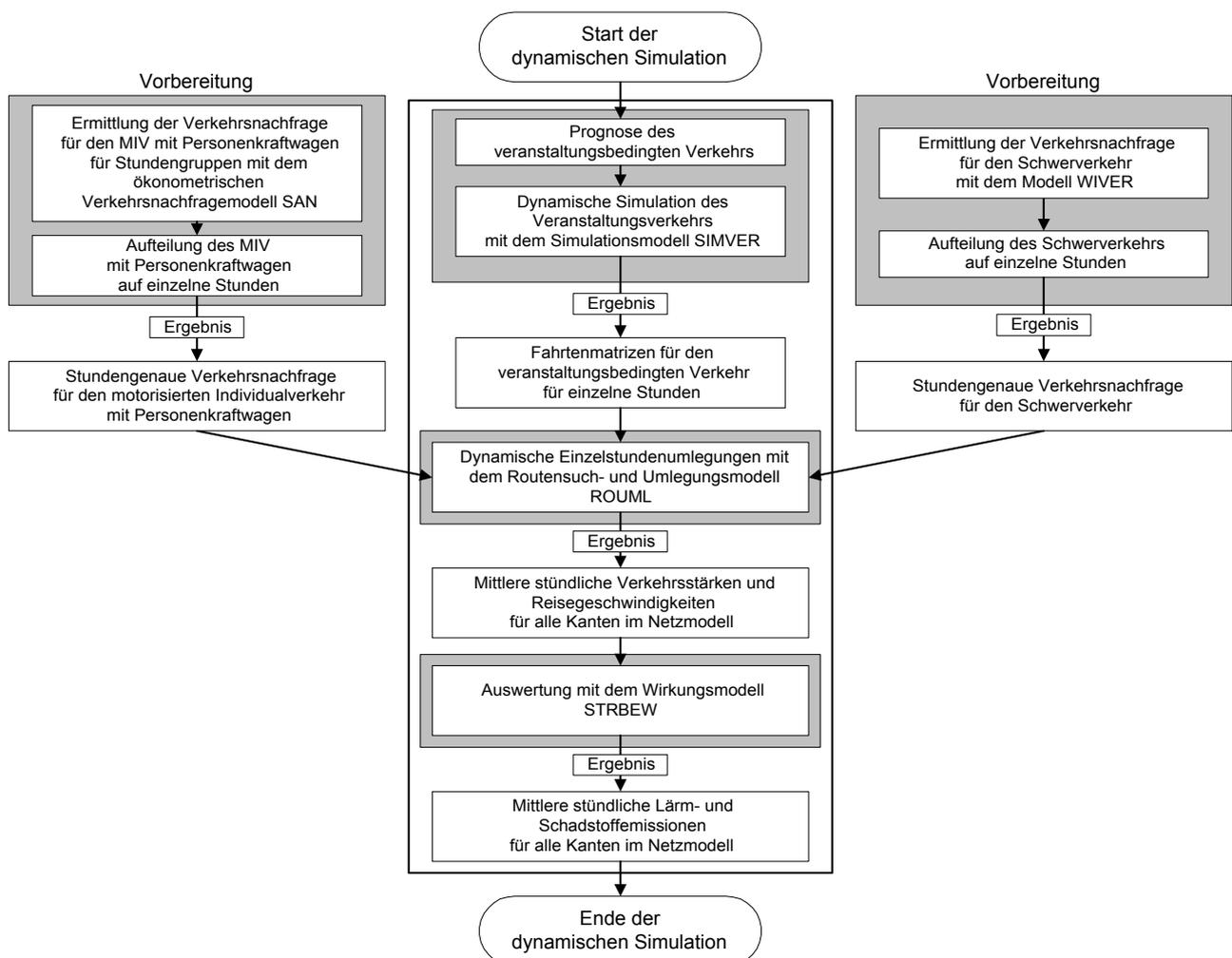


Abb. 24: Dynamische Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs

Die dynamische Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs für ein Verkehrsnetzmodell in der Größe des Netzmodells des Großraumes Hannover (3.500 Knoten, 8.000 Kanten und 450 Bezirke) benötigt auf einem Computer mit einem 350 MHz Pentium II Prozessor für die Simultanumlegung einer

einzelnen Stunde in Abhängigkeit von der Netzauslastung zwischen 20 min und 35 min. Der prinzipielle Ablauf der dynamischen Simulation des motorisierten Individualverkehrs ist der Abbildung 24 zu entnehmen. Die einzelnen Teilmodule, die für eine Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs erforderlich sind, werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

5.2 Simulationsmodell Veranstaltungsverkehr SIMVER

5.2.1 Aufgaben des Simulationsmodells

Mit einer prognostizierten Herkunftsverteilung und einer ebenfalls prognostizierten An- und Abreiseganglinie ist es prinzipiell möglich, den veranstaltungsbedingten Besucherverkehr mit Verkehrsumlegungsmodellen abzubilden. Unter der Berücksichtigung der Herkunftsverteilung werden im Modell SIMVER während der Anreise zur Veranstaltung die Personenkraftwagen von Besuchern zu den zur Verfügung stehenden Parkplätzen geführt. Während der Abreise reisen die Besucher dann wieder entsprechend in die Richtung ab, aus der sie gekommen sind. Bei Veranstaltungen mit mehreren zur Verfügung stehenden Parkplätzen wird sich jedoch in der Realität schnell eine an- und abreisebezogene Priorität einzelner Parkplätze für bestimmte Anreiserichtungen ergeben, da die einzelnen Parkplätze nicht für alle Anreiserichtungen gleich attraktiv sind und unterschiedlich gut erreichbar sind.

Es wurde bei der Betrachtung der möglichen Schalt- und Aktivierungszustände aller P+R-Plätze schnell klar, dass der Faktor Zeit für die Aktivierung und Deaktivierung einzelner Parkplätze eine entscheidende Rolle spielt. Wie schnell ein P+R-Platz vollläuft, hängt im wesentlichen von den Faktoren

- Stellplatzanzahl,
 - Leistungsfähigkeit der Zufahrt und
 - Attraktivität für die Besucher
- ab.

Grundsätzlich ist es möglich, eine dynamische P+R-Wegweisung lange in einem Schaltzustand zu halten. Wird ein Schaltzustand einer dynamischen Wegweisung jedoch zu lange beibehalten, so kann dies zu erheblichen Verkehrsproblemen und Irrfahrten von Besuchern zu bereits überfüllten P+R-Plätzen führen. Eine willkürliche Auswahl der Länge einer Aktivierung eines P+R-Platzes ist daher für eine modellhafte Abbildung einer sinnvollen Verkehrslenkungsstrategie ungeeignet. Es war daher notwendig, ein Simulationsmodell zu entwerfen, welches die einzelnen P+R-Plätze automatisch aktiviert und deaktiviert und gleichzeitig die Eingangsdaten für die Verkehrsmodellrechnungen (Fahrtenmatrizen für den veranstaltungsbedingten Zusatzverkehr) erzeugt.

Mit dem Simulationsmodell Veranstaltungsverkehr (SIMVER) sollten daher die folgenden Ziele erreicht werden:

- Veranstaltungsbedingter Zusatzverkehr zu P+R-Plätzen soll
 - unter Berücksichtigung eines dynamischen Parkleitsystems,
 - unter Berücksichtigung der unterschiedlich gut erreichbaren und unterschiedlich attraktiv gelegenen Parkplätze und
 - unter Beachtung der Stellplatzkapazitäten und der maximalen Zuflussmengen zu den P+R-Plätzen möglichst realitätsnah im Modell abgebildet werden.
- Die bisher überwiegend manuell erzeugten Fahrtenmatrizen für den veranstaltungsbedingten Zusatzverkehr sollen automatisiert erzeugt werden, um die für eine dynamische Simulation benötigte Zeit deutlich zu reduzieren. Es sollten so kurzfristige Prognosen für den Verkehrsablauf z.B. für den jeweils nächsten Tag ermöglicht werden.

5.2.2 Unterschiedene Fahrtenkategorien

Mit dem entwickelten Simulationsmodell SIMVER ist es in kurzer Zeit möglich, für die An- und Abreise von Besuchern einer großen Veranstaltung unterschiedliche Verkehrslenkungsstrategien bei der Nutzung eines dynamischen P+R-Parkleitsystems nachzubilden. Berücksichtigt werden können dabei die folgenden Kategorien des veranstaltungsbedingten Zusatzverkehrs:

- **Kategorie 1:** Pkw-Fahrten zum/vom Veranstaltungsgelände,
- **Kategorie 2:** Pkw-Fahrten zu/von P+R-Plätzen,
- **Kategorie 3:** Pkw-Fahrten zu/von Parkplätzen an S-Bahn und Stadtbahn,
- **Kategorie 4:** Pkw-Fahrten von Beschäftigten zum/vom Veranstaltungsgelände und
- **Kategorie 5:** Bus-Fahrten zum/vom Veranstaltungsgelände

unterschieden werden.

Für jede der berücksichtigten Kategorien des veranstaltungsbedingten Zusatzverkehrs kann eine prozentuale Herkunftsverteilung angegeben werden. Für jede Kategorie des veranstaltungsbedingten Zusatzverkehrs werden die Entfernungsklassen

- **Fernverkehr** (West, Nord, Ost, Süd),
- **Umland** (West, Nord, Ost, Süd) und
- **Stadt**

unterschieden.

Für den städtischen Bereich wird die Besucherherkunft im Modell SIMVER entsprechend der Anzahl der Einwohner der einzelnen Verkehrsbezirke gewichtet. Die Definition der Verkehrsbezirke im städtischen Bereich ist im Modell SIMVER prinzipiell frei zu wählen. Sie sollte jedoch, sofern eine anschließende Verwendung der Ergebnisse des Simulationsmodells in einem Umlegungsmodell vorgesehen ist, den Verkehrsbezirken des Netzmodells entsprechen, damit das Simulationsmodell die zugehörigen Fahrtenmatrizen erzeugen kann. Es ist möglich, für jede der fünf Kategorien des veranstaltungsbedingten Zusatzverkehrs eine eigene An- und Abreiseganglinie zu definieren. Damit kann z.B. berücksichtigt werden, dass Besucher, die einen längeren Weg zum Veranstaltungsort haben, die zur Verfügung stehenden Parkplätze später erreichen werden.

5.2.3 Eingangsgrößen für die Simulation

Für jede Stunde eines Tages ist es möglich, einen Aktivierungslevel für die Parkplätze vorzugeben (vgl. Abb. 25). Je höher der Aktivierungslevel, desto mehr Parkplätze stehen für den anreisenden Kraftfahrzeugverkehr zur Verfügung. Ein höherer Aktivierungslevel schließt jeweils die P+R-Plätze aller untergeordneten Aktivierungslevel ein.

Für jeden einzelnen P+R-Platz kann im Simulationsmodell SIMVER zusätzlich ein P+R-Aktivierungslevel für die vier Anreiserichtungen Westen, Norden, Osten und Süden definiert werden, ab dem der P+R-Platz entsprechend der Ausschilderung an den Bundesautobahnen vom Simulationsmodell beschickt wird (vgl. Tab. 21a). Dadurch ist es möglich, P+R-Plätze zu unterschiedlichen Zeiten für unterschiedliche Anreiserichtungen zu aktivieren. Die Akzeptanz der P+R-Wegweisung ist sicherlich auch von den Verkehrsmeldungen und der jeweiligen Verkehrssituation im Großraum Hannover abhängig.

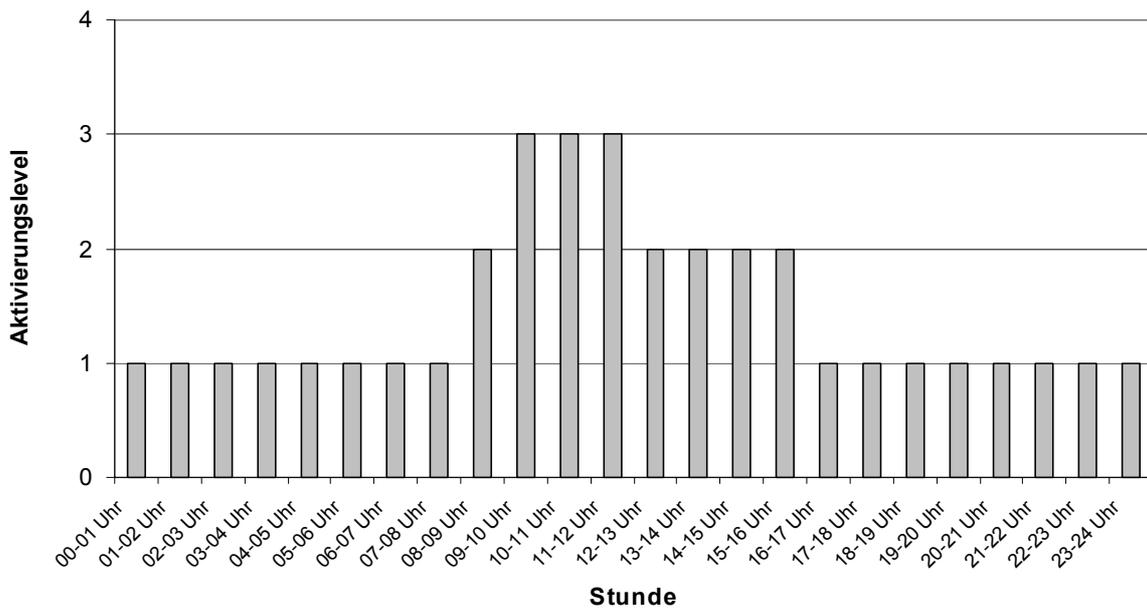


Abb. 25: Parkplatz-Aktivierungslevel über einen ganzen Tag

P+R-Platz	Rang (Attraktivität)	Deaktivierungs-Auslastungsgrad	Westen	Norden	Osten	Süden
P+R-Platz A	1	75%	4	2	2	-
P+R-Platz B	2	80%	2	-	-	-
P+R-Platz C	3	80%	1	1	2	3

Tab. 21: Rang, Deaktivierungs-Auslastungsgrad und Aktivierungslevel nach Anreiserichtung

Mit dem Simulationsmodell SIMVER ist es durch das Variieren von unterschiedlichen Attraktivitäten für die unterschiedlichen Parkplätze möglich, alternative Verkehrslenkungsstrategien zu testen und vorab gute von weniger guten Verkehrslenkungsstrategien zu unterscheiden.

Das Simulationsmodell SIMVER prüft dabei die beiden folgenden Fragen:

Frage 1: Wenn ein Parkplatz der Attraktivität X und der Leistungsfähigkeit der Zufahrt Y aktiviert ist, wann muss er dann deaktiviert werden, bevor er überläuft ?

Frage 2: Wann kann ein deaktivierter Parkplatz aufgrund von frei gewordenen Stellplätzen wieder aktiviert werden ?

In Abhängigkeit von der Größe und der Entfernung eines P+R-Platzes von den Haupttrouten kann im Simulationsmodell SIMVER ein Deaktivierungs-Auslastungsgrad für jeden P+R-Platz definiert werden, von dem an der P+R-Platz aus der aktuellen Wegweisung entfernt werden sollte. Damit ist es möglich, die einzelner P+R-Plätze optimal zu aktivieren und zu deaktivieren, ohne dass die zum P+R-Platz geschickten Kraftfahrzeuge zum Überlaufen des P+R-Platzes führen.

Das Simulationsmodell SIMVER ist so flexibel gehalten, dass es möglich ist, eine beliebige Anzahl von P+R-

Plätzen beliebiger Größe zu verwalten und (nach einigen Testläufen) auch realitätsnah zu beschicken. Die Besuchermengen nach Fahrtenkategorien und prozentualen Herkunftsverteilungen sind schnell zu variieren, so dass eine offline-Simulation z.B. für unterschiedliche Wochentage (auch für die Wochenenden) während einer großen Veranstaltung möglich ist. Ohne die Erzeugung der Fahrtenmatrizen benötigt eine Simulation eines Tages etwa 3 min. Mit der Erzeugung der Fahrtenmatrizen werden etwa 12 min benötigt. Es ist mit dem Simulationsmodell SIMVER also möglich, vor dem Ändern eines Schaltzustandes einer dynamischen Wegweisung erste Abschätzungen über die Konsequenzen, die durch das Verändern des Schaltzustandes entstehen, vorzunehmen.

Im Simulationsmodell SIMVER werden die anreisende Personenkraftwagen gemäß einer frei zu definierenden Rangfolge für jeden Parkplatz verteilt. Es kann dabei berücksichtigt werden, dass der maximal mögliche Zufluss zu einem P+R-Platz in Abhängigkeit vom Normalverkehr variieren kann. Die Rangfolge und die maximale Zuflussmenge in Kfz/h ist für die vier Anreiserichtungen Westen, Norden, Osten und Süden prinzipiell aus der Einschätzung der Leistungsfähigkeit der Zufahrt zum P+R-Platz und der Einschätzung der Akzeptanz durch die Besucher zu ermitteln.

Beispiel für den Simulationsansatz:

Parkplätze	Rang	max. Zufluss	Aktivierungslevel Westen
P+R-Platz 1	1	400 Kfz/h	2
P+R-Platz 2	2	400 Kfz/h	1
P+R-Platz 3	3	200 Kfz/h	2

Beispiele der Beschickung für 3 Parkplätze der Anreiserichtung Westen

- Beispiel 1:** *Aktivierungslevel 1, 500 Kfz/h reisen zu P+R-Plätzen aus Richtung Westen an*
 Im Simulationsmodell SIMVER werden 400 Kfz/h zum P+R-Platz 2 geführt, da nur dieser Parkplatz im Aktivierungslevel 1 zur Verfügung steht d.h. auf den Bundesautobahnen ausgewiesen wird. Für die noch zu verteilenden 100 Kfz/h fehlt im Aktivierungslevel 1 eine aktivierte Wegweisung zu den P+R-Plätzen 1 oder 3. Daher wird im Simulationsmodell SIMVER eine Warnung erzeugt, dass die P+R-Platz Kapazitäten für die Anreiserichtung nicht ausreichen. Im Simulationsmodell SIMVER wird dann davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge weiter in Richtung Veranstaltungsgelände fahren und schließlich zu einem Überlaufparkplatz in der Nähe des Veranstaltungsgeländes geführt werden.
- Beispiel 2:** *Aktivierungslevel 2, 900 Kfz/h reisen zu P+R-Plätzen aus Richtung Westen an*
 Als erstes werden im Simulationsmodell SIMVER 400 Kfz/h zum P+R-Platz 1 gelenkt (Rang 1). Danach erfolgt die Beschickung des P+R-Platzes 2 mit 400 Kfz/h (Rang 2). Anschließend erfolgt die Beschickung des P+R-Platzes 3 mit den verbleibenden 100 Kfz/h. Es wird keine Warnung durch das Simulationsmodell erzeugt, da die zur Verfügung stehenden Stellplatzkapazitäten auf P+R-Plätzen ausreichen.

5.2.4 Simulationsablauf

Der Ablauf der Simulation des an- und abreisenden Kraftfahrzeugverkehrs erfolgt im Simulationsmodell SIMVER dynamisch für einen ganzen Tag, unterteilt in Simulationen der einzelnen Stunden (vgl. Abb. 26). Im Anschluss an die Simulation aller Anreiserichtungen für eine Stunde wird im Simulationsmodell SIMVER überprüft, ob ein aktivierter P+R-Platz seinen Deaktivierungs-Auslastungsgrad erreicht hat. Ist dies der Fall, so wird er für die nächste Stunde deaktiviert, d.h. auf den Bundesautobahnen nicht mehr ausgeschildert. Besonders wichtig ist die durchgeführte Simulation auch für die Abbildung der Abreise vom Veranstaltungsgelände, da die durchgeführte Simulation sicherstellt, dass die abreisenden Kraftfahrzeuge vom richtigen Parkplatz in die richtige Richtung abfahren.

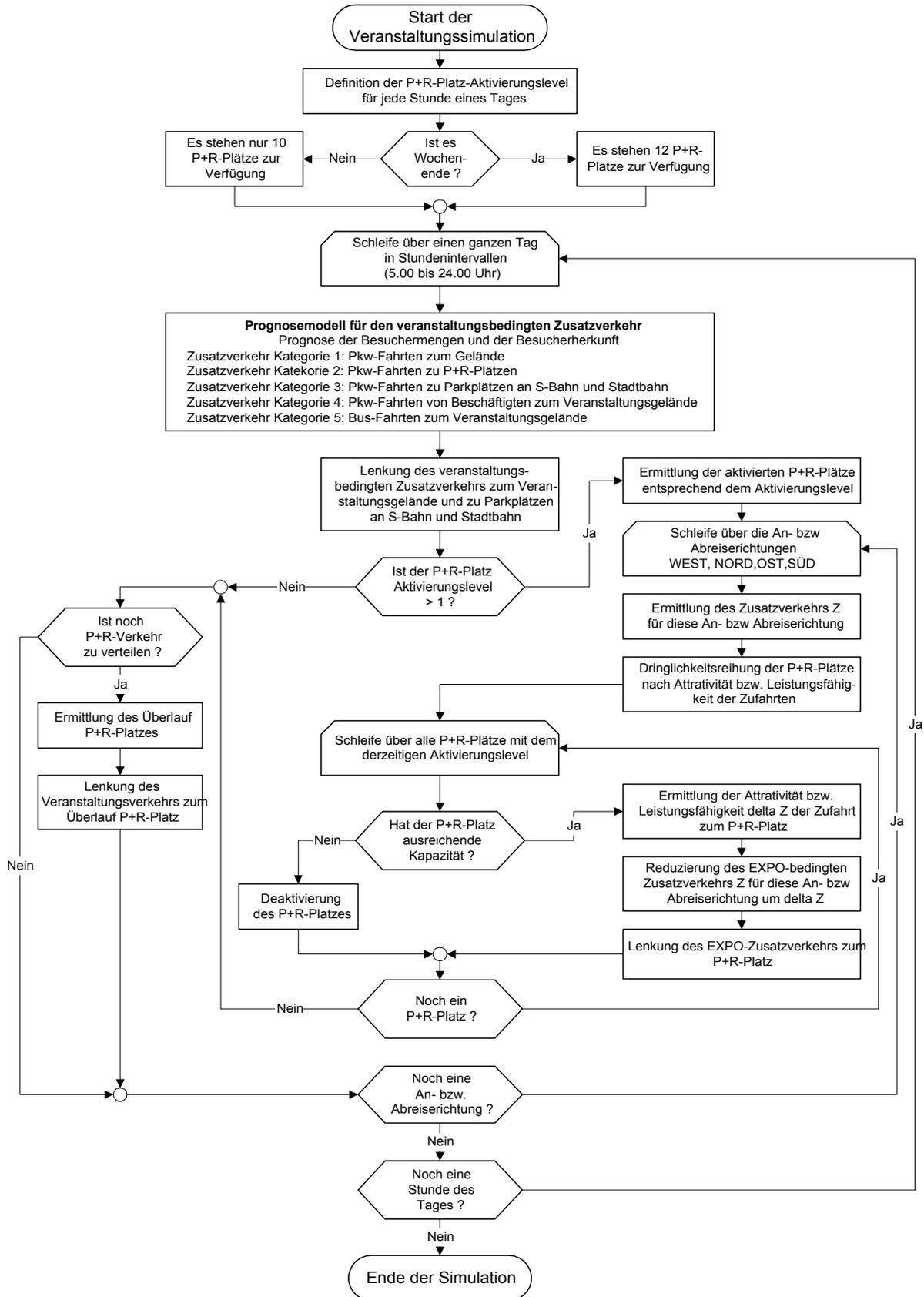


Abb. 26: Ablaufdiagramm der P+R-Simulation des Veranstaltungsverkehrs mit SIMVER

5.2.5 Ergebnis der Simulation

Im Simulationsmodell SIMVER erfolgt während der simulierten Anreise zur Veranstaltung die Zielwahl der Besucher, die zu P+R-Plätzen fahren. Für die Abreise von den P+R-Plätzen erfolgt die Quelldefinition gemäß der während der Anreise getroffenen Zielwahl. Das Simulationsmodell protokolliert während der Anreise auch, zu welchem Parkplatz wie viele Personenkraftwagen von Besuchern aus welcher Himmelsrichtung angereist sind. Dies ist erforderlich, um die Personenkraftwagen von Besuchern während der Abreise vom jeweiligen P+R-Platz auch wieder in die entsprechende Richtung abreisen zu lassen.

Da das Simulationsmodell SIMVER Quell-Ziel-Matrizen erzeugt, kann es prinzipiell mit jedem Umlegungsprogramm kombiniert werden. Das verwendete Umlegungsmodell muss jedoch, wie das Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML, für eine realistische Berücksichtigung der vorhandenen Wegweisung für den an- und abreisenden Kraftfahrzeugverkehr sorgen.

Als Ergebnis eines Simulationslaufes werden die Fahrtenmatrizen ausgegeben. Der Protokollausdruck der Simulation der An- und Abreise eines ganzen Tages liefert erste Hinweise darauf, von welcher Stunde eines Tages an während der Anreise zur untersuchten Großveranstaltung aus welcher Richtung mit Problemen zu rechnen ist, da Warnungen ausgegeben werden, sobald weniger P+R-Stellplatzkapazitäten für eine Anreisrichtung zur Verfügung stehen, als Fahrzeuge anreisen.

Eine Bewertung unterschiedlicher Verkehrslenkungsstrategien ist mit dem Simulationsmodell SIMVER noch nicht abschließend möglich, da das Simulationsmodell den Verkehrszustand auf den einzelnen Streckenabschnitten im Netzmodell nicht kennt und somit nicht beurteilt werden kann, ob die Verkehrszustände, die sich aufgrund der aktuell geschalteten Wegweisung im Straßennetz auf den einzelnen Streckenabschnitten im Großraum Hannover einstellen, überhaupt abzuwickeln sind. Abschließend kann eine Bewertung unterschiedlicher Verkehrslenkungsstrategien erst dann erfolgen, wenn die Ergebnisse des Simulationsmodells SIMVER (die Fahrtenmatrizen für den EXPO-bedingten Zusatzverkehr) mit dem Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML zusammen mit den Fahrtenmatrizen für den werktäglichen Normalverkehr (Schwerverkehr und Personenkraftwagen) auf das Netzmodell für den Großraum Hannover umgelegt werden. Die Kombination der Simulation der Verkehrslenkungsstrategie im Simulationsmodell SIMVER mit den dynamischen Einzelstundenumlegungen mit dem Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML ermöglicht es, die Folgen einer Verkehrslenkungsstrategie mit dem Ziel eines optimalen Einsatzes von Stellplatzressourcen zur Vermeidung von Überlastungen des Straßennetzes zu überprüfen.

5.3 Netz- und Verkehrsumlegungsmodell ROUML

5.3.1 Allgemeines

Die Verkehrsmodellrechnungen für die EXPO 2000 im Rahmen der Untersuchung „Verkehrliche Auswirkungen EXPO-bedingter Zusatzverkehre im Großraum Hannover“ [47] haben gezeigt, dass die Abbildung von Wechselwegweisungsanlagen und des weitgehend ortsunkundigen Veranstaltungsverkehrs mit den herkömmlichen Verkehrsumlegungsmodellen schwierig ist. Die in der Untersuchung angewandte Methode, den EXPO-bedingten Zusatzverkehr über die Definition von Zwischenzielen auf die ausgeschilderten Routen zu lenken, war nur ein erster Ansatz, um den EXPO-bedingten Zusatzverkehr realitätsnah abzubilden. Die Abbildung von Störfällen im Straßennetz ist jedoch mit dem damals angewandten Verfahren nicht oder zumindest nur sehr eingeschränkt möglich. Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Arbeit das Routensuch- und Verkehrsumlegungsmodell ROUML entwickelt. Neben der Abbildung des werktäglichen Normalverkehrs (Lkw und Pkw) ermöglicht es ROUML, gelenkten und überwiegend ortsunkundigen Veranstaltungsverkehr abzubilden. Der Umlegungsprozess erfolgt simultan für den Schwerverkehr, für den ortsunkundigen EXPO-Besucherverkehr und für den ortskundigen Personenkraftwagenverkehr, so dass sich die unterschiedenen Fahrzeugkategorien gegenseitig beeinflussen. In einer multi-sukzessiven Simultanumlegung (vgl. Abb. 27) können die unterschiedenen Fahrtenkategorien (Lkw, ortsunkundige Pkw von Veranstaltungsbesuchern, ortskundige Pkw) mehrfach in unterschiedlich großen Anteilen umgelegt werden.

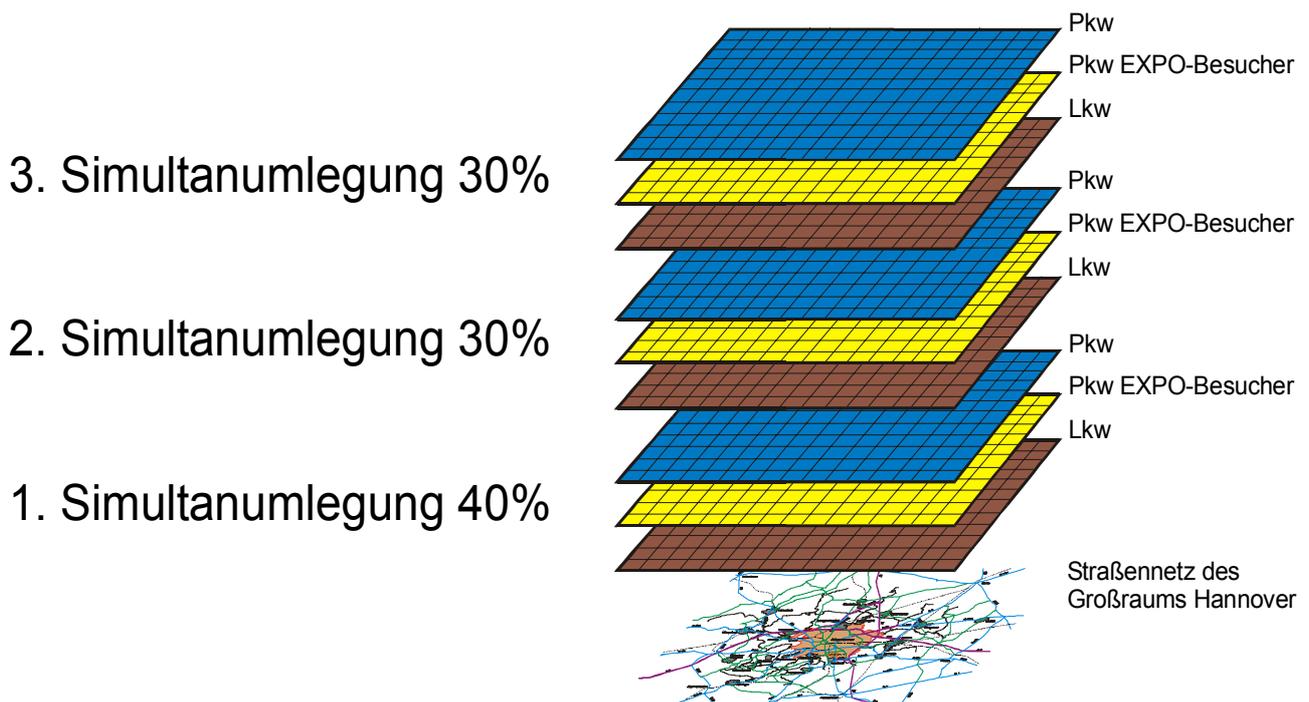


Abb. 27: Prinzip der multi-sukzessiven Simultanumlegung im Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML

Das entwickelte Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML ermöglicht es, beliebig viele unterschiedliche Fahrtenmatrizen in einem multi-sukzessiv Simultanumlegungsprozess miteinander zu kombinieren. Für jede Teilumlegung einer Fahrtenmatrix kann zwischen unterschiedlichen Umlegungsverfahren gewählt werden. Für den ortsunkundigen Veranstaltungsverkehr kann während jeder Teilumlegung einer Fahrtenmatrix eine Wegweisung vorgegeben werden. Dies ermöglicht es, für jede An- und Abreisericung die vorhandene Wegweisung nachzubilden. Die Verkehrsumlegungen für den Schwerverkehr berücksichtigen die Unterschiede von Lastkraftwagen gegenüber den Personenkraftwagen hinsichtlich des Fahrverhaltens und der Routenwahl.

5.3.2 Netzmodell ROUML / NETMASTER

5.3.2.1 Geographische Struktur (Streckennetz)

Das Netzmodell von ROUML ist eine Erweiterung des Netzmodells von DIAL-IV [28]. In dem Netzmodell sind alle relevanten Strecken enthalten. Die einzelnen Strecken sind richtungsgrennt durch die Nummern der Anfangs- und Endknoten gekennzeichnet und durch Gauß-Krüger Koordinaten der realen Knotenpunkte geographisch lokalisiert.

Während das Verkehrsumlegungsmodell DIAL-IV nur den Pkw-Verkehr abbilden kann, ermöglicht das Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML zusätzlich noch den Schwerverkehr (Lkw) und ortsunkundigen Veranstaltungsverkehr (Pkw-ortsunkundig) abzubilden.

Für detailliertere Betrachtungen oder zur Darstellungen von Abbiegeverboten können Knoten analog zum Netzmodell im Umlegungsmodell DIAL-IV [28] auch aufgelöst werden (vgl. Abb. 16, S. 32). In diesem Fall werden alle möglichen Fahrtbeziehungen innerhalb eines Knotenpunktes einzeln abgebildet.

5.3.2.2 Betriebliche Struktur (Netzbetrieb)

Zur Beschreibung der betrieblichen Struktur (Netzbetrieb) sind im Netzmodell

- **streckenbezogene Merkmale** und
- **knotenbezogene Merkmale**

zu unterscheiden.

Streckenbezogene Merkmale

Für die Abbildung des Schwerverkehrs wurde eine Erweiterung der Streckentypentabelle von DIAL-IV um die Anfangsgeschwindigkeiten für den Schwerverkehr erforderlich (vgl. Abb. 22).

Analog zum Netzmodell des Umlegungsmodells DIAL-IV wird im Netzmodell des Routensuch- und Umlegungsmodells ROUML jeder aufgenommene Streckenabschnitt mit einem vierstelligen Streckentyp versehen, um ihm über diese Verschlüsselung eine Reihe von Merkmalen zuzuordnen. In der allgemeinen Form des Streckentyps a b c d haben die 4 Ziffern folgende Bedeutung:

- a:** Lage der Strecke (1=innerorts/2=außerorts)
- b:** Streckenfunktion bzw. Netzhierarchie
- c:** Ausbauqualität
- d:** Anzahl der Fahrspuren pro Richtung

Die zugelassenen Kombinationsmöglichkeiten werden in einer Streckentypentabelle, aus der die jeweils zugehörigen Merkmale Bemessungsverkehrsstärke und Bemessungsgeschwindigkeit zu entnehmen sind, zusammengestellt. Die Streckentypentabelle (Tab. 22) ist entsprechend den speziellen Anforderungen modifiziert und an die Richtlinien (RAS-Q [14]/ EAHV [17] / EAE 85/95 [15]) angepasst worden.

Lage	Typgruppe (Straßenkategorie) (RAS-N[16]/RAS-Q[14])	Ausbau- standard	V_B Pkw	V_B Lkw	Q_B Kfz	Bemerkungen	
a	b	c	[km/h]	[km/h]	[Kfz/h]		
1 außerorts	großräumig I/AI	1	1 2 3	120 120 110	100 100 100	1900 1800 1600	a6ms/a4ms
	überregional II/AI	2	1 2 3	100 90 80	100 90 80	1250 1150 1050	b4ms c4ms d4
	regional III/AII	3	1 2 3	90 80 70	90 80 70	700 650 550	b2s b2 d2
	zwischen-gemeindlich IV/AIII/AIV	4	1 2 3	80 70 60	80 70 60	600 500 400	b2 d2 e2
	Fiktivstrecke (Anbindung)	5	1 2 3	100 50 20	100 50 20	1000 1000 1000	
2 innerorts	Schnellverkehrsstraße / Kfz-Straße	1	1 2 3	80 70 60	70 60 50	1600 1500 1300	b4ms c4m d4
	Hauptverkehrsstraße	2	1 2 3 4 5 6	50 50 40 50 50 40	50 40 40 50 40 40	1100 900 700 1100 900 700	anbaufrei angebaut angebaut anbaufrei, Gr.W. angebaut, Gr.W. angebaut, Gr.W.
	Hauptsammelstraße	3	1 2 3 4 5 6	50 40 40 50 40 40	40 30 30 40 30 30	450 400 350 450 400 350	anbaufrei angebaut angebaut anbaufrei, Gr.W. angebaut, Gr.W. angebaut, Gr.W.
	Anliegerstraße	4	1 2 3	40 40 40	30 30 30	400 350 250	
	Fiktivstrecke (Anbindung)	5	1 2 3	30 20 10	30 20 10	1000 1000 1000	
	<p><u>Erläuterungen:</u></p> <p>V_B : Bemessungsgeschwindigkeit im unbelasteten Zustand</p> <p>Q_B : Bemessungsverkehrsstärke des Modells pro Fahrstreifen</p> <p>Gr.W. : Koordinierte Lichtsignalregelung (Grüne Welle)</p> <p>Ausbaustandard 1 und 4: gut 2 und 5: mittel 3 und 6: niedrig</p> <p>Allgemeine Form des vierziffrigen Streckentyps:</p> <p>a b c d mit a, b, c: siehe Tabelle d: Anzahl Fahrstreifen/Richtung</p>						

Tab. 22: Streckentypentabelle Hannover (Stand 04.1999)

Knotenbezogene Merkmale

Im Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML können die Wartezeiten an Knotenpunkten in Abhängigkeit von den Kraftfahrzeugverkehrsstärken in allen Knotenpunktzufahrten ermittelt werden. Es können dabei die folgenden Knotenpunkttypen unterschieden werden:

- Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage,
- Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage,
- Knotenpunkte mit Kreisverkehrsplätzen und
- planfreie Knotenpunkte (keine Wartezeiten).

Für die Berechnung der Wartezeiten an Knotenpunkten in Abhängigkeit von den Verkehrsbelastungen in allen Knotenpunktzufahrten ist es jedoch erforderlich, die Fahrstreifenaufteilung in der Aufweitung vor dem Knotenpunkt zu kodieren. Gegenüber der Netzstruktur vom Verkehrsumlegungsmodell DIAL-IV wurde es daher notwendig, dem Verkehrsnetzmodell zusätzliche Informationen für spezielle Knotenpunkte zugänglich zu machen. Diese zusätzlichen Informationen werden in einer Datei „strom.dat“ abgespeichert. In der Datei „strom.dat“ müssen die Knotenströme einheitlich definiert werden. Die Definition der Stromnummern ist von erheblicher Bedeutung bei der Ermittlung der Wartezeiten. Der Aufwand, um für ein ganzes Verkehrsnetzmodell die Fahrstreifenaufteilungen in der Aufweitung vor den Knotenpunkt in jeder Knotenpunktzufahrt zu kodieren, ist hoch. Im Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML können nur an aufgelösten Knotenpunkten die Wartezeiten in Abhängigkeit von allen Knotenpunktzufahrten ermittelt werden (vgl. Abb. 29). Die Anzahl der erforderlichen Knoten im Netzmodell erhöht sich damit deutlich.

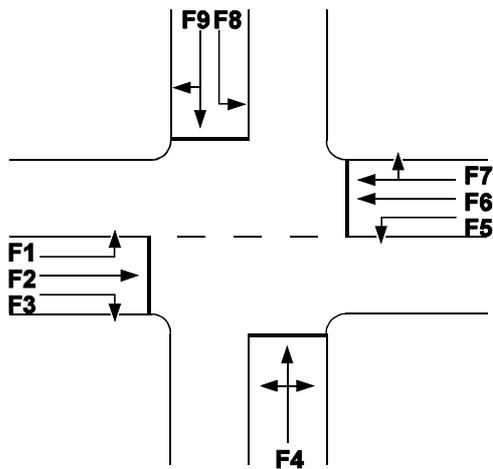


Abb. 28: Beispielknotenpunkt

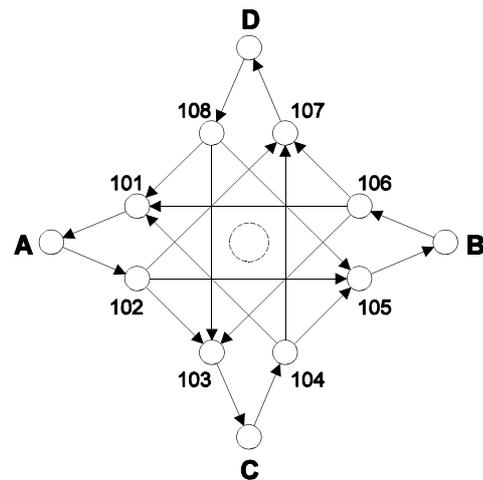


Abb. 29: Aufgelöster Knotenpunkt im Netzmodell

von Knoten	nach Knoten	Stromtyp (vgl. Abb. 38)	Fahrstreifenanzahl	Nummer des Fahrstreifens (vgl. Abb. 28)	Fahrstreifenaufteilung Prozent
102	107	1 (links)	1	1 (F1)	100
102	105	2 (geradeaus)	1	2 (F2)	100
102	103	3 (rechts)	1	3 (F3)	100
104	101	4 (links)	1	4 (F4)	100
104	107	5 (geradeaus)	1	4 (F4)	100
104	105	6 (rechts)	1	4 (F4)	100
106	103	7 (links)	1	5 (F5)	100
106	101	8 (geradeaus)	2	6 (F6), 7 (F7)	40, 60
106	107	9 (rechts)	1	7 (F7)	100
108	105	10 (links)	1	8 (F8)	100
108	103	11 (geradeaus)	1	9 (F9)	100
108	101	12 (rechts)	1	9 (F9)	100

Tab. 23: Stromdatei für den Beispielknotenpunkt

Durch die zusätzlichen Informationen über die Fahrstreifenaufteilung am Knotenpunkt ist es möglich, die Wartezeiten am Knotenpunkt in Abhängigkeit von den Verkehrsstärken in allen Knotenpunktzufahrten zu ermitteln.

5.3.2.3 Netzeditor NETMASTER

Der Netzeditor NETMASTER ist zum Verändern und Betrachten des Netzes sowie als Ergebnisbetrachtungsprogramm entwickelt worden (vgl. Abb. 30) [36]. Mit dem Programm NETMASTER können Netze eingelesen, verändert und anschließend wieder abgespeichert werden.

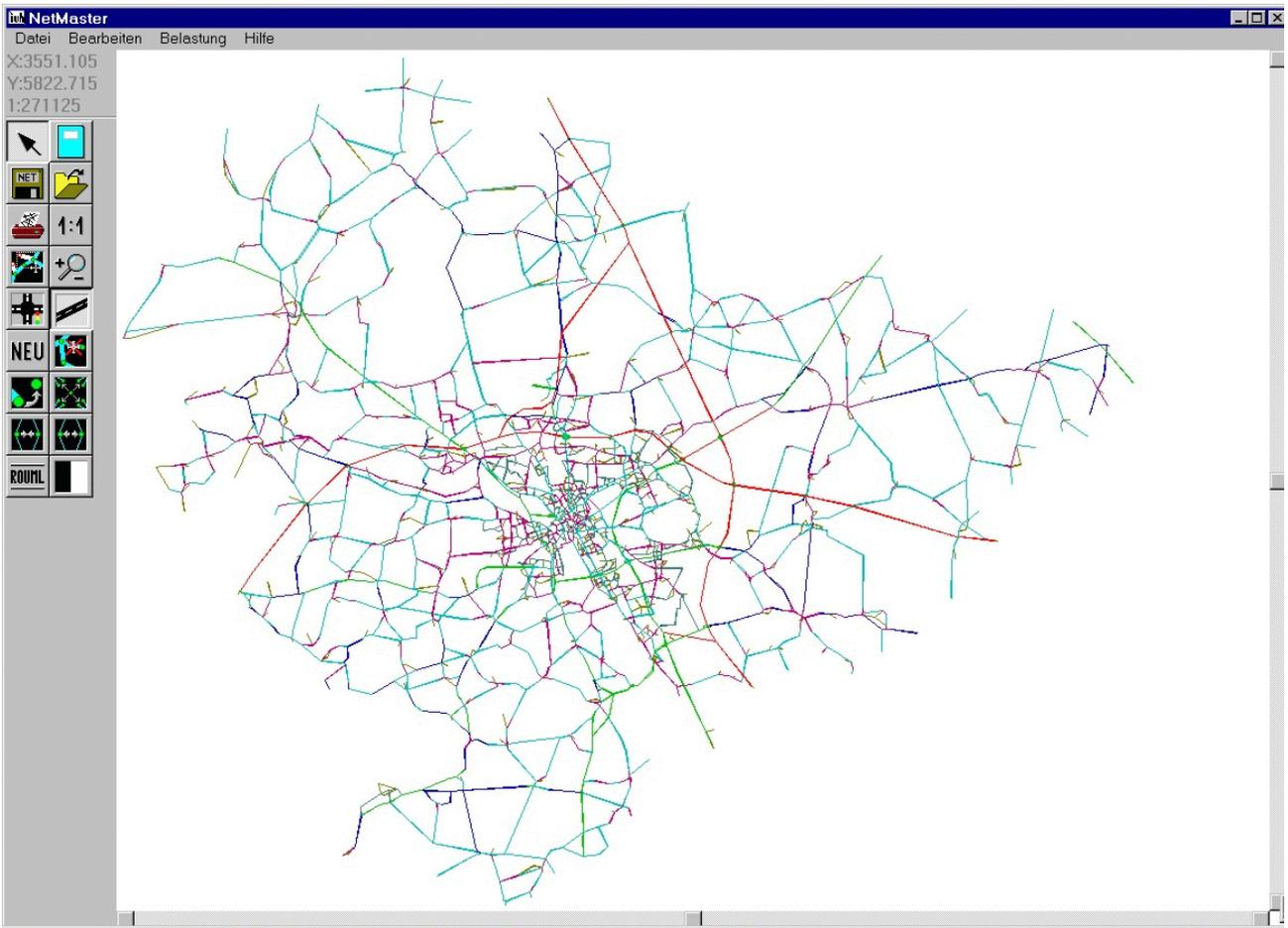


Abb. 30: Benutzeroberfläche des Programms NETMASTER

Strecken	
Standort	
<input type="button" value="Außerorts"/> <input type="button" value="InnerOrts"/>	
Gruppe	
<input type="button" value="1"/> <input type="button" value="2"/> <input type="button" value="3"/>	
<input type="button" value="4"/> <input type="button" value="5"/>	
Ausbaustandart	
<input type="button" value="1"/> <input type="button" value="2"/> <input type="button" value="3"/>	
<input type="button" value="4"/> <input type="button" value="5"/> <input type="button" value="6"/>	
Fahrspuren:	<input type="text" value="1"/>
Typ	<input type="text" value="1111"/>
Länge	<input type="text" value="0"/>
<input type="button" value="Übernehmen"/>	

Knoten	
Knotentypen	
<input type="button" value="Bezirk"/> <input type="button" value="aufg. Kreisel"/>	
<input type="button" value="normal"/> <input type="button" value="aufgelöst/Lsa"/>	
<input type="button" value="Kreisverkehr"/> <input type="button" value="aufg. planfrei"/>	
<input type="button" value="Lsa"/> <input type="button" value="Schein"/>	
<input type="button" value="planfrei"/> <input type="button" value="Bahnüberg."/>	
<input type="button" value="aufgelöst"/> <input type="button" value="Grenzüberg."/>	
Typ:	<input type="text" value="1"/>
Nummer:	<input type="text" value="0"/>
XPOS	<input type="text" value="0"/>
YPOS	<input type="text" value="0"/>
<input type="button" value="Übernehmen"/>	

Die Knoten sowie die Streckenmerkmale können mit dem Programm betrachtet und bearbeitet werden (vgl. Abb. 31 und 32). Eine wichtige Funktion des Programms ist die Bearbeitung von aufgelösten Knotenpunkten. Die Teilknotenpunkte eines aufgelösten Knotenpunktes werden im Netzmodell mit identischen Gauß-Krüger Koordinaten verwaltet. Selbst bei der höchsten Zoomstufe ist es daher nicht möglich, diese zu unterscheiden. Im Programm NETMASTER werden daher die Teilknoten mit identischen Koordinaten in Richtung zu abgehenden Kanten auseinandergerückt (vgl. Abb. 33).

Abb. 31: Streckenmenü

Abb. 32: Knotenmenü

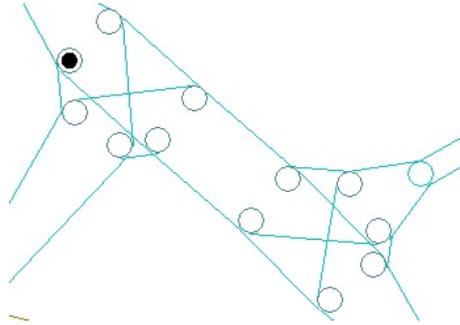


Abb. 33: Darstellung benachbarter aufgelöster Knotenpunkte

Arbeitsunterstützend ist im Programm NETMASTER eine Funktion zur automatischen Auflösung nicht aufgelöster Knotenpunkte implementiert. Das Programm NETMASTER kann als Benutzeroberfläche für das Verkehrsumlegungsmodell ROUML eingesetzt werden, da es möglich ist, aus dem Programm NETMASTER eine Umlegung mit dem Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML zu starten und anschließend die Ergebnisse des Umlegungsprozesses zu betrachten. Trotzdem bleiben die beiden Programme weitgehend unabhängig voneinander. Die objektorientierte Programmstruktur des Programms NETMASTER ist mit seinen verketteten Listen ideal geeignet für eine Routensuche.

Bei der Durchführung von Verkehrsmodellrechnungen für mehrere Fahrtenkategorien für mehrere Stundenzeiträume entstehen sehr viele unterschiedliche Belastungsdateien in denen die Verkehrsstärken für jede einzelne Kante im Netzmodell getrennt nach Fahrtenkategorien abgelegt werden. Das Programm NETMASTER gestattet es beliebig viele Belastungsdateien gleichzeitig zu laden und kann die geladenen Belastungen jeweils alternativ als Beschriftung für jede Kante darstellen (vgl. Abb. 34 und 35).

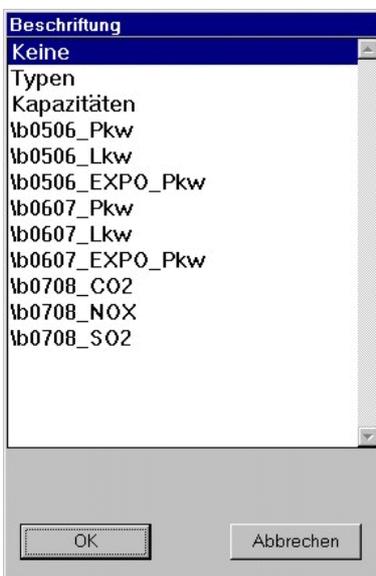


Abb. 34: Beschriftungsmenü

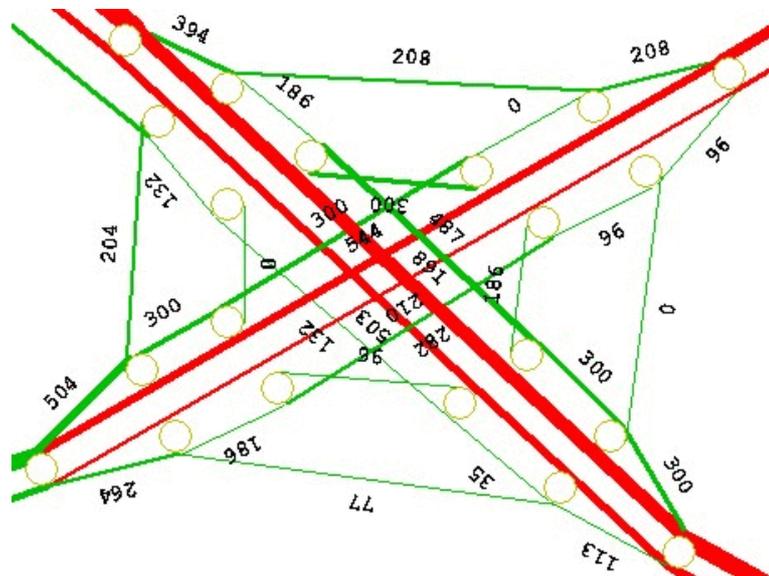


Abb. 35: Verkehrsstärken als Streckenbeschriftungen

Auch die Ergebnisse des Wirkungsmodells STRBEW, wie Abgas- und Lärmemissionen, die einen direkten Bezug zu Kanten des Netzmodells aufweisen, können mit dem Programm NETMASTER betrachtet werden (vgl. Abb. 34).

5.3.3 Umlegungsmodell ROUML

5.3.3.1 Allgemeines

Das Routensuch- und Umlegungsmodells ROUML wurde entwickelt, da es mit den klassischen Verkehrs-umlegungsmodellen (z.B. DIAL-IV [28] oder VISUM [42]) nicht bzw. nur sehr eingeschränkt möglich war, den Verkehrsablauf in der Region Hannover während der EXPO 2000 im Modell abzubilden. Ein besonderer Schwerpunkt der Entwicklung des Routensuch- und Umlegungsmodells ROUML lag auf der Abbildung von Wegweisungen für den weitgehend ortsunkundigen Kraftfahrzeugverkehr im Netzmodell.

5.3.3.2 Fahrtenkategorien

Das Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML erlaubt es,

- den Schwerverkehr,
- den ortskundigen Verkehr mit Personenkraftwagen (Normalverkehr) und
- den ortsunkundigen Verkehr mit Personenkraftwagen (veranstaltungsbedingten Verkehr)

im Umlegungsmodell abzubilden.

Für die Fahrtenkategorie des ortsunkundigen Verkehrs mit Personenkraftwagen ist es möglich, die Streckentypgruppen (vgl. Tab. 22, S. 63) mit unterschiedlichen Attraktivitätsfaktoren zu versehen. Dadurch kann erreicht werden, dass der ortsunkundige Kraftfahrzeugverkehr die Reisezeiten z.B. auf Straßen mit niedriger Verbindungsfunktion anders (höher) einschätzt, als der ortskundige Kraftfahrzeugverkehr.

Für den Schwerverkehr werden im Umlegungsmodell ROUML die Streckentypen von vorne herein auf der Basis von anderen Bemessungsgeschwindigkeiten V_B bewertet. Besonders deutlich sind die Unterschiede zwischen den Bemessungsgeschwindigkeiten V_B auf den Bundesautobahnen und auf den innerörtlichen Straßen (vgl. Tab. 22, S. 63).

Die Reihenfolge der Umlegung der einzelnen Teilmatrizen ist im Modell ROUML generell von Bedeutung. Das Netzmodell wird im Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML sukzessiv gefüllt. Die Abschätzung der Reisezeiten im Netzmodell erfolgt jeweils auf der Basis aller schon auf das Netzmodell umgelegten Fahrtenmatrizen. Die gegenseitige Beeinflussung der unterschiedlichen Fahrtenkategorien, wie sie in der Realität stattfindet, stand bei der Entwicklung des Umlegungsmodells im Vordergrund.

5.3.3.3 Umlegungsverfahren

Mit dem Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML kann die Umlegung getrennt für jede Fahrtenkategorie mit den drei folgenden Verfahren erfolgen:

- dem **Bestwegverfahren** (Alles-oder-Nichts),
- dem **Sukzessivverfahren** (z.B. 40%, 30%, 30%) und
- dem **Gleichgewichtsverfahren**

Zur realitätsnäheren Einschätzung der Reisezeiten im unbelasteten Netzmodell kann eine Vorbelastung definiert werden. Die Vorbelastung beeinflusst die Ergebnisqualität bei höheren Vorbelastungen wesentlich. Je realistischer die Vorbelastung ist, desto höher ist die Ergebnisqualität (Sukzessivverfahren). Im Gleichgewichtsverfahren führt die Vorbelastung zu einer leichten Verringerungen der Laufzeit des Umlegungsprozesses (<10%) und zu einer Verringerung der notwendigen Iterationen zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes. Eine zu hohe Vorbelastung senkt das Geschwindigkeitsniveau in unrealistischer Weise ab. Für die

nachmittägliche Spitzenstunde in der Stadt Hannover hat sich eine durchschnittliche Vorbelastung von etwa 40% der Bemessungsverkehrsstärke bewährt. Für Schwachverkehrszeiten sollten geringere Vorbelastungen gewählt werden.

Bei der Verwendung des **Bestwegverfahrens** wird der Routensuchalgorithmus von DIJKSTRA [11] verwendet (vgl. Abb. 36).

Bei den **Sukzessivverfahren** kann zwischen einem der drei folgenden Routensuchalgorithmen gewählt werden:

- Routensuche mit dem **Bestwegverfahren** von DIJKSTRA [11],
- Routensuche mit einem **heuristischen Suchverfahren mit fixer Heuristikfunktion** und
- Routensuche mit einem **heuristischen Suchverfahren mit adaptiver Heuristikfunktion**.

Bewährt haben sich für das Sukzessivverfahren prozentuale Aufteilungen wie:

- 3 Iterationen zu 40/30/30 Prozent
- 4 Iterationen zu 40/30/20/10 Prozent
- 5 Iterationen zu 35/25/15/15/10 Prozent

Beim **Gleichgewichtsverfahren** handelt es sich nicht um ein Sukzessivverfahren, obwohl auch dieses ein iteratives Verfahren darstellt. Es liegt allerdings nach jedem Iterationsschritt eine Umlegung der kompletten Fahrtenmatrix F_{ij} vor. Die Grundidee des Verfahrens ist es, die in der vorherigen Iteration ermittelten Belastungen für alle Kanten zu verwenden, um in der neuen Iteration neue noch realistischere kürzeste Wege zu ermitteln. Anhand dieser neuen kürzesten Wege wird erneut die gesamte F_{ij} -Matrix umgelegt und danach mit Hilfe von bestimmten Gewichten eine neue Belastung für jede Kante aus den beiden berechneten Belastungen ermittelt. Es müssen also für jede Kante zwei Felder für Belastungen vorgesehen sein; in dem einen Feld steht die aus den bisherigen k Iterationsschritten mit Hilfe der Gewichte kumulierte Belastung $\mathbf{bel}_{\text{kum}}^{(k)}(\mathbf{e}_i)$, in dem anderen die im $(k+1)$ - Iterationsschritt ermittelte Belastung $\mathbf{bel}_{\text{neu}}^{(k+1)}(\mathbf{e}_i)$. Wenn die beiden Gewichte $\alpha(k)$ und $\beta(k)$ sich zu 1 addieren, so ergibt sich für den nächsten Iterationsschritt die kumulierte Belastung zu

$$\mathbf{bel}_{\text{kum}}^{(k+1)}(\mathbf{e}_i) = \alpha^k \cdot \mathbf{bel}_{\text{kum}}^{(k)}(\mathbf{e}_i) + \beta^k \cdot \mathbf{bel}_{\text{neu}}^{(k+1)}(\mathbf{e}_i)$$

für jede Kante \mathbf{e}_i und man erhält erneut eine komplette Umlegung der Matrix F_{ij} . Als Konvergenzkriterium verwendet man die durchschnittliche Varianz der Belastungen über alle Kanten, d. h. man berechnet nach jedem Iterationsschritt:

$$\text{var}^k = \frac{1}{|\mathbf{E}| - 1} \sum_{i=1}^{|\mathbf{E}|} (\mathbf{bel}_{\text{kum}}^{(k+1)}(\mathbf{e}_i) - \mathbf{bel}_{\text{kum}}^{(k)}(\mathbf{e}_i))^2$$

Ist dieser Wert unterhalb einer bestimmten Toleranzgrenze, so wird das Verfahren abgebrochen, da nur noch kleinere Schwankungen in den berechneten Belastungen zu erwarten sind. Um eine kontinuierliche Abnahme von $\text{var}(k)$ für zunehmende k zu erreichen und um damit dem Effekt vorzubeugen, dass in jedem Iterationsschritt Fahrten nur von einer Route auf eine andere hin und her umgelegt werden, sollten die Parameter so gewählt werden, dass $\alpha(k)$ für zunehmendes k gegen 1 konvergiert (und somit wegen $\beta(k) = 1 - \alpha(k)$ der Wert von $\beta(k)$ gegen 0 strebt). Zusätzlich wird auch die maximale Abweichung zwischen zwei Iterationsschritten auf einer einzelnen Kante als Schranke für den Programmabbruch definiert.

Dieses Verfahren ähnelt dem aus dem Programm DIAL-IV [10][28] bekannten Ansatz, allerdings wird im Programm ROUML in jedem Iterationsschritt eine Bestwegumlegung durchgeführt. Die Verwendung von

Alternativrouten und die Aufteilung auf Alternativrouten geschieht dabei durch die Iterationen, nicht während einer Iteration. Da das Gleichgewichtsverfahren in der Regel mehr als 10 Iterationen durchführt, ist eine ausreichende Aufteilung auf Alternativrouten sichergestellt.

Die Laufzeit des Gleichgewichtsverfahrens ist im Gegensatz zum Sukzessivverfahren abhängig von der Auslastung des Netzmodells. Die höchsten Laufzeiten und Iterationszahlen ergeben sich im Bereich der höchsten Netzauslastung während der hochbelasteten Spitzenstunden. Eine längere Laufzeit ist nicht unbedingt ein Nachteil. Sie deutet daraufhin, dass das Gleichgewichtsverfahren echte Arbeit verrichtet, d.h. tatsächlich Verkehr zwischen verschiedenen Routen umverteilt und nicht nur annähernd eine Bestwegumlegung durchführt.

Klassische Bestwagsuche

Mit dem Algorithmus von DIJKSTRA [11] werden alle kürzesten Wege von einer Quelle zu allen Zielen (Single-Source-Shortest-Path) unter Berücksichtigung aller möglicher Knoten, wie in Abbildung 36 dargestellt, ermittelt (Pseudo-Code)

```

dijkstra(G,s,w):
  for all nodes v do
    distance(v) = ∞;
    previous(v) = NIL;
    insert(v,pq,distance(v));
  endfor
  distance(s)=0;
  while(not empty(pq)) do
    v = deletemin(pq);
    for all edges e starting at v do
      u=end_node(e);
      cost =distance(v) + w(e);
      if (cost < distance(u)) then
        distance (u) = cost;
        previous (u) = v;
        set_priority(u,pq,cost);
      endif;
    endfor;
  endwhile;
end dijkstra;

```

Abb. 36: Algorithmus zur Ermittlung der besten Wege von einer Quelle zu allen Zielen nach DIJKSTRA [11]

Der Algorithmus von DIJKSTRA ist ein Baumalgorithmus.

Bei den durchgeführten Teilumlegungen für die relativ dünn besetzten Fahrtenmatrizen für den veranstaltungsbedingten Verkehr mit dem Gleichgewichtsverfahren fiel auf, dass die Umlegung fast genau so viel Zeit in Anspruch nahm, wie die Umlegung der dicht besetzten Fahrtenmatrizen für den werktäglichen Verkehr mit Personenkraftwagen. Eine Überprüfung des im Modell ROUML im Gleichgewichtsverfahren verwendeten Algorithmus nach DIJKSTRA zeigte, dass die Routensuche von jeder Quelle zu allen Zielen auch dann durchgeführt wurden, wenn von der Quelle kein Verkehr auf das Netzmodell umzulegen gewesen ist.

Eine einfache Überprüfung, ob von der betrachteten Quelle überhaupt Verkehr auf das Netzmodell umzulegen ist, brachte für den Spezialfall der dünn besetzten Matrizen teilweise eine Beschleunigung des Routensuch- und Umlegungsprozesses von mehr als 400%. Interessant dabei war allerdings, dass die im Modell für das Gleichgewichtsverfahren realisierte Routensuche nach DIJKSTRA von einer Quelle zu allen Zielen sich nicht beschleunigen lässt, wenn eine Spalte einer an sich dünn besetzten Matrix dicht besetzt ist, da bei der Verwendung des Algorithmus von DIJKSTRA von einer Quelle auf jeden Fall der kompletten Routenbaum zu allen Zielen aufzubauen ist. Die im Modell ROUML für den Spezialfall der dünn besetzten Matrizen derzeit realisierte Beschleunigung des Umlegungsprozesses wirkt sich also nur dann positiv aus, wenn von einer Quelle kein Verkehr auf das Netzmodell umzulegen ist.

Prinzipiell kann die Routensuche natürlich auch von einem Ziel zu allen Quellen erfolgen. Der Routensuche und Umlegung für dünn besetzte Fahrtenmatrizen mit dem Gleichgewichtsverfahren sollte also eine Analyse der Fahrtenmatrizen vorausgehen. Wenn die Anzahl der Quellen, von denen kein Verkehr ausgeht, höher ist als die Anzahl der Ziele, zu denen keine Fahrten stattfinden, sollte eine Routensuche von jeweils einer Quelle zu allen Zielen erfolgen. Ist die Anzahl der Quellen, von denen kein Verkehr ausgeht, jedoch geringer als die Anzahl der Ziele, zu denen keine Fahrten stattfinden, sollte eine Routensuche von jeweils einem Ziel zu allen Quellen erfolgen. Derzeit ist das beschriebene Verfahren noch nicht im Umlegungsmodell realisiert.

Heuristische Routensuchverfahren

Eine heuristische Funktion (oder kurz *Heuristik*) h für einen gewichteten Graphen $G(V,w)$ ist eine Abbildung

$$h: V \times V \rightarrow R$$

Die anschauliche Bedeutung des Wertes $h(v_i, v_j)$ ist eine Abschätzung für den Abstand der Knoten v_i und v_j im Graphen G bezüglich der Gewichtsfunktion w , d.h. für $d(v_i, v_j)$. Eine *zulässige Heuristik* h ist eine Heuristik, die der Bedingung

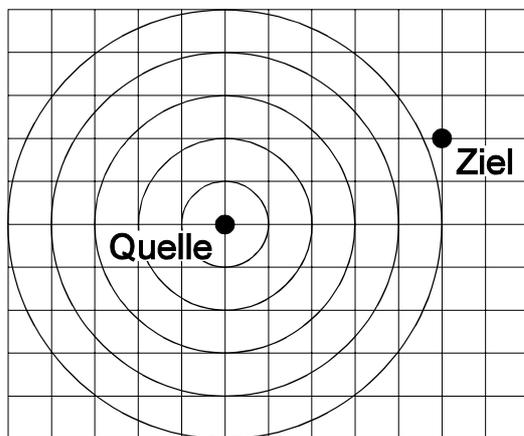
$$h(v_i, v_j) \leq d(v_i, v_j) \quad \forall v_i, v_j \in V$$

genügt, d.h. die den Widerstand zwischen zwei Knoten mit Sicherheit unterschätzt [30].

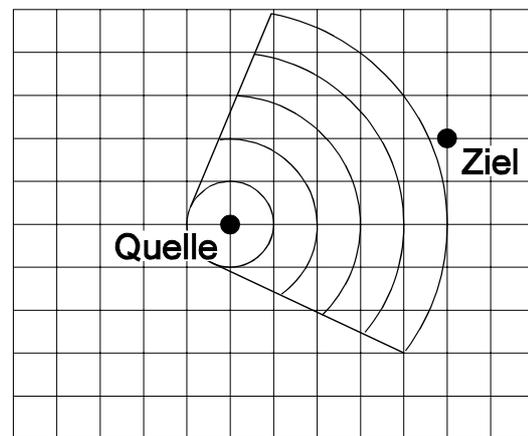
Das Verfahren der Routensuche mit fixer Heuristik verwendet in der Heuristikfunktion zunächst die Luftlinienentfernungen zwischen den betrachteten Knoten. Die Entfernung wird dann unter der Annahme einer hohen Geschwindigkeit in einen zeitlichen Widerstand umgerechnet. Diese Heuristik ist zulässig, da es keinen Weg zwischen zwei Knoten gibt, der kürzer ist als die Luftlinienentfernung. Es muss allerdings sichergestellt werden, dass die geschätzte Geschwindigkeit so hoch ist, dass alle Verkehrsteilnehmer tatsächlich längere Zeit zum Erreichen des Zieles brauchen, als mit der Heuristikfunktion ermittelt wird. Diese Heuristik hat den Vorteil, dass sie stets sehr schnell berechnet werden kann, wenn eine heuristische Abschätzung erforderlich ist.

Das Routensuchverfahren mit adaptiver Heuristik berechnet zu Beginn jeder sukzessiven Teilumlegung der Fahrtenmatrix mit Hilfe des Bestwegverfahrens von DIJKSTRA den kürzesten Weg zum betrachteten Ziel und verwendet die Länge des ermittelten Weges als Heuristik. Da die Abschätzung der Reisezeiten im Modell vor

der Umlegung des Sukzessivanteiles erfolgt, verwendet auch dieses Verfahren eine zulässige Heuristik, da sich die Reisezeiten im belasteten Zustand garantiert erhöhen. Diese Heuristik beeinflusst die Rechenzeit nur vor dem Beginn des Umlegungsprozesses. Das Verfahren ist jedoch nur daher überhaupt sinnvoll, da in diesem Verfahren die Umlegung des Verkehrs durch sukzessives Umlegen von Elementen der Fahrtenmatrix erfolgt. Die Umlegung einer Fahrtbeziehung der Matrix erhöht dabei den Widerstand für die nächste umzulegende Fahrtbeziehung. Die Reihenfolge der Umlegung der einzelnen Fahrtbeziehungen hat somit einen Einfluss auf das Endergebnis. In diesem Verfahren werden deutlich schneller als in reihenfolgenunabhängigen Verfahren realistische Wege gewählt, da sich die Auffüllung des Netzes und die damit verbundene Widerstandserhöhung nicht in großen Sukzessivstufen, sondern in sehr viel kleineren Teilstufen erhöht. Zur Verminderung des Einflusses der Reihenfolgenabhängigkeit sind mit diesem Verfahren sehr viel mehr Iterationsstufen mit unterschiedlichen Startpositionen erforderlich. In Verkehrsumlegungsmodellen finden nur selten reihenfolgenabhängige Verfahren Berücksichtigung, da schwer abzuschätzen ist, ab wie vielen Iterationsstufen mit unterschiedliche Startpositionen die Reihenfolgenabhängigkeit vernachlässigbar gering ist. Das Routensuchverfahren mit adaptiver Heuristik hat außerdem den Nachteil, dass es ein Matrixverfahren ist, für das im Vergleich zu einem Baumverfahren ein enorm hoher Speicherplatz erforderlich ist.



**klassische
Bestwegsuche**



**heuristische
Bestwegsuche**

Abb. 37: Prinzipiskenen der klassischen und heuristischen Bestwegsuche

Mit einem heuristischen Routensuchverfahren werden deutlich weniger Netzknoten untersucht als mit den klassischen Bestwegverfahren (vgl. Abb. 37). Je besser die heuristische Funktion ist, desto weniger Knoten müssen untersucht werden. Bei komplexen Heuristikfunktionen steigt jedoch auch die erforderliche Rechenzeit zum Berechnen des Heuristikwertes für einen Knoten.

Die heuristischen Suchverfahren bieten hinsichtlich der Laufzeit für die Routensuche und Umlegung nur dann erhebliche Vorteile, wenn die Fahrtenmatrizen sehr dünn besetzt sind. Gerade für die Routensuche und Umlegung für veranstaltungsbedingten Verkehr mit nur einer geringen Anzahl von Zielen bzw. Quellen kann die Routensuche mit dem heuristischen Verfahren Vorteile aufweisen. Für eine optimale Beschleunigung des Routensuch- und Umlegungsprozesses scheint eine Analyse der Fahrtenmatrix hinsichtlich der am besten einzusetzenden Umlegungsmethodik sinnvoll. Die besten Laufzeitergebnisse wird eine Kombination der heuristischen Routensuchverfahren mit den klassischen Bestwegverfahren z. B. nach DIJKSTRA liefern. Kombinierte Routensuchverfahren, die die Vorteile der heuristischen Routensuchverfahren (Single-Pair-Shortest-Path) und der klassischen Routensuchverfahren (Single-Source-Shortest-Path), die jeweils von einer

Quelle ausgehend alle möglichen Ziele suchen, miteinander verbinden, werden bisher nicht verwendet. Diese Arbeit hat jedoch gezeigt, dass sich bei dem gezielten Einsatz des jeweils am besten geeigneten Routensuchverfahrens in erheblichem Umfang Rechenzeit einsparen lässt.

5.3.3.4 Wegweisung

Mit makroskopischen statischen Umlegungsmodellen z.B. DIAL-IV[28] oder VISUM [42] ist es nicht bzw. nur sehr eingeschränkt möglich, Wegweisung für unterschiedliche Fahrzeugkategorien realitätsnah und für den Nutzer der Modelle transparent vorzunehmen. Das Verkehrsumlegungsmodell VISUM gestattet es zwar für alle Kanten für unterschiedliche Fahrtenkategorien (Verkehrssysteme) unterschiedliche Widerstandsfunktionen vorzugeben oder einzelne Netzkanten für unterschiedliche Fahrzeugkategorien (Verkehrssysteme) zu sperren, jedoch ist die damit potentiell mögliche Steuerung von Verkehrsströmen durch Erhöhung von Widerständen einzelner Kanten im Netzmodell für einzelne Fahrzeugkategorien dann mit dem Netzmodell gekoppelt. Zum Auffinden einer mit dem Netzmodell gekoppelten Wegweisung wäre es im Netzmodell von VISUM erforderlich, die einzelnen Kanten zu untersuchen. Für einen Wechsel der Wegweisung wäre es im Umlegungsmodell VISUM erforderlich, das Netzmodell auszutauschen. Dies ist zwar prinzipiell möglich, erscheint jedoch hinsichtlich der praktischen Handhabbarkeit z.B. zum Abbilden einer dynamischen Wechselwegweisung oder eines dynamischen Verkehrsleitsystems z.B. zu P+R-Plätzen sehr umständlich, da enorm viele mögliche Schaltzustände abzubilden wären.

Die Wegweisung erfolgt im Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML nach dem Prinzip der negativen Wegweisung. Einzelne Streckenabschnitte werden dabei während der Teilumlegung einer Fahrtenmatrix für die Kategorie des ortsunkundigen Kraftfahrzeugverkehrs mit Reisezeitzuschlägen versehen. Die Netzkanten, die im Umlegungsmodell mit Reisezeitzuschlägen versehen werden, werden jedoch nicht unmittelbar mit dem Netzmodell gekoppelt, sondern werden dem Umlegungsmodell ROUML bei der Umlegung einer Teilmatrix direkt mit der Verkehrsmatrix, für die die Wegweisung gelten soll, zur Verfügung gestellt. Von der so für eine Fahrtenmatrix anzugebenden negativen Wegweisung bleiben alle anderen Teilumlegungen unbeeinflusst. Diese Methode Wegweisung ermöglicht es auch, den Befolgungsgrad der Wegweisung durch eine Erhöhung oder Verringerung des Reisezeitzuschlages zu variieren. Gleichzeitig bleibt die Möglichkeit bestehen, die eigentlich gesperrte Kante zu nutzen, sollte es die Verkehrssituation erfordern. Im Unterschied zum Modul DYNEMO in VISUM [41][42] werden im Modell ROUML an den Entscheidungspunkten keine Routen bis zum Ziel vorgegeben, sondern die Routenwahl bleibt prinzipiell bis auf die Strecken mit den Reisezeitzuschlägen frei. Für die Abbildung der Verkehrslenkungsstrategie während der EXPO 2000 im Großraum Hannover (vgl. Abb. 3 und 4, S. 5) wurden bei der Wegweisung für die einzelnen Teilumlegungen des ortsunkundigen Kraftfahrzeugeverkehrs in der Region Hannover zwischen 0 und 6 Netzmodellkanten mit einem Reisezeitzuschlag belegt.

5.3.3.5 Wartezeiten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage

Für die Berechnung der Wartezeiten an Knotenpunkten müssen die Stromtypen hinsichtlich ihres Ranges im Netzmodell eindeutig zuzuordnen sein (vgl. Abb. 38).

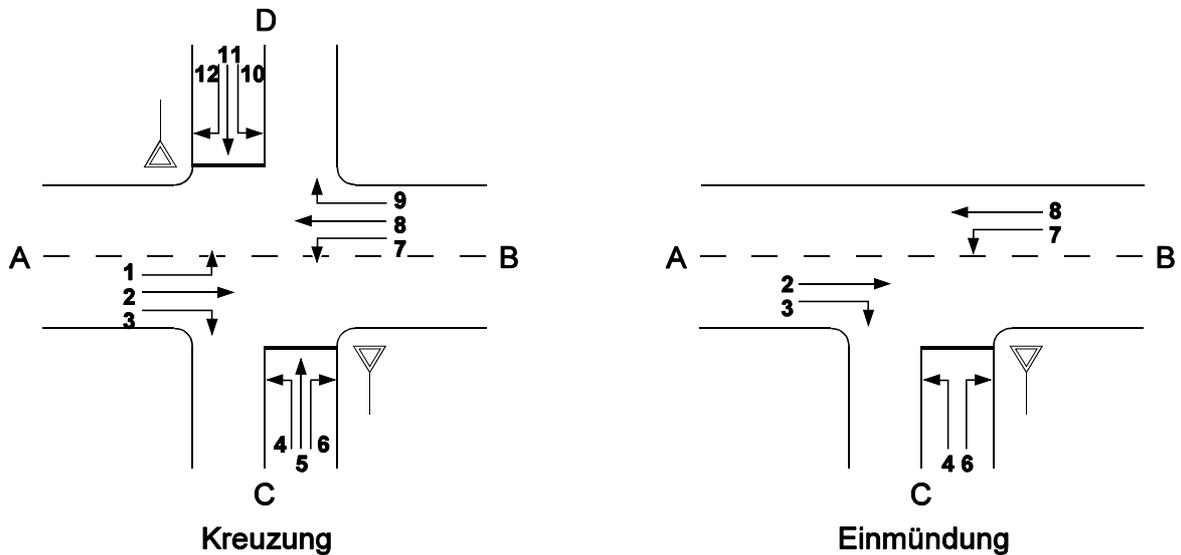


Abb. 38: Stromnummerierung für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage

Die Wartezeiten an Kreuzungen und Einmündungen ohne Lichtsignalanlage werden in Anlehnung an das Handbuch zur Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS [6]) ermittelt. Für jeden Knotenpunkt an dem die Wartezeiten ermittelt werden sollen, sind die einzelnen Knotenströme in der Stromdatei „strom.dat“ zu kodieren. Das angewendete Verfahren zur Ermittlung und Bewertung der Wartezeiten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen ist in Anlehnung an das HBS [6] wie folgt gegliedert:

Schritt 1: Ermittlung der Bemessungsverkehrsstärke q_i für alle Ströme i . Im Modell ROUML erfolgt die Ermittlung der Bemessungsverkehrsstärke auf der Basis der unterschiedenen Fahrzeugkategorien (vgl. Tab. 24).

Kraftfahrzeugart	Krafträder	Personen- kraftwagen	Lastkraft- wagen	Lastzüge	Kraftfahrzeuge
Umrechnungsfaktor	0,5	1	1,5	2	1,1

Tab. 24: Faktoren für die Umrechnung der Verkehrsstärken der Nebenströme in Pkw-Einheiten (für Knotenpunkte mit einer Längsneigung von $s=0\%$)

Schritt 2: Bestimmung der maßgebenden Hauptstrombelastungen $q_{p,i}$ für jeden wartepflichtigen Nebenstrom i (Die Indizes und Stromnummern beziehen sich auf Stromnummern in der Abbildung 38).

Nebenstrom	Stromnummer (vgl. Abb. 38)	maßgebende Hauptstrombelastung q_p [Kfz/h]
Linksabbieger von der Hauptstraße	7	$q_2 + q_3^{3)}$
Rechtseinbieger aus der Nebenstraße	6	$q_2^{2)}) + 0,5 * q_3^{1)}$
Linkseinbieger aus der Nebenstraße	4	$q_2 + 0,5 * q_3^{1)}) + q_8 + q_7$

Tab. 25: Ermittlung der maßgebenden Hauptstrombelastungen q_p für Einmündungen

- mit
- 1) Steht für Strom 3 ein eigener Fahrstreifen zur Verfügung entfällt q_3
 - 2) Stehen für Strom 2 mehrere Fahrstreifen zur Verfügung, ist die Verkehrsstärke auf dem rechten Fahrstreifen für q_2 .
 - 3) Wird der Strom 3 durch eine Dreiecksinsel mit anschließender vorfahrtrechtlicher Unterordnung abgetrennt, so entfällt q_3 .

Nebenstrom	Stromnummer (vgl. Abb. 38)	maßgebende Hauptstrombelastung q_p [Kfz/h]
Linksabbieger von der Hauptstraße	1 7	$q_8 + q_9^{3)}$ $q_2 + q_3^{3)}$
Rechtseinbieger aus der Nebenstraße	6 12	$q_2^{2)}) + 0,5 * q_3^{1)}$ $q_8^{2)}) + 0,5 * q_9^{1)}$
Kreuzende aus der Nebenstraße	5 11	$q_2 + 0,5 * q_3^{1)}) + q_8 + q_9^{3)}) + q_1 + q_7$ $q_8 + 0,5 * q_9^{1)}) + q_2 + q_3^{3)}) + q_1 + q_7$
Linkseinbieger aus der Nebenstraße	4 10	$q_2 + 0,5 * q_3^{1)}) + q_8 + 0,5 * q_9^{1)}) + q_1 + q_7 + q_{12}^{3)}) + q_{11}^{4)}$ $q_8 + 0,5 * q_9^{1)}) + q_2 + 0,5 * q_3^{1)}) + q_1 + q_7 + q_6^{3)}) + q_5^{4)}$

Tab. 26: Ermittlung der maßgebenden Hauptstrombelastungen q_p für Kreuzungen

- mit
- 1) Steht für Strom 3 bzw. 9 ein eigener Fahrstreifen zur Verfügung, entfällt q_3 bzw. q_9
 - 2) Stehen für Strom 2 bzw. 8 mehrere Fahrstreifen zur Verfügung, ist die Verkehrsstärke auf dem rechten Fahrstreifen für q_2 bzw. q_8 anzusetzen.
 - 3) Wird der Strom 3, 9, 6 oder 12 durch eine Dreiecksinsel mit anschließender vorfahrtrechtlicher Unterordnung abgetrennt, entfällt q_3 , q_9 , q_6 , q_{12} .
 - 4) Haben die jeweils entgegenkommenden Ströme 11 und 12 bzw. 5 und 6 ein Zeichen 206 StVO (Halt! Vorfahrt gewähren!), entfallen q_{11} und q_{12} , bzw. q_5 und q_6 .

Schritt 3: Berechnung der Grundkapazitäten G_i

Die Grundkapazitäten werden im Modell ROUML wie folgt ermittelt [37]:

$$\begin{array}{ll} \text{Grundkapazität für Linksabbieger (Strom 1 und 7)} & \\ G_{1,7} = 1440 \cdot e^{(-0.0012 \cdot qh)} & \text{[Pkw-E/h]} \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Grundkapazität für Rechtseinbieger (Strom 6 und 12)} & \\ G_{6,12} = 1160 \cdot e^{(-0.0012 \cdot qh)} & \text{[Pkw-E/h]} \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Grundkapazität für Kreuzer (Strom 5 und 11)} & \\ G_{5,11} = 900 \cdot e^{(-0.0012 \cdot qh)} & \text{[Pkw-E/h]} \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Grundkapazität für Linkseinbieger (Strom 4 und 10)} & \\ G_{4,10} = 900 \cdot e^{(-0.0012 \cdot qh)} & \text{[Pkw-E/h]} \end{array}$$

$$\text{mit } qh = \text{maßgebender Hauptstrom} \quad \text{[Kfz/h]}$$

Schritt 4: Berechnung der maximalen Kapazitäten

Für die Ströme zweiten Ranges ($r=2$) ist die maximale Verkehrsstärke oder tatsächliche Kapazität C_i gleich der Grundkapazität.

$$C_i = G_i \quad \text{[Pkw-E/h]}$$

$$\begin{array}{ll} \text{mit } i = 1, 7, 6, 12 & \text{[-]} \\ C_i = \text{Kapazität des Stromes } i & \text{[Pkw-E/h]} \\ G_i = \text{Grundkapazität des Stromes } i & \text{[Pkw-E/h]} \end{array}$$

Für die Ströme zweiten Ranges gilt:

$$p_{0,i} = 1 - a_i = 1 - q_i / C_i \quad \text{wenn } p_{0,i} < 0 \text{ dann gilt } p_{0,i} = 0 \quad \text{[-]}$$

$$\begin{array}{ll} \text{mit } i = 1, 7, 6, 12 & \text{[-]} \\ p_{0,i} = \text{Wahrscheinlichkeit des staufreien Raumes der Ströme } i & \text{[-]} \\ a_i = q_i / C_i = \text{Auslastungsgrad des Nebenstromes} & \text{[-]} \\ q_i = \text{vorhandene Verkehrsstärke des Nebenstromes} & \text{[Pkw-E]} \\ C_i = \text{Kapazität des Stromes } i & \text{[Pkw-E]} \end{array}$$

$$p_{0,i^*} = (1 - (a_i + a_j + a_k)) = \text{Wahrscheinlichkeit des staufreien Zustandes in dem Mischstrom auf der Hauptstraße} \quad \text{[-]}$$

$$\begin{array}{ll} \text{mit } a_i, a_j, a_k = \text{Auslastungsgrad des Stromes } i, j, k & \text{[-]} \\ i = 1 \text{ bzw. } 7 & \text{[-]} \\ j = 2 \text{ bzw. } 8 & \text{[-]} \\ k = 3 \text{ bzw. } 9 & \text{[-]} \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} p_x = p_{0,1} \cdot p_{0,7} & \text{[-]} \\ p_x = \text{Wahrscheinlichkeit des staufreien Zustandes in den in den Strömen 1 und 7} & \text{[-]} \end{array}$$

Für die Ströme dritten Ranges (also für die Ströme 5 und 11) gilt :

$$C_i = p_x * G_i \quad [\text{Pkw-E}]$$

mit $i = 5$ und 11 [-]

$$p_{z,i} = \frac{1}{1 + \frac{1-p_x}{p_x} + \frac{1-p_{0,i}}{p_{0,i}}}$$

mit $i = 5$ und 11 [-]

$p_{0,i}$ = Wahrscheinlichkeit des staufreien Zustandes im Strom i [-]

p_x = Wahrscheinlichkeit des staufreien Zustandes in den in den Strömen 1 und 7 [-]

Für die Ströme vierten Ranges (also für die Ströme 4 und 10) gilt :

$$C_4 = p_{z,11} * p_{0,12} * G_4 \quad [\text{Pkw-E}]$$

$$C_{10} = p_{z,5} * p_{0,6} * G_{10} \quad [\text{Pkw-E}]$$

Hinweis: Die zweigeteilte Vorfahrt an Kreuzungen und Einmündungen kann derzeit im Modell ROUML noch nicht berücksichtigt werden. Hier ist noch weitere Entwicklungsarbeit erforderlich.

Ströme auf Mischfahrstreifen

Wenn mehrere Verkehrsströme der Nebenstraße im unmittelbaren Knotenbereich denselben Fahrstreifen benutzen, wird dieser als Mischstreifen bezeichnet. Auf einem Mischstreifen behindern sich die Fahrzeuge unterschiedlicher Teilströme gegenseitig. Wenn die Kraftfahrzeuge in den Nebenzufahrten nur hintereinander in den Knotenpunkt einfahren können wird die gemeinsame Kapazität C_m der Ströme auf dem Mischfahrstreifen wie folgt berechnet:

$$C_m = \min \left\{ \frac{\sum q_i}{\sum a_i}, 1800 \right\}$$

mit $i = 4,5,6$ und $10, 11, 12$ [-]

$m = 4+5,5+6,4+6,4+5+6,10+11,11+12,10+12$ oder $10+11+12$ [-]

C_m = Kapazität des Mischstromes m [Pkw-E]

a_i = Auslastungsgrad des Nebenstromes i [-]

q_i = vorhandene Verkehrsstärke des Nebenstromes i [Pkw-E]

Hinweis: Die Kapazität von Mischströmen ist sehr komplex und hängt von vielen Parametern ab. Derzeit wird im Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML nur diese Gleichung verwendet, um die Kapazität von Mischströmen abzuschätzen.

Schritt 5: Berechnung der vorhandenen Belastungsreserven für alle Nebenströme R_i und R_m

$$R_i = C_i - q_i \quad [\text{Pkw-E}]$$

mit R_i = Reserve des Stromes i [Pkw-E]

C_i = Kapazität des Mischstromes i [Pkw-E]

q_i = vorhandene Verkehrsstärke des Nebenstromes i [Pkw-E]

Schritt 6: Bestimmung der mittleren Wartezeiten w_i in Abhängigkeit von der Belastungsreserve R_i und der Kapazität C_i (nach Kimber, Holis 1979) (vgl. Abb. 39).

mittlere Wartezeit [s]

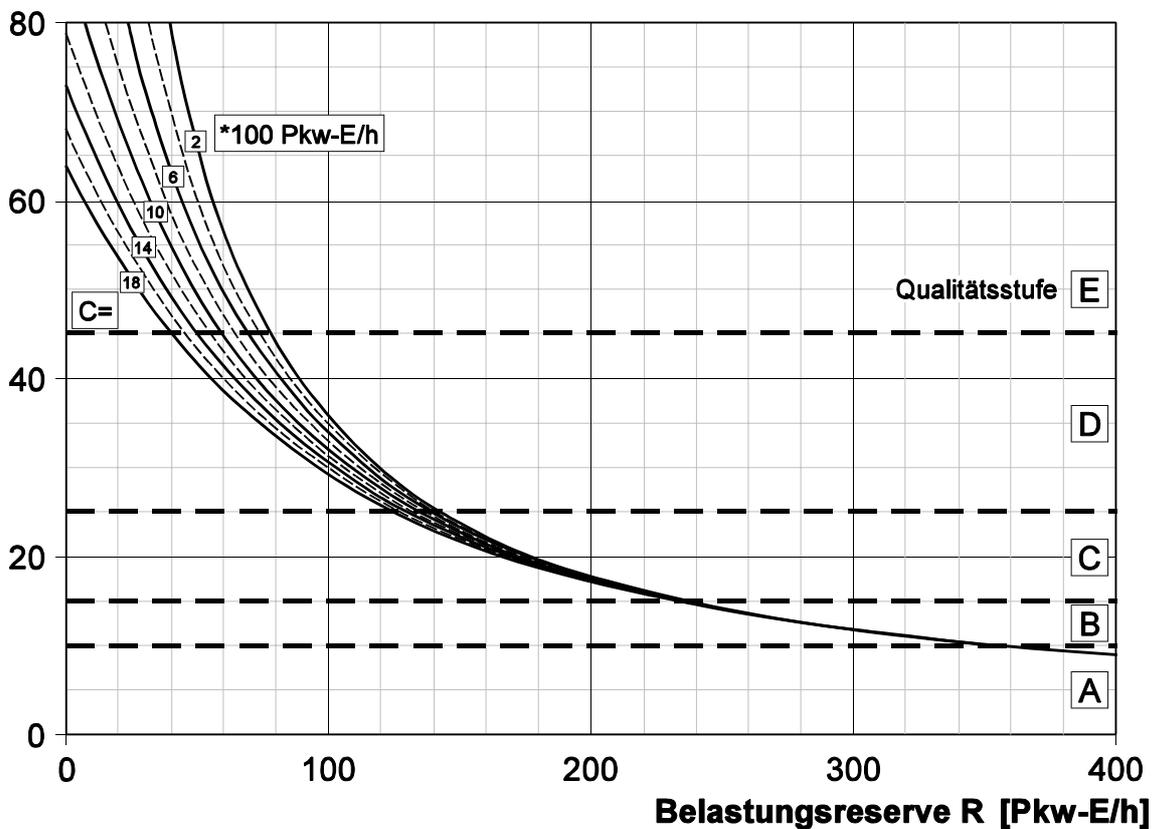


Abb. 39: Mittlere Wartezeit in Abhängigkeit von der Belastungsreserve R und der Kapazität C (nach Kimber, Holis 1979)

5.3.3.6 Wartezeiten an Knotenpunkten mit Kreisverkehrsplätzen

Die Berechnung der Wartezeiten an Knotenpunkten mit Kreisverkehrsplätzen erfolgt prinzipiell nach der gleichen Vorgehensweise wie die Berechnung der Wartezeiten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen. Es werden zunächst die Kraftfahrzeugstärken in Pkw-Einheiten umgerechnet (vgl. Tab. 24). Die Kodierung von Kreisverkehrsplätzen im Netzmodell erfolgt analog zu den Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen. Die Ermittlung der Wartezeiten erfolgt aus der zu ermittelnden Belastungsreserve R jeder Knotenpunktzufahrt.

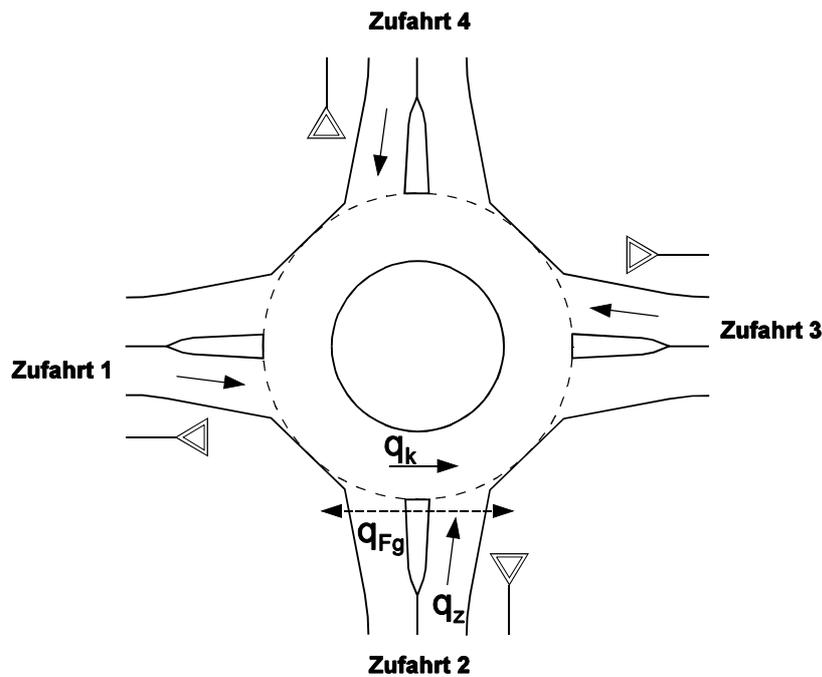


Abb. 40: Maßgebende Ströme an Kreisverkehrsplätzen

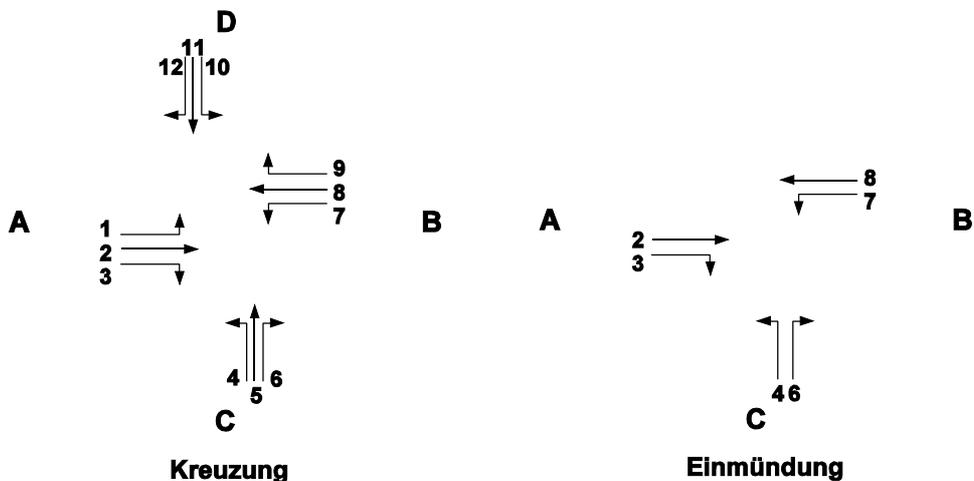


Abb. 41: Stromnummern im Modell an drei- und vierarmigen Kreisverkehrsplätzen

Die für die Ermittlung der Belastungsreserve maßgebenden Ströme ergeben sich an einem vierarmigen Kreisverkehrsplatz in der Knotenpunktzufahrt wie folgt (vgl. Abb. 40 und 41):

Knotenpunktzufahrt

$$\begin{aligned} q_{z,1} &= q_1 + q_2 + q_3 && \text{[Pkw-E]} \\ q_{z,2} &= q_4 + q_5 + q_6 && \text{[Pkw-E]} \\ q_{z,3} &= q_7 + q_8 + q_9 && \text{[Pkw-E]} \\ q_{z,4} &= q_{10} + q_{11} + q_{12} && \text{[Pkw-E]} \end{aligned}$$

mit $q_{z,i}$ = Verkehrsstärke in der Knotenpunktzufahrt i [Pkw-E]

Kreisfahrbahn

$$\begin{aligned} q_{k,1} &= q_7 + q_{10} + q_{11} && \text{[Pkw-E]} \\ q_{k,2} &= q_{10} + q_1 + q_2 && \text{[Pkw-E]} \\ q_{k,3} &= q_1 + q_4 + q_5 && \text{[Pkw-E]} \\ q_{k,4} &= q_{10} + q_{11} + q_{12} && \text{[Pkw-E]} \end{aligned}$$

mit $q_{k,i}$ = Verkehrsstärke in der Kreisfahrbahn unmittelbar vor der Knotenpunktzufahrt i [Pkw-E]

An einem dreiarmigen Kreisverkehrsplatz ergeben sich die maßgebenden Ströme zu:

Knotenpunktzufahrt

$$\begin{aligned} q_{z,1} &= q_2 + q_3 && \text{[Pkw-E]} \\ q_{z,2} &= q_4 + q_6 && \text{[Pkw-E]} \\ q_{z,3} &= q_7 + q_8 && \text{[Pkw-E]} \end{aligned}$$

mit $q_{z,i}$ = Verkehrsstärke in der Knotenpunktzufahrt i in [Pkw-E]

Kreisfahrbahn

$$\begin{aligned} q_{k,1} &= q_7 && \text{[Pkw-E]} \\ q_{k,2} &= q_2 && \text{[Pkw-E]} \\ q_{k,3} &= q_4 && \text{[Pkw-E]} \end{aligned}$$

mit $q_{k,i}$ = Verkehrsstärke in der Kreisfahrbahn unmittelbar vor der Knotenpunktzufahrt i [Pkw-E]

Auch an Kreisverkehrsplätzen ist die Anzahl der zur Verfügung stehenden Fahrstreifen in der Knotenpunktzufahrt und in der Kreisfahrbahn von erheblicher Bedeutung. Implementiert im Modell ROUML wurde zunächst nur die Berechnung von Wartezeiten an Knotenpunkten mit jeweils einem Fahrstreifen in der Knotenpunktzufahrt und in der Kreisfahrbahn. Die Implementierung anderer Fahrstreifenkombinationen an Kreisverkehrsplätzen ist generell kein Problem. Es sind dabei lediglich für die möglichen Kombinationen unterschiedliche Regressionsgleichungen zu ermitteln, die den jeweiligen Einfluss der Verkehrsstärke in der Kreisfahrbahn auf die Kapazität der Knotenpunktzufahrten berücksichtigen. Auf die Berücksichtigung des Einflusses von Fußgängerquerungen und Längsneigungen in der Knotenpunktzufahrt wurde aufgrund des insgesamt geringen Einflusses bzw. wegen der fehlenden zuverlässigen Datenbasis für netzweite Betrachtungen verzichtet.

Die Berechnung der Kapazität der Zufahrt der Kreisfahrbahn wird im Modell ROUML in Anlehnung an das HBS [6] ermittelt (vgl. Abb. 42).

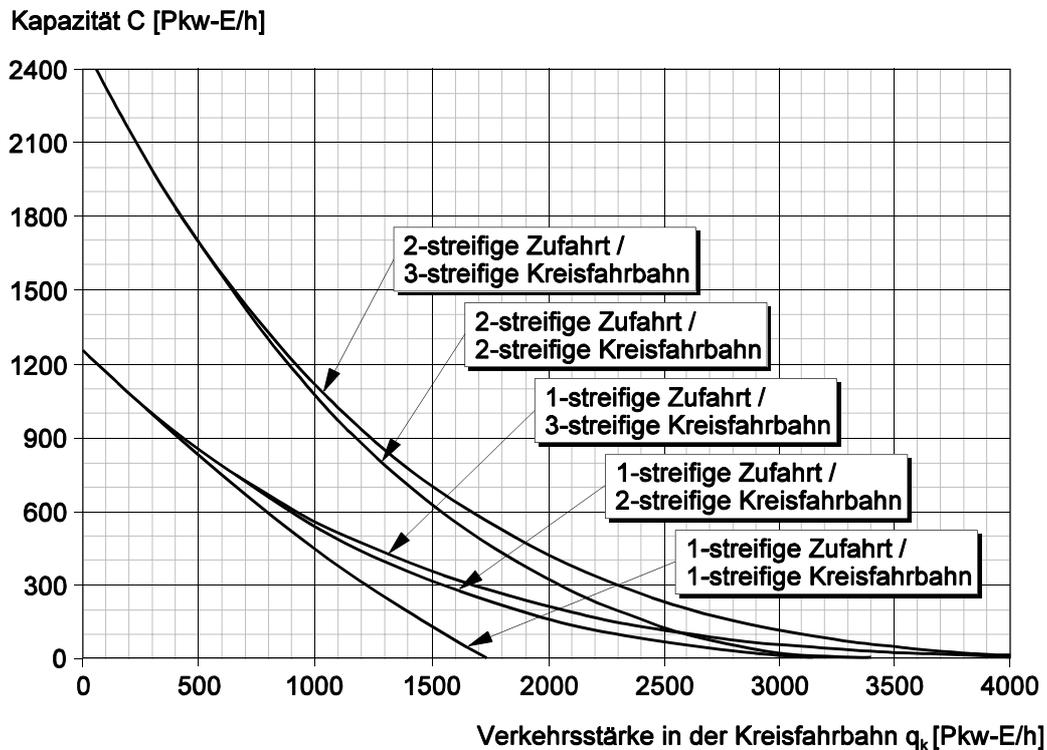


Abb. 42: Kapazitäten von Kreisverkehrszufahrten

Bei einstreifiger Zufahrt zum Kreisverkehrsplatz und einstreifiger Kreisfahrbahn ergibt sich die Kapazität der Zufahrt zum Kreisverkehrsplatz näherungsweise zu:

$$C_i = 1218 - 0,78 \cdot q_k \quad [\text{Pkw-E}]$$

mit q_k = Verkehrsstärke in der Kreisfahrbahn [Pkw-E]

C_i = Kapazität der Kreisverkehrszufahrt [Pkw-E]

Für die Berechnung kann zwischen linearen und nichtlinearen Funktionen zur Ermittlung der Kapazität C_i gewählt werden. Für die Rechenzeit im Modell ist der Funktionsverlauf nicht von Bedeutung.

Die Ermittlung der Belastungsreserve erfolgt dann mit:

$$R_i = C_i \cdot q_{z,i} \quad [\text{Pkw-E}]$$

mit C_i = Kapazität der Kreisverkehrszufahrt [Pkw-E]

$q_{z,i}$ = Verkehrsstärke in der Zufahrt i des Kreisverkehrsplatzes [Pkw-E]

Mit der Belastungsreserve R_i wird für jede Zufahrt i analog zur Ermittlung der mittleren Wartezeiten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen die mittlere Wartezeit nach Kimber und Holis ermittelt (vgl. Abb. 39). Die Berechnung von Wartezeiten an Kreisverkehrsplätzen mit mehr als vier Knotenpunktzufahrten ist generell möglich. Sie ist jedoch derzeit noch nicht im Modell ROUML berücksichtigt.

5.3.3.7 Wartezeiten an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen

Aufgrund von unterschiedlich langen Freigabezeiten (Grünzeiten) für die einzelnen Ströme ergeben sich unterschiedlich lange Wartezeiten an einem Knotenpunkt. Bei einer sehr großen Verkehrsbelastung kann es sein, dass die Anzahl der Fahrzeuge, die sich in einer Warteschlange an einer Zufahrt zu einem lichtsignalgeregelten Knotenpunkt staut, größer ist, als die Anzahl der Fahrzeuge die in einer Freigabezeit eines Umlaufes den Knotenpunkt passieren können. In diesem Fall müssen die aufgestauten Fahrzeuge auf die nächste Freigabezeit im nächsten Umlauf warten. Aus diesem Grund sind die Wartezeiten für die einzelnen Fahrzeuge stark von der aktuellen Verkehrsbelastung abhängig. Wenn der Auslastungsgrad groß ist, fallen größere mittlere Wartezeiten an. Auch für die Berechnung der Lichtsignalanlagen ist es erforderlich, die unterschiedlichen Kraftfahrzeugarten in Pkw-Einheiten umzurechnen [23] (vgl. Tab. 24).

Zuflusszeitlücken

In den meisten Berechnungsverfahren werden deterministische Ankunftsverteilungen von Fahrzeugen an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen vorausgesetzt. In jedem Umlauf mit der Umlaufzeit t_u [s] bei einem Fahrzeugstrom q [Pkw-E/h] kommen an einer Knotenpunktzufahrt genau m [Pkw-E] Fahrzeuge an.

$$m = \frac{q}{3600} \cdot t_u$$

Abflusszeitlücken

Die Abflusszeitlücken sind maßgebend für die Leistungsfähigkeit einer Knotenpunktzufahrt. Empirische Untersuchungen haben ergeben, dass die Abflusszeitlücken nicht konstant sind, sondern mit steigender Fahrzeugposition bis zu einem Grenzwert abnehmen. Nach der Berechnungsmethode der RiLSA [20] kann mit einem Zeitbedarfswert $t_b=1,6$ bis $2,2$ [s/Kfz], in der Regel aber mit $t_b=1,8$ bis $2,0$ gerechnet werden. Die Sättigungsverkehrsstärke eines Fahrstreifens an einem signalisierten Knotenpunkt errechnet sich dann zu:

$$q_c = \text{zul } q = \frac{3600}{t_b}$$

q_c = Sättigungsverkehrsstärke eines Fahrstreifens = zul q [Pkw-E]
 t_b = Zeitbedarfswert [s]

Phasenanzahl, Phasenfolge und Phasenübergänge

Die Anzahl der Phasen sollte aus Gründen der Leistungsfähigkeit so gering wie möglich gewählt werden. Jedoch sollten abbiegende Ströme die anderen Ströme nicht behindern. Bei hohen Verkehrsstärken wird aus Gründen der Verkehrssicherheit eine Drei- oder Vierphasensteuerung erforderlich. Je mehr Phasen gewählt werden, desto mehr erforderliche Zwischenzeiten müssen eingehalten werden, die die erforderliche Umlaufzeit erhöhen.

$$t_z = t_0 + t_r - t_e \quad [s]$$

mit t_z = Zwischenzeit [s]

t_0 = Überfahrzeit [s]

t_r = Räumzeit [s]

t_e = Einfahrzeit [s]

Das implementierte Verfahren zur Ermittlung von Wartezeiten an Knotenpunkten umfasst derzeit noch keinen Baustein zur Phasenbildung und zur Optimierung der Phasenfolgen. Zur Vereinfachung des Verfahrens kann eine mittlere Zwischenzeit t_z gewählt werden.

Ziel der Ermittlung der Wartezeiten an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen im Routensuch- und Umlenkungsmodell ROUML ist es, auch in großen Netzmodellen die Wartezeiten an Knotenpunkten in realitätsnaher Weise zu berücksichtigen, ohne auf Einzelfahrzeugsimulationsmodelle zurückgreifen zu müssen, die einen noch deutlich höheren Detaillierungsgrad erfordern und damit verknüpft auch wesentlich höhere Rechenzeiten benötigen. Für das Verkehrsumlegungsmodell ROUML ist die Berücksichtigung von Wartezeiten auf der Basis der Knotenstrombelastungen an allen Knotenpunktzufahrten eines Knotenpunktes ein erster Schritt in Richtung zu einem mesoskopischen Verkehrsumlegungsmodell.

Phaseneinteilung

An einem Knotenpunkt können verschiedene Phasen notwendig sein. Am häufigsten werden Zwei-, Drei- oder Vierphasensteuerungen eingesetzt. Bei Einmündungen sind zwei oder drei Phasen üblich. Bei Kreuzungen werden dagegen in der Regel Drei- oder Vierphasensteuerungen erforderlich. Es gibt viele Variationsmöglichkeiten bei der Einteilung der Ströme in die einzelnen Phasen. Hier werden nur einige Beispiele für die am häufigsten eingesetzten Möglichkeiten für die Einteilung gegeben.

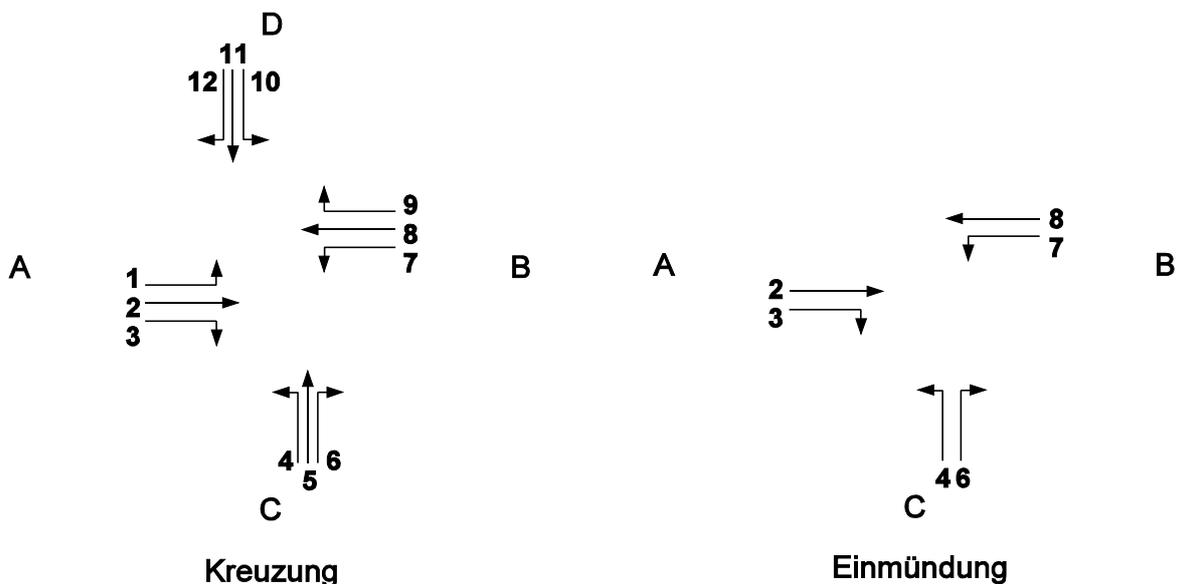


Abb. 43: Stromnummern im Modell an Knotenpunkten und Einmündungen

Eine Einteilung in drei Phasen an einer Kreuzung kann wie folgt aussehen:

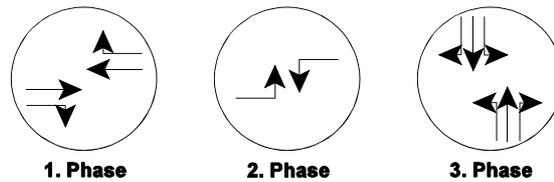


Abb. 44: Beispiel einer Dreiphasensteuerung an einer Kreuzung

In den einzelnen Phasen sind folgende Ströme (vgl. Abb. 43) enthalten:

- 1. Phase: Ströme 2, 3, 8 und 9.
- 2. Phase: Ströme 1 und 7.
- 3. Phase: Ströme 10, 11, 12, 4, 5 und 6.

Eine Einteilung in vier Phasen an einer Kreuzung kann wie folgt aussehen:

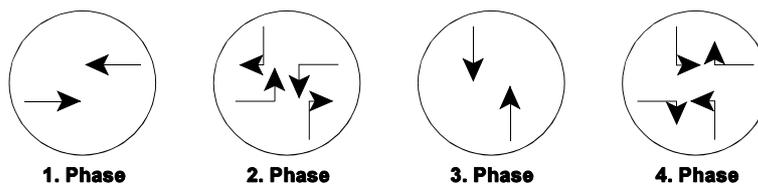


Abb. 45: Beispiel einer Vierphasensteuerung an einer Kreuzung

In den einzelnen Phasen sind folgende Ströme (vgl. Abb. 43) enthalten:

- 1. Phase: Ströme 2 und 8.
- 2. Phase: Ströme 1, 6, 12 und 7.
- 3. Phase: Ströme 11 und 5.
- 4. Phase: Ströme 4, 9, 10, und 3.

Eine Einteilung in zwei Phasen an einer Einmündung kann wie z. B. folgt aussehen (vgl. Abb. 46):

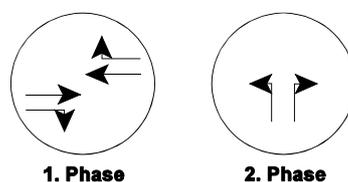


Abb. 46: Beispiel einer Zweiphasensteuerung an einer Einmündung

In den einzelnen Phasen sind folgende Ströme (nach Abbildung 43) enthalten:

- 1. Phase: Ströme 2, 3, 7 und 8.
- 2. Phase: Ströme 4 und 6.

Eine Einteilung in drei Phasen an einer Einmündung kann wie folgt aussehen:

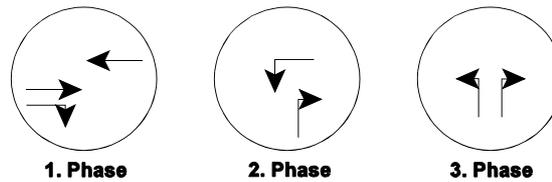


Abb. 47: Beispiel einer Dreiphasensteuerung an einer Einmündung

In den einzelnen Phasen sind folgende Ströme (vgl. Abb. 43) enthalten:

- 1. Phase: Ströme 2, 3 und 8.
- 2. Phase: Ströme 7 und 6.
- 3. Phase: Ströme 4 und 6.

Die Einteilung der Ströme in die einzelnen Phasentypen werden für das Umlegungsprogramm ROUML in einer gesonderten Datei „phasen.dat“, in der die Zuordnung der einzelnen Ströme zu den Phasen vorgenommen wird, zur Verfügung gestellt. Die Phasentypen werden in einem Phasenpool vorgehalten. Für einen Knoten, an dem die Wartezeiten in Abhängigkeit der Verkehrsstärken in allen Zufahrten ermittelt werden soll, kann ein vorhandener Phasentyp aus dem Phasenpool ausgewählt werden oder es wird dem Phasenpool ein neuer Phasentyp hinzugefügt, der der Phaseneinteilung am Knotenpunkt entspricht. Diese Vorgaben für die Phaseneinteilung können auch als Standard für mehrere Knotenpunkte verwendet werden.

Ein Abschnitt einer PHASEN-Datei für eine Dreiphasensteuerung an einer Kreuzung (vgl. Abb. 44) muss dabei folgendermaßen aussehen:

```
// Stromzuteilung in einer Dreiphasensteuerung
// Phasenanzahl
3
// Phasennummer i
1
// Anzahl der Ströme in dieser Phase
4
// Stromnummern
2, 3, 8, 9
// Phasennummer i+1
2
// Anzahl der Ströme in dieser Phase
2
// Stromnummern
1, 7
// Phasennummer i+2
3
// Anzahl der Ströme in dieser Phase
6
// Stromnummern
4, 5, 6, 10, 11, 12
// Stromzuteilung in einer Dreiphasensteuerung
```

Abb. 48: Ausschnitt eine PHASEN-Datei

Standardeinstellungen für Lichtsignalanlagen

Für Knotenpunkte, deren Umlaufzeit nicht einzeln vorgegeben sind, können die Standardumlaufzeit für Einmündungen und Kreuzungen benutzt werden. Als weitere Parameter können Standardumlaufzeiten an Einmündung und Kreuzung in der Datei „stdlsa.dat“ vordefiniert werden.

Die individuelle Angabe für jeden Knotenpunkt muss folgende Informationen enthalten:

- **Knotennummer**, für die eine Umlaufzeit angegeben wird,
- **Umlaufzeit** des Knotens,
- **Phasentyp** für den Knoten.

Es reicht aus, einen beliebigen Knoten des aufgelösten Knotenpunktes anzugeben, da das Modell dann die anderen Knoten, die zu dem aufgelösten Knotenpunkt gehören, automatisch ermitteln kann. Auf eine Berechnung der Zwischenzeiten wird im Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML derzeit noch verzichtet, da dies die lageplangetreue Abbildung der Knotenpunktgeometrie voraussetzen würde. Der Aufwand hierfür ist sehr hoch und es erscheint derzeit nicht sinnvoll, für netzweite Betrachtungen die exakte Knotenpunktgeometrie aller Knotenpunkte im Netzmodell zu kodieren. Anstelle von exakten, automatisch ermittelten Zwischenzeiten findet derzeit im Modell ROUML eine mittlere Zwischenzeit für alle Fahrtbeziehungen Berücksichtigung. In einer nächsten Erweiterungsstufe des Modells sollte es ermöglicht werden, für einzelne Knotenpunkte dem Modell ROUML bekannte Zwischenzeitmatrizen zur Verfügung zu stellen, auf deren Basis dann die Ermittlung der Grünzeiten und Umlaufzeit für diese Knotenpunkte noch genauer erfolgen kann.

Die Datei „stdlsa.dat“ kann z.B. wie in der Abbildung 49 aussehen.

```
// Standarddefinition für die Berechnung der Wartezeiten an Knotenpunkten mit
// Lichtsignalanlagen
// Zeitbedarfswert tb zur Berechnung der Kapazität:
1.8
// Phasenvorgaben(typen) für Kreuzung und Einmündung
// 1.PHASE_KREUZ und 2.PHASE_EINM:
3
2
// mittlere Zwischenzeiten tz, mitt in Sekunden :
7
// Feste Umlaufzeiten fuer 1. Kreuzungen und 2. Einmündungen
// 0 für belastungsabhängige Umlaufzeitenberechnung :
90
60
// Mindestfreigabezeiten tGr,min in Sekunden:
5
// Extra Angaben für einzelne Knotenpunkte in Form
// Knotennummer (ein Knoten eines aufgelösten Knotenpunktes), Umlaufzeit, Phasentypen:
1500      120      4
1100      70      2
```

Abb. 49: Beispiel für die Standardwerte zur Berechnung von Lichtsignalanlagen

Sofern keine Umlaufzeit für den einzelnen Knoten vorgegeben wurde, wird auf die Standardwerte für Kreuzungen und Einmündungen zurückgegriffen (im Beispiel in Abbildung 49 Kreuzungen 90 s und Einmündungen 60 s). Die Berechnung der Freigabezeiten für die einzelnen Ströme erfolgt im Modell unter der Berücksichtigung der vorgegebenen Umlaufzeiten immer belastungsabhängig, d.h. es ist im Modell derzeit nicht möglich, reine Festzeitsteuerungen abzubilden. Zusätzlich ist es möglich, dem Modell die Berechnung der Umlaufzeiten ganz zu überlassen. Je nach Auslastung des Knotenpunktes wird dann die geringst mögliche Umlaufzeit mit der höchsten Leistungsfähigkeit ermittelt.

Berechnung der Freigabe- und Umlaufzeiten

Die erforderliche Umlaufzeit an einem Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage ergibt sich zu:

$$erf t_u = \sum maßg t_{Gr} + \sum erf t_z$$

mit erf t_u	=	erforderliche Umlaufzeit	[s]
maßg t_{Gr}	=	erforderliche Grünzeit	[s]
erf t_z	=	erforderliche Zwischenzeit	[s]

Wenn alle an einem Knotenpunkt ankommenden Fahrzeuge in einer Grünzeit abgefertigt werden sollen, ergibt sich die folgende Gleichung:

$$\frac{maßg q_{Fs}}{3600} + erf t_u = \frac{zul q}{3600} \cdot maßg t_{Gr}$$

mit maßg q_{Fs}	=	maßgebende Fahrstreifenbelastung des betrachteten Stromes	[Pkw-E/h]
zul q	=	zulässige Verkehrsstärke = q_c	

Damit ergibt sich die erforderliche Umlaufzeit erf t_u zu:

$$erf t_u = \frac{\sum erf t_z}{1 - \sum \frac{maßg q_{Fs}}{zul q}}$$

mit maßg q_{Fs}	=	aktuelle Fahrstreifenbelastung	[Pkw-E/h]
erf t_z	=	erforderlichen Zwischenzeit	[s]
zul q	=	maximale Fahrstreifenbelastung (Kapazität)	[Pkw-E/h]

Die erforderliche Freigabezeit (Grünzeit) wird nach der folgenden Formel berechnet:

$$erf t_{Gr} = \frac{maßg q_{Fs}}{zul q} \cdot erf t_u$$

mit maßg q_{Fs}	=	aktuelle Fahrstreifenbelastung	[Pkw-E/h]
erf t_u	=	erforderliche Umlaufzeit	[s]
zul q	=	maximale Fahrstreifenbelastung (Kapazität)	[Pkw-E/h]

Nach der Wahl der Umlaufzeit kann dann die Freigabezeit für jede Zufahrt $t_{gr,i}$ ermittelt werden. Sollte dabei die minimale Freigabezeit in einer Zufahrt unterschritten werden, erfolgt im Modell ROUML die erneute Berechnung aller Freigabezeiten unter Berücksichtigung der minimalen Freigabezeit.

$$erf t_{Gr,i} = \frac{gew t_u - \sum erf t_z \cdot \frac{maßg q_{Fs,i}}{zul q_i}}{\sum \frac{maßg q_{Fs}}{zul q}}$$

mit	maßg q_{Fs}	=	aktuelle Fahrstreifenbelastung	[Pkw-E/h]
	gew t_u	=	gewählte Umlaufzeit	[s]
	zul q	=	maximale Fahrstreifenbelastung (Kapazität)	[Pkw-E/h]
	erf t_z	=	erforderlichen Zwischenzeit	[s]

5.4 Wirkungsmodell STRBEW (Version 2.0)

5.4.1 Allgemeines

Für die Ermittlung der Auswirkungen von Planfällen sind neben den Qualitätsmerkmalen für den Verkehrsablauf (Verkehrsstärken und gefahrene Geschwindigkeiten) auch die Abgas- und die Lärmemissionen von Bedeutung. Mit dem im Rahmen dieser Arbeit erweiterten Wirkungsmodell STRBEW (**STR**ecken**BEW**ertung) in der Version 2.0 wurden neue Entwicklungen hinsichtlich der Berechnungsmethodik von Abgas- und Lärmemissionen berücksichtigt. Für die Abgasemissionen des Straßenverkehrs wurde im Jahr 1995 in Zusammenarbeit zwischen dem TÜV Rheinland und der Infrac AG (Schweiz) im Auftrage des Umweltbundesamtes ein „Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ [27] herausgegeben. Anders als in den bis dahin zur Ermittlung der Abgasemissionen verwendeten Eingangsgrößen aus dem Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen MLuS-92 [18] lag mit dem Handbuch für Emissionsfaktoren erstmals eine elektronische Datenbank für eine Vielzahl von Belastungsfällen für unterschiedliche Straßen- und Fahrzeugtypen vor, die eine ideale Datenbasis für Wirkungsmodelle zur Ermittlung von Abgasemissionen bot.

Das Wirkungsmodell STRBEW in der Version 2.0 ermittelt aus den Ergebnissen des Routensuch- und Umlegungsmodells ROUML die Abgas- und Lärmemissionen für alle Kanten des Netzmodells. Das angewandte Verfahren basierte ursprünglich auf den Berechnungsmethoden des Merkblattes für Luftverunreinigungen an Straßen (MLuS-92). Nach dem Erscheinen des Handbuches für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs im Jahr 1995 wurde das Verfahren zur Ermittlung der Emissionen weiter verfeinert und an die neuen Erkenntnisse angepasst [1]. Zur Ermittlung der Emissionen für ein Straßennetz war es erforderlich, mit dem „Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ [27] die erforderlichen Emissionsfaktoren für Abgase zu ermitteln. Die Auswertung für das gesamte Netzmodell und für die unterschiedlichen Fahrtenkategorien erfolgt dann mit dem Wirkungsmodell STRBEW.

Ermittelt werden können mit dem Wirkungsmodell STRBEW in der Version 2.0 die Emissionen der Schadstoffe

- CO (Kohlenmonoxid),
- HC (Kohlenwasserstoffe [Gesamt-HC]),
- NO_x (Stickoxide),
- PM (Partikel),
- Pb (Blei),
- SO₂ (Schwefeldioxid) und
- Benzol.

Außerdem ist es mit dem Wirkungsmodell STRBEW möglich,

- den Kraftstoffverbrauch (Benzin - Pkw, Diesel - Pkw, Lkw),
- die Emission des Treibhausgases CO₂ (Kohlendioxid) und
- die Lärmemissionen zu berechnen.

Die CO₂-Emissionen werden unter der Annahme berechnet, dass der Kohlenstoff im Treibstoff vollständig zu CO₂ oxidiert (verwendete Umrechnungswerte: 3.0885 kg CO₂ pro kg Benzin; 3.1171 kg CO₂ pro kg Diesel).

Die Ermittlung der Emissionen erfolgt im Wirkungsmodell STRBEW **nicht** mit den mittleren momentanen Geschwindigkeiten der Kraftfahrzeuge. Dazu wäre eine Einzelfahrzeugsimulation für den Großraum Hannover erforderlich. Einzelfahrzeugsimulationen sind noch sehr aufwendig und erfordern einen erheblichen Rechenaufwand, deshalb wurden in dieser Untersuchung unter den Annahmen, dass

- a) die Strecke S auf ihrer gesamten Länge gleichbleibende Eigenschaften - insbesondere eine konstante Längsneigung - aufweist und
- b) die Fahrzeuge deshalb die Strecke mit im Mittel gleichbleibender Geschwindigkeit befahren können (d. h. stationäre Fahrt über den Weg),

die mittlere Reisegeschwindigkeit **näherungsweise** mit der mittleren momentanen Geschwindigkeit gleichgesetzt:

$$V_{\text{mom}} \approx V_R = S/t_R$$

mit	V_{mom}	=	mittlere momentane Geschwindigkeit	[km/h]
	V_R	=	mittlere Pkw-Reisegeschwindigkeit	[km/h]
	S	=	Länge einer knotenpunktfreien Strecke mit gleichbleibenden Eigenschaften	[km]
	t_R	=	mittlere Reisezeit für die Strecke	[h]

Nur unter dieser Annahme lassen sich die mittleren Reisegeschwindigkeiten, die mit dem Routensuch- und Umlegungsprogramm ROUML ermittelt wurden, für die Berechnung von Emissionen verwenden. Für noch genauere Betrachtungen ist die Verwendung von Einzelfahrzeugsimulationen zu empfehlen.

5.4.2 Verfahren zur Ermittlung der Abgasemissionen

5.4.2.1 Fahrtenkategorien

Unterschieden werden im Wirkungsmodell STRBEW (Version 2.0) die Fahrzeugkategorien:

- Pkw:** Personenkraftwagen und Kombi
- SNF:** Schwere Nutzfahrzeuge (Lkw+LZ+SZ)
- Lkw : Solo-Lastkraftwagen (>3,5 t), sonstige Kfz (>3,5 t)
 - LZ : Lastzug, Anhängerzug
 - SZ : Sattelzug

Zur Ermittlung der Emissionsfaktoren, die im Wirkungsmodell STRBEW Verwendung finden, ist zuerst ein Bezugsjahr und dann eine Verkehrszusammensetzung zu wählen. Die Fahrzeugmischung (z.B. Anteil alter Fahrzeuge ohne Katalysator) ändert sich von Jahr zu Jahr.

Die Eingangsgrößen zur Ermittlung der Abgas- und Lärmemissionen sind die

- **mittleren Verkehrsstärken** und
 - **mittleren Reisegeschwindigkeiten**
- für Personenkraftwagen und für schwere Nutzfahrzeuge sowie
- das **Netzmodell**.

5.4.2.2 Fahrmuster

Ein „Fahrmuster“ steht für ein typisches Fahrverhalten und kann mit Hilfe kinematischer Kenngrößen (typischerweise mittlere Geschwindigkeit, Dynamik) beschrieben werden. Die Emissionsfaktoren werden nach dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [27] für diese Fahrmuster ermittelt (vgl. Tab. 27).

Bundesautobahnen / Ebene		Erläuterung
v075	(V=70-80 km/h)	Teilschichtfahrmuster
v085	(V=80-90 km/h)	Teilschichtfahrmuster
v095	(V=90-100 km/h)	Teilschichtfahrmuster
v105	(V=100-110 km/h)	Teilschichtfahrmuster
v115	(V=110-120 km/h)	Teilschichtfahrmuster
v125	(V=120-130 km/h)	Teilschichtfahrmuster
v135	(V=130-140 km/h)	Teilschichtfahrmuster
v145	(V=140-150 km/h)	Teilschichtfahrmuster
STGO AB	(V=9,4 km/h)	Stau
innerorts & außerorts / Ebene		Erläuterung
FM1	(V=18,6 km/h)	- Flächenquellen
FM2	(V=19,8 km/h)	- Linienquelle mit nicht koordinierten LSA, hohe Anbaustruktur, Kern
FM3	(V=32,0 km/h)	- Linienquelle mit nicht koordinierten LSA, schwache Anbaustruktur, Gr. Welle > 50 km/h
		- Ortsdurchfahrten mit Engpässen
FM4	(V=37,5 km/h)	- Linienquelle, vorfahrtberechtigt, schwache Anbaustruktur, Gr. Welle > 50 km/h, angebaute Ortsdurchfahrten
FM5	(V=46,2 km/h)	- Landstraßen unstetig
FM6	(V=60,9 km/h)	- Landstraßen eng, Linienquellen, Gr. Welle <50 km/h, anbaufreie
FM7	(V=58,4 km/h)	Ortsdurchfahrten
FM8	(V=78,3 km/h)	- Landstraßen stetig mit Beschleunigung (z.B. Ortsausfahrten)
FM9	(V=72,0 km/h)	- Landstraßen stetig mit Verzögerung (z.B. Ortseinfahrten)
FM10	(V=76,7 km/h)	- Landstraßen stetig, planfreie Linienquellen
STGO IO	(V=5,3 km/h)	- Stau, stop-and-go
Außerortsstraßen / Gefälle		Erläuterung
LG1	(V=60,9 km/h)	außerorts, Gefälle stetig bis eng
LG2	(V=51,2 km/h)	außerorts, Gefälle eng bis unstetig
LG3	(V=49,9 km/h)	außerorts, Gefälle unstetig
Außerortsstraßen / Steigung		Erläuterung
LS1	(V=59,8 km/h)	außerorts, Steigung stetig bis eng
LS2	(V=49,2 km/h)	außerorts, Gefälle eng bis unstetig
LS3	(V=46,2 km/h)	außerorts, Gefälle unstetig

Tab. 27: Fahrmuster für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge (<3,5 t), Quelle [27]

Die Fahrmuster werden für unterschiedliche Fahrzeugkategorien definiert. In der Realität müssen die Fahrmuster einzelnen Streckentypen zugeordnet werden. Da auf einzelnen Streckenabschnitten zu unterschiedlichen Tageszeiten durchaus unterschiedliche Verkehrsbelastungen und damit auch unterschiedliche Geschwindigkeiten auftreten, ist es notwendig, auch die Verkehrssituation zu berücksichtigen. Die Verkehrssituation ist gleichzeitig auf alle Fahrzeugkategorien anwendbar, während sich die Fahrmuster jeweils nur für eine Fahrzeugkategorie definiert sind.

Die Fahrmustergruppen für schwere Nutzfahrzeuge nach dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs sind der Tabelle 28 zu entnehmen.

Regel-Situationen		
Nr. LW / LZ / SZ	V [km/h]	Fahrmustergruppen
1	86	Bundesautobahn, freier Verkehrsfluss
2	79	Außerortsstraßen (4-, 3-, 2-streifig; mit Seitenstreifen)
3	65	übrige Außerortsstraßen
4	47	innerorts Hauptverkehrsstraßen
5	26	innerorts, Kernbereich, große Knotenabstände
6	17	innerorts, übrige Straßen, kleine Knotenabstände
Sonder-Situationen		
Nr. LW / LZ / SZ	V [km/h]	Fahrmustergruppen
16	38	Serpentinen
17	11	innerorts, gebundener Verkehrsfluss
18	6	innerorts, stop-and-go
19	73	Bundesautobahn, teilgebundener Verkehrsfluss
20	18	Bundesautobahn, gebundener Verkehrsfluss
21	6	Bundesautobahn, stop-and-go

Tab. 28: Fahrmustergruppen für schwere Nutzfahrzeuge [27]

5.4.2.3 Verkehrssituationen

Nach dem „Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ [27] können im Wirkungsmodell STRBEW die in den Tabellen 29 und 30 dargestellten Verkehrssituationen berücksichtigt werden.

Autobahn-Regelsituationen:	V_{zulässig} [km/h]	Verkehrsstärken und Bemerkungen
AB>120	-	< 1.400 Kfz/Fahrstreifen
AB_120	120	< 1.400 Kfz/Fahrstreifen
AB_100	100	< 1.400 Kfz/Fahrstreifen
AB_80	80	< 1.500 Kfz/Fahrstreifen
AB_60	60	< 1.500 Kfz/Fahrstreifen
AB>120_gebunden	-	> 1.400 Kfz/Fahrstreifen
AB_120_gebunden	120	> 1.400 Kfz/Fahrstreifen
AB_100_gebunden	100	> 1.400 Kfz/Fahrstreifen
AB_80_gebunden	80	> 1.500 Kfz/Fahrstreifen
AB_60_gebunden	60	> 1.500 Kfz/Fahrstreifen
AB_Baust1		zweistreifig
AB_Baust2		einstreifig
AB_Stop+Go		stop-and-go
Außerorts Regelsituationen:	V_{zulässig} [km/h]	Verkehrsstärken und Bemerkungen
AO_1		guter Ausbauzustand, gerade
AO_2		guter Ausbauzustand, gleichmäßig kurvig
AO_3		ungleichmäßig kurvig
Innerorts-Regelsituationen:	V_{zulässig} [km/h]	Verkehrsstärken und Bemerkungen
IO_HVS>50_1	> 50	geringe Störungen
IO_HVS>50_2	> 50	mittlere Störungen
IO_HVS>50_3	> 50	starke Störungen
IO_HVS1		Ortsdurchfahrt, Vorfahrt, ohne Störungen
IO_HVS2		HVS, Vorfahrt, geringe Störungen
IO_HVS3		HVS, Vorfahrt, mittlere Störungen
IO_HVS4		HVS, Vorfahrt, starke Störungen
IO_LSA1		HVS, LSA, geringe Störungen
IO_LSA2		HVS, LSA, mittlere Störungen
IO_LSA3		HVS, LSA, starke Störungen
IO_Kern		Innerortsstraßen im Stadtkern
IO_Nebenstr_dicht		Nebenstraßen, geschlossene Bebauung
IO_Nebenstr_locker		Nebenstraßen, locker bebaut
IO_Stop+Go		Innerortsstraßen, stop-and-go

Tab. 29: Regelfälle für Verkehrssituationen nach dem Handbuch für Emissionsfaktoren [27]

Die Verkehrssituationen für Personenkraftwagen und Lastkraftwagen (SNF) setzen sich wiederum aus Kombinationen von unterschiedlichen Fahrmustern zu so genannten Fahrmustermixen zusammen.

Autobahn-Sondersituationen:	Bemerkungen
X: AB_v075	Autobahn, Teilschichtfahrmuster 70-80 km/h (Pkw, LNF)
X: AB_v085	Autobahn, Teilschichtfahrmuster 80-90 km/h (Pkw, LNF)
X: AB_v095	Autobahn, Teilschichtfahrmuster 90-100 km/h (Pkw, LNF)
X: AB_v105	Autobahn, Teilschichtfahrmuster 100-110 km/h (Pkw, LNF)
X: AB_v115	Autobahn, Teilschichtfahrmuster 110-120 km/h (Pkw, LNF)
X: AB_v125	Autobahn, Teilschichtfahrmuster 120-130 km/h (Pkw, LNF)
X: AB_v135	Autobahn, Teilschichtfahrmuster 130-140 km/h (Pkw, LNF)
X: AB_v145	Autobahn, Teilschichtfahrmuster 140-150 km/h (Pkw, LNF)
X: AB_teilgebunden	Autobahn, teilgebunden (SNF und Busse)
X: AB_gebunden	Autobahn, teilgebunden (SNF und Busse)
Außerorts-Sondersituationen:	Bemerkungen
X: AO_Gefälle(LG3)	Gefälle, außerorts, FM: LG3 (Pkw und LNF)
X: AO_Steigung(LS3)	Steigung, außerorts, FM: LS3 (Pkw und LNF)
X: AO_Ortsausfahrt(D8)	Landstraße stetig mit Beschleunigung (Pkw und LNF)
X: AO_Ortseinfahrt(D9)	Landstraße stetig mit Verzögerung (Pkw und LNF)
X: AO_Serpentinen	Außerorts, Serpentine (SNF und BUSSE)
X: AO_mehrstreifig	drei- oder vierstreifig ausgebaute Straßen
Innerorts-Sondersituationen:	Bemerkungen
X: IO_Ortsdurchfahrt_eng(D4)	Ortsdurchfahrt mit Engpässen, (Pkw und LNF)
X: IO_Kern_großer_Knotenabstand	Innerorts, große Knotenpunktabstände (SNF und Busse)
X: IO_gebunden	Innerorts, gebundener Verkehr (SNF und Busse)
X: IO_Hauptverkehrsstraße	Innerörtliche Hauptverkehrsstraßen (SNF und Busse)

Tab. 30: Sonderfälle für Verkehrssituationen nach dem Handbuch für Emissionsfaktoren [27]

5.4.2.4 Startzuschläge und Längsneigungen

Die Zuschläge für einen Kaltstartvorgang von Personenkraftwagen können aufbauend auf dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [27] in Abhängigkeit von

- der Umgebungstemperatur,
 - der Fahrtlängen,
 - der Standzeiten und
 - der Fahrmuster
- ermittelt werden.

Derzeit existieren im Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [27] lediglich statistisch gesicherte Werte für Kaltstartzuschläge von Personenkraftwagen und Lieferwagen. Kaltstartzuschläge für Lastkraftwagen bzw. schwere Nutzfahrzeuge sind vom TÜV Rheinland in den letzten 10 Jahren nicht genauer untersucht worden. Kaltstartzuschläge für Lastkraftwagen sind jedoch erheblich geringer als die von Personenkraftwagen oder Lieferwagen mit Benzinmotoren. Hinzu kommt noch, dass die Kaltstartvorgänge von Lastkraftwagen erheblich seltener sind als die von Personenkraftwagen, da Lastkraftwagen in der Regel erheblich intensiver genutzt werden als Personenkraftwagen. Auf eine Berücksichtigung von Kaltstartzuschlägen für Lastkraftwagen (SNF) wurde daher im Modell STRBEW verzichtet. Da die Kaltstartvorgänge derzeit Handbuch für Emissionsfaktoren [27] lediglich als pauschal ermittelte zusätzliche Emissionen angegeben werden, ist eine kantenbezogene Zuordnung der Startzuschläge auch für Personenkraftwagen derzeit noch nicht möglich. Ebenfalls unberücksichtigt bleiben im Wirkungsmodell STRBEW unterschiedliche Längsneigungen, da die entsprechenden Informationen im Netzmodell von Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML nicht berücksichtigt werden.

5.4.3 Ausgewählte Verkehrssituationen zur Ermittlung der Abgasemissionen

Die Ermittlung der Abgasemissionen erfolgt im Wirkungsmodell STRBEW nicht für alle der im Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [27] aufgeführten Verkehrssituationen. Die derzeit berücksichtigten Verkehrszustände sind der Tabelle 31 zu entnehmen. Da mit dem Programm STRBEW überwiegend Emissionen im städtische Bereich ermittelt werden sollen, wurden dem Wirkungsmodell standardmäßig überwiegend Innerortsverkehrssituationen zugrunde gelegt.

Verkehrszustand	V (km/h)	Beschreibung
Autobahn - Regelsituation		
AB>120	130	ohne Tempolimit, Verkehrsstärken<1400 Kfz/h je Fahrstreifen
AB_100	105	V _{zul} =100, Verkehrsstärken<1400 Kfz/h je Fahrstreifen
AB_60	80	V _{zul} =60, Verkehrsstärken<1400 Kfz/h je Fahrstreifen
Außerorts - Regelsituation		
AO_1	77	guter Ausbaugrad, gerade
AO_3	61	ungleichmäßig kurvig
Innerorts - Regelsituation		
IO_HVS>50_2	48	Hauptverkehrsstraße (HVS), V _{zul} >50, mittlere Störungen
IO_HVS2	46	HVS, vorfahrtberechtigt, geringe Störungen
IO_HVS4	32	HVS, vorfahrtberechtigt, starke Störungen
IO_LSA2	28	HVS, mit Lichtsignalanlage
IO_Nebenstr_dicht	19	Nebenstraßen, geschlossene Bebauung
IO_STOP+GO	5	Innerortsstraßen, stop-and-go

Tab. 31: Verkehrssituationen für Personenkraftwagen zur Ermittlung der Abgasemissionen im Wirkungsmodell STRBEW

Ergebnis der Verkehrsumlegungen ist neben der Verkehrsbelastung auch die mittlere Reisegeschwindigkeit von Personenkraftwagen und Lastkraftwagen für jeden Streckenabschnitt im Netzmodell. Anhand der vom Umlegungsmodell ROUML ermittelten mittleren Reisegeschwindigkeiten erfolgt im Wirkungsmodell STRBEW die Zuordnung zu den in Tabelle 31 bzw. 32 dargestellten Verkehrssituationen.

Verkehrszustand	V (km/h)	Beschreibung
Autobahn - Regelsituation		
AB>120	86	ohne Tempolimit, Verkehrsstärken<1400 Kfz/h je Fahrstreifen
AB_100	86	V _{zul} =100, Verkehrsstärken<1400 Kfz/h je Fahrstreifen
AB_60	74	V _{zul} =60, Verkehrsstärken<1400 Kfz/h je Fahrstreifen
Außerorts - Regelsituation		
AO_1	72	guter Ausbaugrad, gerade
AO_3	56	ungleichmäßig kurvig
Innerorts - Regelsituation		
IO_HVS>50_2	40	Hauptverkehrsstraße (HVS), TL>50 km/h, mittlere Störungen
IO_HVS2	40	HVS, vorfahrtberechtigt, geringe Störungen
IO_HVS4	24	HVS, vorfahrtberechtigt, starke Störungen
IO_LSA2	21	HVS, mit Lichtsignalanlage
IO_Nebenstr_dicht	15	Nebenstraßen, geschlossene Bebauung
IO_STOP+GO	6	Innerortsstraßen, STOP&GO

Tab. 32: Verkehrssituationen für Lastkraftwagen (SNF) zur Ermittlung der Abgasemissionen im Großraum Hannover

Das Wirkungsmodell STRBEW interpoliert linear zwischen den betrachteten Verkehrssituationen. Dies ist systematisch gesehen nicht ganz korrekt, erscheint jedoch, da die Abgasemissionen ohnehin nur auf der Basis von mittleren Reisegeschwindigkeiten ermittelt werden können, noch akzeptabel. Auch in anderen Verkehrsumlegungsmodellen (vgl. VISUM [42]) wird ein ähnliches vereinfachendes Verfahren angewendet. Hinter den verwendeten Verkehrssituationen verbergen sich noch Kombinationen von unterschiedlichen Fahrmustermixen.

Damit das Wirkungsmodell STRBEW hinsichtlich unterschiedlicher zu untersuchender Fragestellungen und der Untersuchungszeiträume flexibel einzusetzen bleibt, werden die Abgasemissionsfaktoren im Wirkungsmodell STRBEW für jeden Berechnungsvorgang aus zwei tabellarischen Eingangsdateien (Pkw und Lkw) eingelesen (vgl. Tab. 33).

Pkw Emissionsfaktoren												
V	km/h	130,00	110,00	80,00	76,70	60,60	48,03	46,20	32,00	28,01	18,60	5,30
CO	g/Fz	2,1851	1,0343	0,6238	1,0811	1,3426	1,3514	1,3849	1,6995	1,8807	2,6429	10,3108
CO2	g/Fz	191,4430	162,7829	129,0439	136,3914	139,1431	148,0539	151,1083	174,9915	190,9372	249,7742	450,9072
HC	g/Fz	0,0874	0,0631	0,0633	0,1008	0,1414	0,1607	0,1648	0,2123	0,2387	0,3304	1,2422
Benzin	g/Fz	63,9756	54,1623	43,4644	45,5459	47,1840	49,8184	50,8324	59,1141	64,6294	84,5229	164,3418
Diesel	g/Fz	54,5622	47,2061	35,6031	38,4326	36,4434	40,6413	41,5299	47,1918	51,0235	66,8262	77,7941
NOx	g/Fz	1,0194	0,6857	0,3791	0,5109	0,4740	0,4500	0,4541	0,4676	0,4831	0,5259	0,5420
Partikel	g/Fz	0,0263	0,0192	0,0073	0,0085	0,0164	0,0145	0,0140	0,0128	0,0136	0,0159	0,0407
Blei	g/Fz	0,0006	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004	0,0005	0,0005	0,0006	0,0006	0,0008	0,0015
SO2	g/Fz	0,0223	0,0191	0,0148	0,0152	0,0151	0,0166	0,0170	0,0195	0,0212	0,0278	0,0428

Lkw Emissionsfaktoren												
V	km/h	86,07	86,07	74,47	71,64	55,67	40,36	39,72	24,32	21,42	15,10	5,85
CO	g/Fz	1,8041	1,8041	1,8850	1,8622	2,0247	2,3870	2,4158	3,2721	3,7683	5,0708	11,9533
CO2	g/Fz	581,2020	581,2020	531,5266	502,9912	488,4075	529,2529	535,3209	696,4023	756,0477	948,5141	1884,9600
HC	g/Fz	0,7409	0,7409	0,8957	0,9153	1,1636	1,5964	1,6249	2,4272	2,8137	3,9422	9,6133
Diesel	g/Fz	186,4560	186,4560	170,5196	161,3651	156,6865	169,7902	171,7368	223,4135	242,5484	304,2938	604,7159
NOx	g/Fz	4,4066	4,4066	4,1283	3,8906	3,9074	4,3508	4,4169	6,1071	6,6077	8,4407	17,0604
Partikel	g/Fz	0,2042	0,2042	0,2112	0,2092	0,2289	0,2775	0,2818	0,3996	0,4552	0,6185	1,4258
Blei	g/Fz	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
SO2	g/Fz	0,1871	0,1871	0,1711	0,1619	0,1573	0,1704	0,1724	0,2242	0,2434	0,3054	0,6069

Tab. 33: Beispiel für Emissionsfaktorendateien im Wirkungsmodell STRBEW (Bezugsjahr 2000)

Durch die Auslagerung der Abgasemissionsfaktoren in ASCII-Dateien ist es mit dem Wirkungsmodell STRBEW und dem Handbuch für Emissionsfaktoren [27] je nach Fragestellung möglich, unterschiedliche Zeiträume und unterschiedliche Verkehrssituationen als Eingangsgrößen für eine Abgasemissionsermittlung zu verwenden. Die inzwischen im Jahre 1999 erfolgte Aktualisierung der Emissionsfaktoren durch eine neue Version 1.2 des Handbuches für Emissionsfaktoren stellte so ebenfalls kein Problem dar, da die entsprechenden Emissionsfaktorendateien ohnehin für jede untersuchte Fragestellung erneut aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren ermittelt werden müssen [27].

5.4.4 Verfahren zur Ermittlung der Lärmemissionen

Die Ermittlung der Lärmemissionen erfolgt im Wirkungsmodell STRBEW (Version 2.0) in Anlehnung an das Verfahren der RLS-90 [22]. Mit dem Wirkungsmodell STRBEW kann der vereinfachte Mittelungspegel L_m ermittelt werden. Nicht alle für die Ermittlung des Mittelungspegels L_m erforderlichen Eingangsdaten können derzeit im Wirkungsmodell betrachtet werden. Der Mittelungspegel beschreibt den Schalldruckpegel in der Fahrbahnmitte in einer Höhe von einem halben Meter. Der Mittelungspegel wird nach der folgenden Formel berechnet.

$$L_m = L_{m,e} + D_S + D_{BM} + D_B$$

mit $L_{m,e}$	= Emissionspegel	[db(A)]
D_S	= Pegeländerung durch unterschiedliche Abstände S zwischen dem Emissionsort und dem maßgebenden Immissionsort ohne Boden- und Meteorologiedämpfung	[db(A)]
D_{BM}	= Pegeländerung durch Boden- und Meteorologiedämpfung. Diese steht in Abhängigkeit zur mittleren Höhe, welche den mittleren Abstand zwischen dem Grund und der Verbindungslinie zwischen Emissions- und Immissionsort darstellt.	[db(A)]
D_B	= Pegeländerung durch topographische Gegebenheiten, bauliche Maßnahmen und Reflexionen.	[db(A)]

Die Pegeländerungen D_S , D_{BM} , und D_B können derzeit im Wirkungsmodell STRBEW nicht berücksichtigt werden, da für die Ermittlung dieser Terme eine Vielzahl von Informationen für jede Kante im Netzmodell erforderlich wären, die derzeit nicht netzweit aufgenommen werden. Somit wird im Wirkungsmodell der Mittelungspegel L_m näherungsweise gleich dem Emissionspegel $L_{m,e}$ gesetzt. Der Emissionspegel $L_{m,e}$ setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$L_{m,e} = L_m^{(25)} + D_V + D_{StrO} + D_{Stg} + D_E$$

mit $L_m^{(25)}$	= Mittelungspegel in horizontalem Abstand von 25 m	[db(A)]
D_V	= Korrekturfaktor für unterschiedliche Höchstgeschwindigkeiten	[db(A)]
D_{StrO}	= Pegelzuschlag für unterschiedliche Straßenoberflächen	[db(A)]
D_{Stg}	= Pegelzuschlag infolge Steigung und Gefälle	[db(A)]
D_E	= Korrektur infolge von Spiegelschallquellen	[db(A)]

Die Pegeländerungen infolge D_{StrO} , D_{Stg} und D_E bleiben im Wirkungsmodell STRBEW derzeit ebenfalls noch unberücksichtigt.

Der Term zur Berücksichtigung unterschiedlicher Höchstgeschwindigkeiten D_V ermittelt sich wie folgt:

$$D_V = L_{Pkw} - 37,3 + 10 \cdot \lg \left[\frac{100 + (10^{0,1D} - 1) \cdot p}{100 + 8,23 \cdot p} \right]$$

mit L_{Pkw}	= $27,7 + 10 \cdot \lg[1 + (0,02 \cdot V_{Pkw})^3]$	[db(A)]
L_{Lkw}	= $23,1 + 12,5 \cdot \lg(V_{Lkw})$	[db(A)]
D	= $L_{Lkw} - L_{Pkw}$	[db(A)]
p	= maßgebender Lkw-Anteil (vgl. Tab. 34)	[%]

Straßentypen	tags (6.00 bis 22.00 Uhr)	nachts (22.00 bis 6.00 Uhr)
Bundesautobahnen	25%	45%
Bundesstraßen	20%	20%
Landes- und Kreisstraßen	20%	10%
Gemeindestraßen	10%	3%

Tab. 34: Maßgebende Lkw-Anteile p (über 2,8 t zulässiges Gesamtgewicht)

Bei der Berechnung werden die notwendigen Daten (V_{Pkw} , V_{Lkw} , p und M) auf der Basis des Streckentyps für jede Kante im Netzmodell ermittelt.

Der Term zur Ermittlung des Mittelungspegels $L_m^{(25)}$ ermittelt sich wie folgt:

$$L_m^{(25)} = 37,3 + 10 \cdot \lg[M \cdot (1 + 0,082 \cdot p)]$$

mit p	= maßgebender Lkw-Anteil (vgl. Tab. 34)	[%]
M	= maßgebende Verkehrsstärke (vgl. Tab. 35)	[Kfz/h]

Straßentypen	tags (6.00 bis 22.00 Uhr)	nachts (22.00 bis 6.00 Uhr)
Bundesautobahnen	0,06 DTV	0,014 DTV
Bundesstraßen	0,06 DTV	0,011 DTV
Landes- und Kreisstraßen	0,06 DTV	0,008 DTV
Gemeindestraßen	0,06 DTV	0,011 DTV

Tab. 35: Maßgebende Verkehrsstärke M in [Kfz/h]

Der **vereinfachte Lärmmittelungspegel** L_m , der im Wirkungsmodell STRBEW ermittelt wird, ergibt sich also zu:

$$L_m = L_m^{(25)} + D_V$$

Anders als bei den Abgasemissionsermittlungen wird die Lärmemission anhand von Querschnittsbelastungen und nicht für Kantenbelastungen ermittelt. Vor einer Ermittlung der Lärmemissionen müssen die im Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML unterschiedenen Fahrtenkategorien Pkw-ortskundig und Pkw-ortsunkundig zusammengefasst werden.

5.4.5 Datenausgabe bei der Ermittlung der Abgasemissionen mit dem Wirkungsmodell STRBEW

Als Ergebnis der Ermittlung der Abgasemissionen mit dem Wirkungsmodell STRBEW werden für die beiden unterschiedenen Fahrtenkategorien Personenkraftwagen und schwere Nutzfahrzeuge jeweils die folgenden drei Belastungsdateien ausgegeben:

- kantenbezogene Abgasemissionen (fahrtrichtungsabhängig),
- mit der Streckenlänge bewertete kantenbezogene Abgasemissionen (fahrtrichtungsabhängig) und
- querschnittsbezogene Abgasemissionen (nicht fahrtrichtungsabhängig).

Als Ergebnis der Ermittlung der Lärmemissionen werden die querschnittsbezogenen mittleren Lärmemissionen ausgegeben. Dabei ist zu beachten, dass in der Belastungsdatei jeweils nur einer richtungsbezogenen Kante des Netzmodells der querschnittsbezogene mittlere Lärmemissionswert zugeordnet wird. Der Kante in der Gegenrichtung wird ein mittlerer Lärmemissionswert von 0 db(A) zugeordnet. Da das Wirkungsmodell die mittleren Lärmemissionen auf der Basis der Querschnittsbelastungen ermittelt, wäre eine Zuordnung der mittleren Lärmemissionen zu beiden Netzkanten missverständlich, da sonst der Eindruck entstehen könnte, die Lärmemissionen beider Fahrtrichtungen müssten noch zusammengefasst werden.

Eine Belastungsdatei, die das Wirkungsmodell STRBEW erzeugt, enthält für jede Kante des Netzmodells den entsprechenden Emissionswert für die zugrunde gelegten mittleren Verkehrsstärken und mittleren Reisegeschwindigkeiten. Die mit dem Wirkungsmodell STRBEW erzeugten Belastungsdateien enthalten, wie die mit dem Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML erzeugten Belastungsdateien, jeweils einen Belastungswert für jede Kante im Netzmodell und können daher mit dem Netzeditor NETMASTER betrachtet werden.

5.4.6 Auswertungsmodule BEW / BEWKAN / AUSWERT / BEWLRM

Insgesamt ist die vom Wirkungsmodell erzeugte Menge von Ergebnis-Belastungsdateien hoch. Für eine dynamische Einzelstundenumlegung können vom Wirkungsmodell STRBEW mehr als 50 Belastungsdateien ausgegebene werden. Mit dem Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML wurden für die drei unterschiedenen Fahrtenkategorien und jeweils sechs Planfälle und jeweils 19 Stunden insgesamt etwa 570 Belastungsdateien (mittlere Verkehrsstärken und Reisegeschwindigkeiten) ermittelt. Daraus wurden mit dem Wirkungsmodell STRBEW etwa 5.700 Ergebnis-Belastungsdateien erzeugt, die jeweils einem Belastungswert für jede der mehr als 7.500 Kanten im Netzmodell enthielten. Diese etwa 5.700 Ergebnis-Belastungsdateien mussten nach unterschiedlichen Gesichtspunkten ausgewertet werden. Eine Auswertung der Ergebnisse des Wirkungsmodells STRBEW wäre ohne die hierfür speziell entwickelten Auswertungsmodule nicht ohne erheblichen Zeitaufwand möglich. Die Auswertungsmodule sind für die Auswertung beliebiger Belastungsdateien geeignet und können daher nicht nur zur Auswertung der Ergebnisse des Wirkungsmodells STRBEW sondern auch zur Auswertung der Ergebnisse des Routensuch- und Umlegungsmodells ROUML verwendet werden. Insgesamt vier wichtige Auswertungsmodule sind für die Auswertung großer Datenmengen zu nennen:

- BEW (Bewertung) Auswertungsmodul für alle Netzmodellkanten,
- BEWKAN (Bewertung spezieller Kanten) Auswertungsmodul für spezielle relevante Netzmodellkanten,
- AUSWERT (Auswertung) Auswertungsmodul für spezielle Netzkantentypen,
- BEWLRM (Bewertung von Lärmemissionen) Auswertungsmodul zur Bewertung von Lärmemissionen.

- Mit dem Auswertungsmodul **BEW** sind die am höchsten differenzierten Auswertungen möglich. Eingabedaten für das Auswertungsmodul BEW sind eine Netzmodelldatei und beliebig viele zugehörige Belastungsdateien. Das Auswertungsmodul BEW listet alle Attribute und Belastungen einer einzelnen Kante aus beliebig vielen anzugebenden Belastungsdateien in der Ergebnisdatei in einer Zeile auf. Die Ergebnisdatei hat dabei für jede Kante im Netzmodell das folgende Format:

Startknoten, Endknoten, Streckentyp, Streckenlänge, Belastungswert 1, ..., Belastungswert N

Eine abschließende Aggregation der Ergebnisse des Auswertungsmodul kann in einer Tabellenkalkulation erfolgen. Ausgewertet werden können so, in Abhängigkeit von den zur Verfügung gestellten Belastungsdateien, die unterschiedlichsten Fragestellungen z.B.

- die mittlere Belastung von Bundesautobahnen,
- die Gesamtlänge der Hauptverkehrsstraßen,
- die Gesamtemissionen von NO_x an Erschließungsstraßen oder ähnliches.

- Das Auswertungsmodul **BEWKAN** reduziert die Ergebnismenge dadurch, dass eine Liste von Kanten, die untersucht werden soll, angegeben werden kann (z.B. alle Netzmodellkanten einer Bundesautobahn). Ansonsten unterscheidet sich das Auswertungsmodul nicht vom Auswertungsmodul BEW.

- Auch das Auswertungsmodul **AUSWERT** ermöglicht eine stärker aggregierte Auswertung von Belastungsdateien als das Auswertungsmodul BEW. In einer Eingabedatei für das Auswertungsmodul AUSWERT können unterschiedliche Streckentypen zu Obergruppen zusammengefasst werden. Für diese Obergruppen z.B.

- außerorts Bundesautobahnen,
Bundesstraßen,
Landes- und Kreisstraßen,
- innerorts Stadtautobahnen,
Hauptverkehrsstraßen,
Sammelstraßen,
Erschließungsstraßen

kann dann eine Auswertung der Belastungsdateien erfolgen.

- Das Auswertungsmodul **BEWLRM** ermöglicht es, eine Lärmemissionsbelastungsdatei hinsichtlich der relevanten (gesundheitsbeeinträchtigenden) Lärmemissionen zu überprüfen. Bisher konnte erst für relativ hohe Lärmemissionen von mehr als 55 db(A) eine die Gesundheit beeinträchtigende Wirkung (Schlafstörungen, Störungen der Kommunikation, Störungen der Reaktion) nachgewiesen werden [18][8]. Wie bei dem Auswertungsmodul AUSWERT können mit dem Auswertungsmodul BEWLRM unterschiedliche Streckentypen zu Obergruppen zusammengefasst werden. Für diese Obergruppen können Grenzwerte definiert werden, ab denen die Lärmbelastungen Berücksichtigung finden sollen. Für alle Netzkanten, auf denen die gesetzten Grenzwerte nicht erreicht werden, wurden die Emissionswerte auf Null gesetzt. Es ist so möglich, nur die einen Grenzwert überschreitenden Netzkanten zu berücksichtigen. Anwendung fand das Auswertungsmodul BEWLRM bisher lediglich hinsichtlich der Untersuchung von Grenzwertüberschreitungen bei Lärmemissionen. Prinzipiell kann das Auswertungsmodul jedoch zur Auswertung beliebiger Belastungsdateien genutzt werden.

6. Ergebnisse der dynamischen Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs im Großraum Hannover

6.1 Allgemeines

Dynamische Simulationen für den werktäglichen motorisierten Individualverkehr wurden im Hinblick auf zwei unterschiedliche Fragestellungen durchgeführt. Die erste Frage betraf die zusätzlichen veranstaltungsbedingten Emissionen während der EXPO 2000. Die zweite Frage war die nach den während der EXPO 2000 zu erwartenden maximalen Verkehrsstärken und den zu erwartenden verkehrlichen Schwachstellen im Großraum Hannover. Die hier dargestellten Ergebnisse können keinen vollständigen Einblick in die durchgeführten Modellrechnungen geben. Es soll in dieser Arbeit lediglich aufgezeigt werden, welche Auswertungen mit den in dieser Arbeit entwickelten Modellen möglich sind.

6.2 Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes auf Bundesautobahnen

Nach dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [6] sind die Qualitätsstufen (Level of service - LOS) wie folgt definiert:

Qualitätsstufe	mittlere Pkw-Reisegeschwindigkeit (km/h)
A	$V \geq 130$ km/h
B	$V \geq 115$ km/h
C	$V \geq 100$ km/h
D	$V \geq 85$ km/h
E	$V \geq 75$ km/h
F	$V < 75$ km/h

Tab. 36: Grenzwerte der mittleren Pkw-Reisegeschwindigkeiten auf Bundesautobahnen nach dem Handbuch zur Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS [6])

Unter den Annahmen, dass

- die Strecke S auf ihrer gesamten Länge gleichbleibende Fahrbahneigenschaften - insbesondere eine konstante Längsneigung - aufweist und
- die Fahrzeuge deshalb die Strecke mit im Mittel gleichbleibender Geschwindigkeit befahren können (d. h. stationärer Verkehrsfluss über den Weg),

kann die mittlere Reisegeschwindigkeit **näherungsweise** mit der mittleren momentanen Geschwindigkeit gleichgesetzt werden.

$$V_{\text{mom}} \approx V_R = S/t_R$$

mit V_{mom} = mittlere momentane Geschwindigkeit [km/h]

V_R = mittlere Pkw-Reisegeschwindigkeit [km/h]

S = Länge einer knotenpunktfreien Autobahnstrecke mit gleichbleibenden Fahrbahneigenschaften [km]

t_R = mittlere Reisezeit für die Strecke [h]

Nach dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS [6]) ist eine kritische Verkehrsstärke auf Bundesautobahnen bei einer als kritisch anzusehenden momentanen Grenzggeschwindigkeit von $V_{\text{krit}}=75$ km/h dann erreicht, wenn je Fahrstreifen eine Verkehrsdichte von 25 Kfz/km vorliegt.

Dabei ergibt sich dann mit für einen Fahrstreifen

$$q_{\max} = V_{\text{krit}} * k_{\text{krit}} = 75 \text{ km/h} * 25 \text{ Kfz/km} = 1.875 \text{ Kfz/(h*Fahrstreifen)}$$

mit q_{\max}	= maximale Verkehrsstärke je Fahrstreifen (= C)	[Kfz/km]
V_{krit}	= kritische momentane Geschwindigkeit beim Erreichen der Kapazität	[km/h]
k_{krit}	= kritische Verkehrsdichte beim Erreichen der Kapazität	[Kfz/km]

Eigene Messungen im morgendlichen Berufsverkehr haben im Großraum Hannover jedoch auch schon deutlich höhere mittlere Fahrstreifenbelastungen von bis zu 2.150 Kfz/h ergeben. Auf dem Überholfahrstreifen wurden auf dem im Jahre 1994 noch zweistreifigen Streckenabschnitt zwischen der AS Rehren und der AS Wunstorf/Luthe in der Untersuchung „Auswirkungen der Geschwindigkeitsbeschränkung auf der A 2 im Raum Hannover“ [53] im morgendlichen Berufsverkehr sogar Verkehrsstärken bis zu 2.723 Kfz/h über einen längeren Zeitraum erreicht, ohne dass es zum Zusammenbruch des Verkehrsablaufes gekommen ist.

Auch Auswertungen von Zählschleifen aus der Region Frankfurt zeigen, dass Verkehrsstärken von deutlich mehr als 1.850 Kfz/h möglich und im Berufsverkehr sogar regelmäßig ohne Störungen abzuwickeln sind. Für die Verkehrsplanungen für die EXPO 2000 wurden daher in mehreren Gutachten [47] [48] [49][50] [52] die aus Tabelle 37 zu entnehmenden drei Stufen zur Beurteilung der Verkehrsqualität herangezogen. Bei Verkehrsstärken von mehr als 1.850 Kfz/h je Fahrstreifen werden auf Bundesautobahnen generell nur noch Geschwindigkeiten von weniger als 80 Km/h erreicht.

sehr störanfällig (bzw. nicht abwickelbar) mehr als 2.250 Kfz/h je Fahrstreifen
unumgängliche Maßnahmen unter Beibehaltung von Teilmängeln <ul style="list-style-type: none"> • dreistreifige Fahrbahnmarkierungen, • Einrichtung von Sonderfahrstreifen durch zeitlich begrenzte Mitbenutzung des Standstreifens für Personenkraftwagen am Samstag und Sonntag • umfangreiche flankierende Maßnahmen, alternativ besser weniger störanfällige Maßnahmen <ul style="list-style-type: none"> • Steuerung der Besucheranzahl/-anreiserichtungen über den Kartenvorverkauf oder • Neubau und/oder • Umleitung von Fahrzeugströmen.
störanfällig 1.850 Kfz/h bis 2.250 Kfz/h je Fahrstreifen
notwendige Maßnahmen <ul style="list-style-type: none"> • $V_{\text{zul}} \leq 100 \text{ km/h}$ und • Lkw-Überholverbot • flankierende Maßnahmen, alternativ besser weniger störanfällige Maßnahmen <ul style="list-style-type: none"> • Steuerung der Besucheranzahl/-anreiserichtungen über den Kartenvorverkauf oder • Einrichtung einer Verkehrsbeeinflussungsanlage
wenig störanfällig bis 1.850 Kfz/h je Fahrstreifen
notwendige Maßnahmen <ul style="list-style-type: none"> • flankierende Maßnahmen sichern einen optimalen Verkehrsfluss (kleinere bauliche oder betriebliche Maßnahmen)

Tab. 37: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes auf Bundesautobahnen

6.3 Abschätzung der Emissionsbelastungen

6.3.1 Allgemeines

Die zielorientierte Planung und die nachfrageorientierte Planung standen sich bei der Verkehrsplanung zur EXPO 2000 immer wieder konkurrierend gegenüber. Ziel der EXPO 2000 GmbH als Gesellschaft, die die Weltausstellung plant und durchführt, muss es sein, die Großveranstaltung EXPO 2000 zu einem wirtschaftlichen Erfolg zu machen. Dazu muss die angestrebte Anzahl von 40 Mio. Besuchen zumindest erreicht oder besser noch überschritten werden. Ein weiteres Ziel der EXPO GmbH muss es auch sein, den durch die EXPO-Besucher erzeugten zusätzlichen Kraftfahrzeugverkehr für die Region verträglich zu gestalten. Regelmäßig auftretende Staus auf den Bundesautobahnen und Bundesstraßen in der Region Hannover würden auch den wirtschaftlichen Erfolg der Großveranstaltung EXPO 2000 gefährden, da die Besucher ausbleiben könnten. Auch die Akzeptanz der Weltausstellung durch die Einwohner der Region wäre gefährdet. Die lange Dauer der Veranstaltung und die Regelmäßigkeit des zu erwartenden EXPO-bedingten Kraftfahrzeugverkehrs lässt eine Abschätzung der Folgen für die Umwelt und besonders für die direkt betroffenen Anwohner sinnvoll erscheinen.

Besonders interessant ist im Hinblick auf die Emissionen des erwarteten Besucherverkehrs ein Vergleich zwischen den zielorientierten Verkehrsplanung, bei der die Lenkung des EXPO-bedingten Zusatzverkehrs ausschließlich über die Bundesautobahnen und die Schnellwege direkt zum Weltausstellungsgelände geplant ist, und den nachfrageorientierten Szenarien, in denen auch das nachgeordnete Straßennetz zum Zuführen des EXPO-bedingten Zusatzverkehrs zum Weltausstellungsgelände genutzt werden muss. Durch diese Gegenüberstellung können wichtige Hinweise für eine Priorisierung der einen oder anderen Planungsmethodik bei Großveranstaltungen gefunden werden. Ziel der Ermittlung der Emissionen im Rahmen dieser Arbeit ist es, die Ergebnisse der Verkehrsumlegungen für den motorisierten Individualverkehr im Großraum Hannover dafür zu nutzen, um die Emissionsbelastungen Kohlenwasserstoff (HC), Stickoxiden (NO_x), Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) sowie Lärm an Hauptverkehrsstraßen im Großraum Hannover für beide Varianten zur Führung des EXPO-bedingten Zusatzverkehrs zu ermitteln.

Zur Ermittlung der Abgasemissionen wurde in den untersuchten Planfällen die prognostizierte Anreisespitzenstunde zur EXPO 2000 von 10.00 Uhr bis 11.00 Uhr untersucht. In dieser Stunde ist der Anteil des stark gerichteten EXPO-bedingten Zusatzverkehrs am größten und die Auswirkungen der EXPO 2000 auf den Verkehrsablauf in der Region Hannover lassen sich am deutlichsten ablesen.

Auch dem "Treibhausgas" CO_2 , das seit den 80er Jahren etwa zu 50% für den weltweiten Treibhauseffekt verantwortlich ist, sollte besondere Beachtung geschenkt werden. Für die Ermittlung der CO_2 -Emissionen durch den Kraftfahrzeugverkehr im Großraum Hannover ist lediglich die Gesamtemission über den Tag bzw. über den gesamten Zeitraum der Großveranstaltung EXPO 2000 oder das Jahr von Bedeutung, da CO_2 für den Menschen nur indirekt über seine Wirkung als Treibhausgas eine Gefährdung darstellt. Zur Ermittlung der täglichen Emission von CO_2 während der Großveranstaltung EXPO 2000 wurden daher die einzelnen stündlichen Verkehrsmatrizen nacheinander auf das Netzmodell umgelegt und anschließend kumuliert. Die einzelnen Verkehrszustände wie Haupt-, Mittel und Schwachverkehrszeiten konnten so deutlich genauer abgebildet werden als mit herkömmlichen Verkehrsumlegungen auf der Basis von mittleren Tagesverkehrsmatrizen.

Die Lärmemissionen wurden ebenso wie die CO_2 -Emissionen über den ganzen Tag ermittelt, da ohne eine detaillierte Prüfung nicht eindeutig vorherzusagen war, ob die Lärmemission auf den Bundesautobahnen und den Stadtautobahnen in den Normalverkehrszeiten mit einem relativ freien Verkehrsfluss und einer geringen Verkehrsbelastung höher ist als in den gebundenen oder zumindest teilgebundenen Verkehrszuständen

während der Hauptverkehrszeiten. Zur Ermittlung der Lärmemissionen während der Großveranstaltung EXPO 2000 wurden daher ebenfalls die einzelnen mittleren stündlichen Verkehrsmatrizen nacheinander auf das Netzmodell umgelegt.

Die prognostizierten Besucherzahlen weisen für die unterschiedlichen Wochentage eine erhebliche Schwankungsbreite auf (vgl. Abb. 6, S. 7). An Samstagen, Sonntagen und Feiertagen wird nach den Planungen für die EXPO 2000 eine maximale Besucheranzahl von bis zu 400.000 Besuchern zugelassen. An Werktagen soll eine Mengenbegrenzung auf maximal 370.000 Besucher vorgenommen werden. Die durchschnittliche Besucherzahl liegt nach den Prognosen der EXPO 2000 GmbH bei ca. 265.000 Besuchen je Tag. In der Untersuchung „Wochentagspezifische Schwachstellenanalyse für Bundesfernstraßen während der Weltausstellung EXPO 2000“ [48] wurde aufgezeigt, dass an Werktagen schon ab Besucherzahlen von 300.000 Besuchern an einem Tag mit teilweise störanfälligem Verkehrsablauf auf den Bundesautobahnen um Hannover zu rechnen ist. Die Emissionsberechnungen in dieser Arbeit erfolgen auf der Basis eines Werktages, an dem 300.000 Besucher das Weltausstellungsgelände der EXPO 2000 erreichen wollen. 300.000 Besucher werden an Werktagen nach den Prognosen der EXPO 2000 GmbH etwa an 25% der Werktage erreicht oder überschritten.

Die Auswertungen, welche Straßen am stärksten vom EXPO-bedingten Zusatzverkehr betroffen sind, erfolgte für die folgenden Straßentypen:

- Bundesautobahnen,
- Bundesstraßen (außerorts),
- Landes- und Kreisstraßen (außerorts),
- Stadtautobahnen,
- Hauptverkehrsstraßen,
- Sammelstraßen und
- Erschließungsstraßen.

Die Auswertung der Abgasemissionen erfolgte in drei Stufen.

- **Stufe 1: absolute Abgasemission**

Als erstes wurden die Summen der Emissionen getrennt nach den untersuchten Straßentypen ermittelt. Dadurch lässt sich ermitteln, wie hoch die Gesamtemissionen auf den untersuchten Straßentypen und im Großraum Hannover sind. Da die einzelnen Straßentypen unterschiedlich große Anteile am Gesamtnetz des Großraumes Hannover haben, sind die Konzentrationen der Abgasemissionen so noch nicht zu ermitteln.

- **Stufe 2: normierte Abgasemission (je km eines Straßentyps)**

Da die Summe der Emissionen auf den einzelnen Straßentypen wenig Aussagen über Konzentrationen von Schadstoffen zulässt, wurde in der zweiten Stufe der Ermittlung der Abgasemissionen eine Normierung der Emissionen auf jeweils einen Kilometer Straßenlänge jedes untersuchten Straßentyps durchgeführt. Die mittleren Konzentrationen der Abgasemissionen für die untersuchten Straßentypen sind so zu erkennen.

- **Stufe 3: gewichtete Abgasemission (gewichtet mit Anzahl der Anwohner je Kilometer eines Straßentyps)**

In der dritten Stufe der Ermittlung der Abgasemissionen wurden anhand der Einwohnerpunktekarte der Stadt Hannover für die untersuchten Straßentypen pauschale mittlere Anwohnerzahlen ermittelt. Um die Betroffenheit der Anwohner an den untersuchten Straßentypen richtig einordnen zu können, wurde die in der zweiten Stufe der Ermittlung der Abgasemissionen normierte Abgasemission je Kilometer jedes Straßentyps mit den mittleren Anwohnerzahlen je Kilometer gewichtet (vgl. Abb. 65, S. 116).

6.3.2 Entwicklung der Abgasemissionsbelastungen

Die Verkehrszusammensetzungen können für Deutschland WEST (D_W_BASIS) und Deutschland OST (D_O_BASIS) unterschieden werden. Für die Berechnungen der Emissionsbelastungen während der EXPO 2000 in Hannover wurde die Verkehrsbelastung Deutschland West zugrunde gelegt. Aus den Abbildungen 50 und 51 gehen die prozentualen Reduktionen der Abgasemissionen nach dem Handbuch für Emissionsfaktoren im Straßenverkehr [27] bezogen auf die Abgasemissionen aus dem Jahr 1990 hervor. Die in den Abbildungen 50 bis 59 dargestellten Reduktionen wurden exemplarisch für die Verkehrssituation HVS>50_2 (vgl. Tab. 31 und 32) ermittelt andere Verkehrssituationen ergeben aber prinzipiell ähnliche Reduktionen.

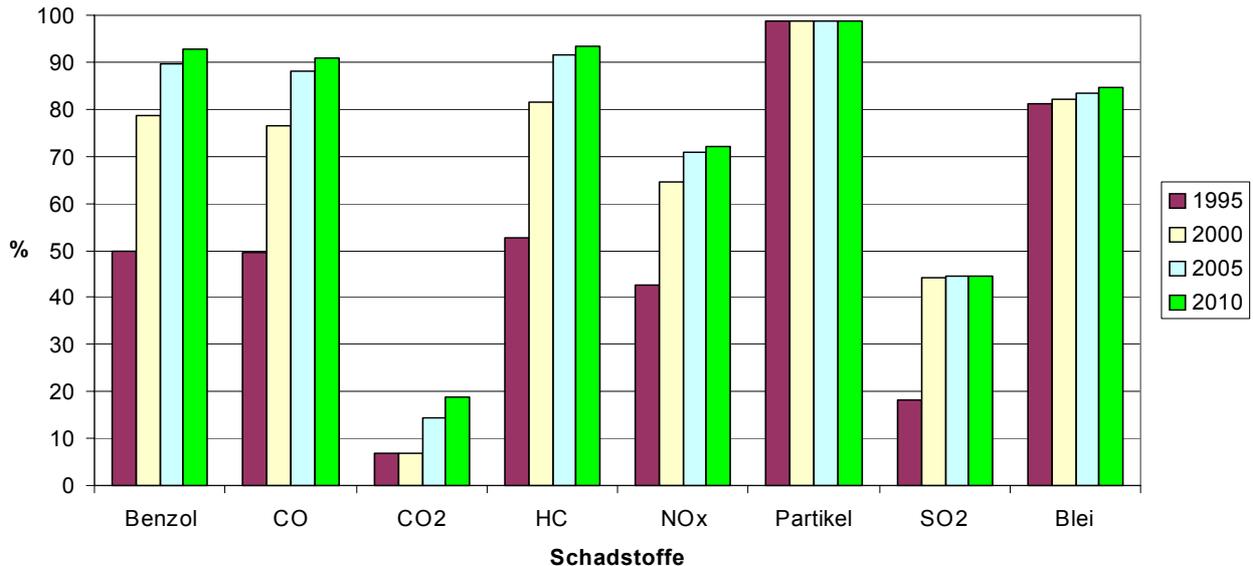


Abb. 50: Prozentuale Reduktion der Abgasemissionen von Personenkraftwagen (Bezugsjahr 1990)

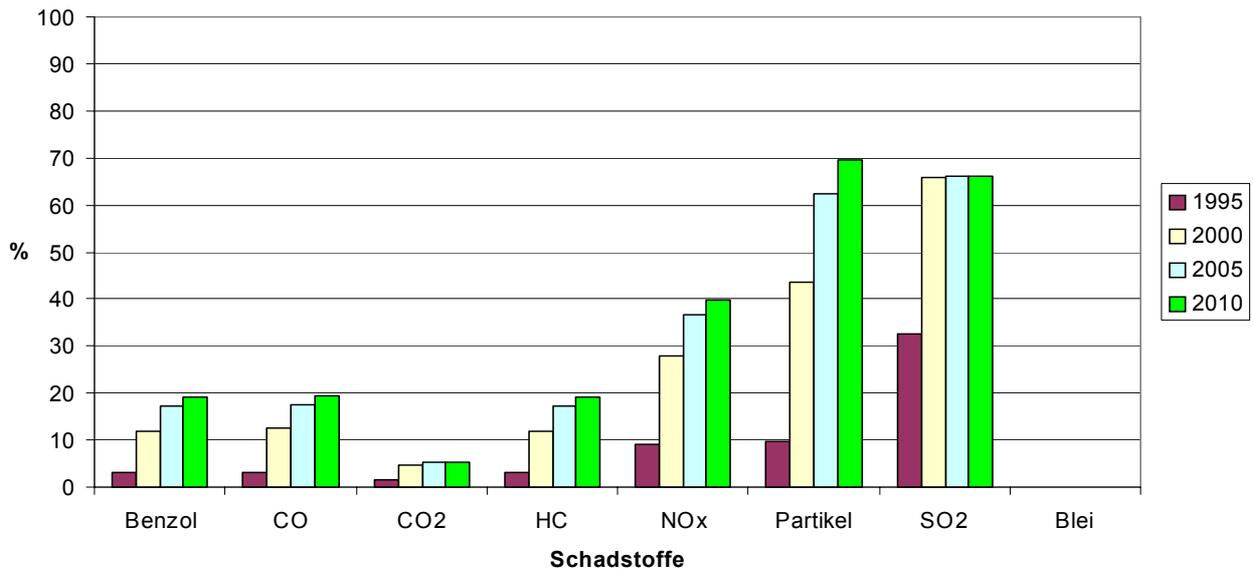


Abb. 51: Prozentuale Reduktion der Abgasemissionen von Lastkraftwagen (Bezugsjahr 1990)

Aus den Abbildungen 50 und 51 ist zu erkennen, dass die Potentiale für eine Reduktion der Abgasmissionen eines einzelnen Personenkraftwagens deutlich höher sind als bei den Abgasmissionen eines einzelnen Lastkraftwagens. Generell ist zu erkennen, dass die Reduktionen der Abgasmissionen bei Personenkraftwagen zum Teil sehr groß sind. Schon die Berücksichtigung der EURO2-Norm ab dem Jahr 1997 liefert Reduktionen der Schadstoffe, die teilweise deutlich über 50% liegen. Die EURO3-Norm, die im Handbuch für Emissionsfaktoren ab dem Jahr 2001 Berücksichtigung findet, führt noch einmal zu einer stärkeren Reduktion der Abgasmissionen. Im Zeitraum von 1990 bis zum Jahr 2010 sind nach dem „Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ [27] bei Personenkraftwagen bei der Emission von Benzol, Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoff (HC) und bei dem Ausstoß von Partikeln und Blei Reduktionen um mehr als 80 Prozent möglich. Bei den Lastkraftwagen (schwere Nutzfahrzeuge) ist im selben Zeitraum nur für die Emission von Partikeln und für die Emission von Schwefeldioxid eine Reduktion der Emission um mehr als 50 Prozent möglich.

Aus den prozentualen Reduktionspotentialen in den Abbildungen 50 und 51 ist der Unterschied für die emittierten Mengen zwischen den in dieser Untersuchung betrachteten Fahrzeugkategorien (Pkw und Lastkraftwagen(SNF)) nicht zu entnehmen. Um eine Vergleichbarkeit der im „Handbuch für Emissionsfaktoren im Straßenverkehr“ [27] zugrunde gelegten Reduktion zwischen den Personenkraftwagen (Pkw) und den Lastkraftwagen (SNF) herzustellen, wurden für die betrachteten Abgasmissionen jeweils die Emissionen eines Personenkraftwagens denen eines Lastkraftwagens (SNF) gegenübergestellt (vgl. Abb. 52 bis 59).

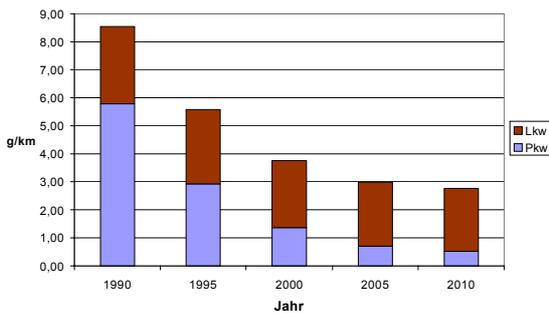


Abb. 52: Reduktion der Emission von CO

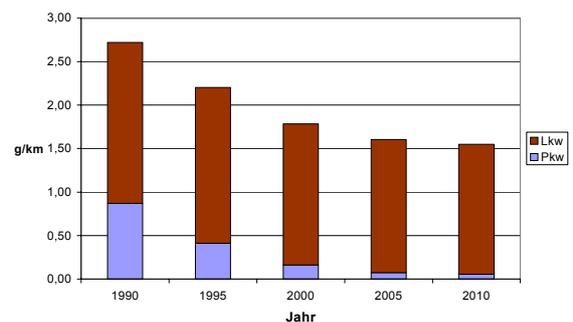


Abb. 53: Reduktion der Emission von HC

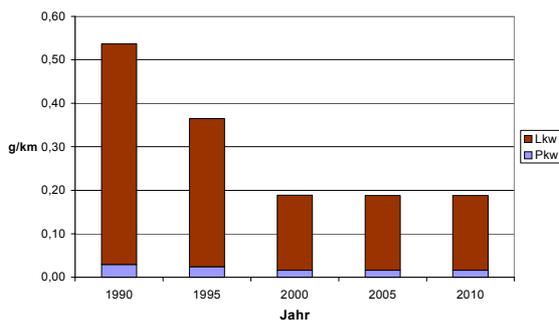


Abb. 54: Reduktion der Emission von SO₂

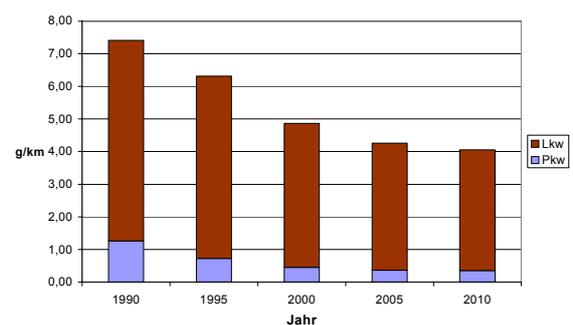


Abb. 55: Reduktion der Emission von NO_x

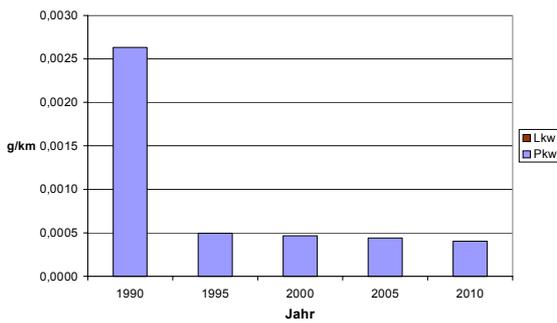


Abb. 56: Reduktion der Emission von Blei

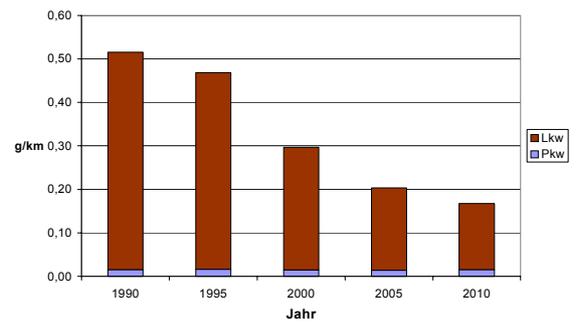


Abb. 57: Reduktion der Emission von Partikeln

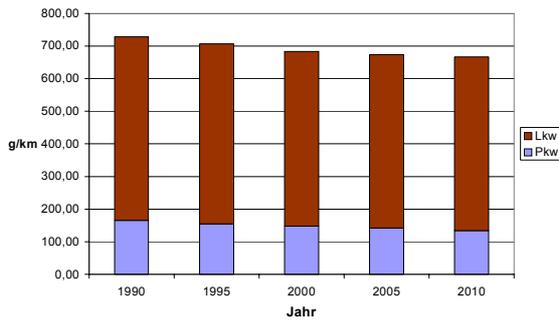


Abb. 58: Reduktion der Emission von CO₂

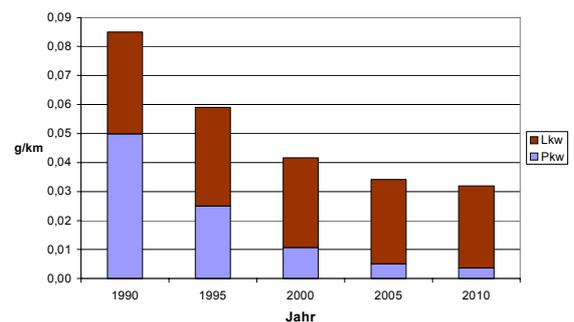


Abb. 59: Reduktion der Emission von Benzol

Für Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoff (HC) und Benzol (vgl. Abb. 52, 53 und 59) ist zu erkennen, dass die Emissionen von Personenkraftwagen deutlich stärker zurückgehen als die Emissionen der Lastkraftwagen (SNF). Die Emission von Blei ist mit der Einführung des bleifreien Benzines sehr stark zurückgegangen (vgl. Abb. 56). Für Lastkraftwagen (SNF) können im Zeitraum von 1990 bis 2010 lediglich die Emissionen von Schwefeldioxid (SO₂) und Stickoxiden (NO_x) drastisch vermindert werden (vgl. Abb. 54 und 55). Für Personenkraftwagen wird die Emission von Schwefeldioxid (SO₂) kaum noch verringert.

Generell lässt sich aus den Abbildungen 52 bis 59 ablesen, dass nach dem Jahr 2000 mit einer deutlichen Verlangsamung der Reduktion der Emissionen durch eine Fahrzeugflottenverjüngung zu rechnen ist. Weitere drastische Reduktion der Emissionen von Schadstoffen sind dann nur noch mit sehr hohem technischen Aufwand und entsprechend hohen Kosten oder durch eine Verringerung der Fahrleistung zu erreichen.

Für die Emission von CO₂ sind aus Abbildung 58 sowohl für Personenkraftwagen als auch für Lastkraftwagen (SNF) nur geringe Reduktionen zu erkennen. Im Zeitraum von 1990 bis 2010 ist nach dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [27] für Lastkraftwagen (SNF) lediglich eine Reduktion von etwa 5% zu erwarten (vgl. Abb. 51). Im selben Zeitraum wird für Personenkraftwagen für die betrachtete Verkehrssituation HVS>50_2 eine Reduktion der CO₂-Emissionen um etwa 20% erreicht (vgl. Abb. 50).

6.3.3 Untersuchte Planfälle

- Der **Planfall A01** ist der Analysenullfall; er dient überwiegend zum Kalibrieren der Verkehrsmatrizen. Durch die flächendeckenden Verkehrserhebungen für die Verkehrsmengenkarte von Niedersachsen im Jahre 1995 konnte auf einer sehr guten Datenbasis aufgebaut werden.
- Der **Planfall A02** ist ein fiktiver Planfall. Die Verkehrsmatrizen aus dem Jahr 1995 wurden dabei auf das Straßennetz des Jahres 2000 umgelegt. Dadurch ist es möglich, die Auswirkungen der umfangreichen Ausbaumaßnahmen im Bundesautobahnnetz isoliert aufzuzeigen, ohne dass der Verkehrsanstieg in der Region Hannover bis zum Jahr 2000 das Ergebnis der Verkehrsumlegungen beeinflusst.
- Der **Planfall P0** ist der Prognosenullfall. Er dient zum Aufzeigen der Verkehrsbelastungen im Jahr 2000 auf dem ausgebauten Straßennetz des Jahres 2000. Mit dem Prognosenullfall P0 werden die prognostizierten Verkehrsbelastungen im Großraum Hannover für das Jahr 2000 ohne die Einflüsse der EXPO 2000 dargestellt. Durch den Vergleich des Analysenullfalles A0 mit dem Prognosenullfall P0 lassen sich die Verkehrsentwicklung in der Region Hannover beschreiben.

In den Planfällen P1, P2 und P3 wird zusätzlich zum werktäglichen Kraftfahrzeugverkehr im Jahr 2000 auch der EXPO-bedingte Zusatzverkehr abgebildet. Die Planfälle P1 und P2 sind Planfälle, die eine zielorientierte Verkehrsplanung für die EXPO 2000 abbilden. Diese Planfälle setzen eine die Verkehrsmittelwahl beeinflussende Ticketingstrategie durch die EXPO 2000 GmbH zugunsten der Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel voraus. Im Planfall P3 wird eine nachfrageorientierte Verkehrsplanung für die EXPO 2000 zugrunde gelegt, in dem das in der Kundenbefragung [38] ermittelte Wunschanreiseverhalten unterstellt wird.

- Der **Planfall P1** ist ein idealisierter Planfall. Im Planfall P1 wird der EXPO-bedingte Zusatzverkehr vom Umlegungsmodell wie der ortskundige Personenverkehr in der Region Hannover behandelt. Der EXPO-bedingte Zusatzverkehr wählt dabei optimale Wege (Szenario freie Wegewahl) und benutzt dabei auch das den Bundesautobahnen nachgeordnete Straßennetz. Die Routenwahlentscheidung jeder einzelnen Fahrtbeziehung erfolgt unter Kenntnis der Verkehrszustände aller Netzelemente. Dieser Planfall repräsentiert eine in der Praxis nicht zu erreichende optimale Verkehrssteuerung. Er führt dadurch aber zu einem optimalen Verkehrsfluss im Netzmodell.
- Im **Planfall P2** wurde die Lenkungsstrategie nach dem Lenkungskonzept für die Weltausstellung EXPO 2000 im Modell nachgebildet [2].
- Auch dem **Planfall P3** liegt die Lenkungsstrategie nach dem Lenkungskonzept für die Weltausstellung EXPO 2000 zugrunde [2]. Im Unterschied zum Planfall P2 werden im Planfall P3 jedoch keine die Verkehrsmittelwahl beeinflussenden Maßnahmen ergriffen. Alle Besucher, die mit dem eigenen Personenkraftwagen anreisen wollen, können dies im Planfall P3 auch tun. Nach der Kundenbefragung im Auftrag der EXPO GmbH sind dies etwa 56% der Besucher [38].

Planfall A01	Analysenullfall	1995	- Verkehrsmatrizen - Verkehrsnetz	1995 1995
	kein EXPO-bedingter Zusatzverkehr Planfall zum Kalibrieren der Verkehrsmatrizen			
Planfall A02	Analysenullfall	1995	- Verkehrsmatrizen - Verkehrsnetz	1995 2000
	kein EXPO-bedingter Zusatzverkehr Planfall zum Abschätzen der Auswirkungen des Ausbaus der Bundesautobahnen auf Drei- bzw. Sechsstreifigkeit			
Planfall P0	Prognosenufall	2000	- Verkehrsmatrizen - Verkehrsnetz	2000 2000
	kein EXPO-bedingter Zusatzverkehr Planfall zum Abschätzen der Auswirkungen der Normalverkehrsentwicklung bis zum Jahr 2000			
Planfall P1	Planfall 1	2000	- Verkehrsmatrizen - Verkehrsnetz	2000 2000
300.000 Besucher werktags	zielorientiert gesteuerter EXPO-bedingter Zusatzverkehr - 25.000 Stellplätze am Weltausstellungsgelände - 11.500 Stellplätze auf der Dreiecksfläche in Laatzien Planfall zum Abschätzen der Auswirkungen des EXPO-bedingten Zusatzverkehrs bei zeitoptimaler Wegewahl (idealisierte Verkehrssteuerung die eine optimale Verkehrsverteilung im Netzmodell voraussetzt)			
Planfall P2	Planfall 2	2000	- Verkehrsmatrizen - Verkehrsnetz	2000 2000
300.000 Besucher werktags	zielorientiert gesteuerter EXPO-bedingter Zusatzverkehr - 25.000 Stellplätze am Weltausstellungsgelände - 11.500 Stellplätze auf der Dreiecksfläche in Laatzien Planfall zum Abschätzen der Auswirkungen des EXPO-bedingten Zusatzverkehrs nach dem Lenkungskonzept für die Weltausstellung EXPO 2000 [2]			
Planfall P3	Planfall 3	2000	- Verkehrsmatrizen - Verkehrsnetz	2000 2000
300.000 Besucher werktags	nachfrageorientierter EXPO-bedingter Zusatzverkehr (56% mit Pkw) - 55.700 Stellplätze am Weltausstellungsgelände - 11.500 Stellplätze auf der Dreiecksfläche in Laatzien Planfall zum Abschätzen der Auswirkungen des EXPO-bedingten Zusatzverkehrs bei nachfrageorientierter Planung			

Tab. 38: Untersuchte Planfälle

6.3.4 Absolute Abgasemissionen

Da für die meisten Abgasemissionen die absoluten Emissionen für einen Raum oder einen Straßentyp von geringer Bedeutung sind, werden hier nur die absoluten Abgasemissionen von Kohlendioxid erläutert.

Die Emission von Kohlendioxid wurde direkt proportional zum verbrauchten Kraftstoff ermittelt. Durch den Verbrennungsprozess, bei dem Sauerstoff aus der Luft beteiligt ist, sind die erzeugten Mengen Kohlendioxid in kg/h jedoch deutlich größer als die verbrauchte Menge Kraftstoff in kg/h. Anders als die anderen Abgasemissionen, bei denen die Konzentrationen der Abgase eine wichtige Rolle spielen, ist bei der Ermittlung der CO₂-Emissionen eher die Gesamtemission von Bedeutung, da CO₂ lediglich durch seine den Treibhauseffekt steigernde Wirkung als Schadstoff anzusehen ist.

Zur Ermittlung der täglichen bzw. jährlichen Gesamtemission von Kohlendioxid im Großraum Hannover wurde der Verkehrsablauf im Großraum Hannover während der EXPO 2000 über einen Tag (19 Stunden von 5.00 bis 24.00 Uhr) mit dem Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML abgebildet.

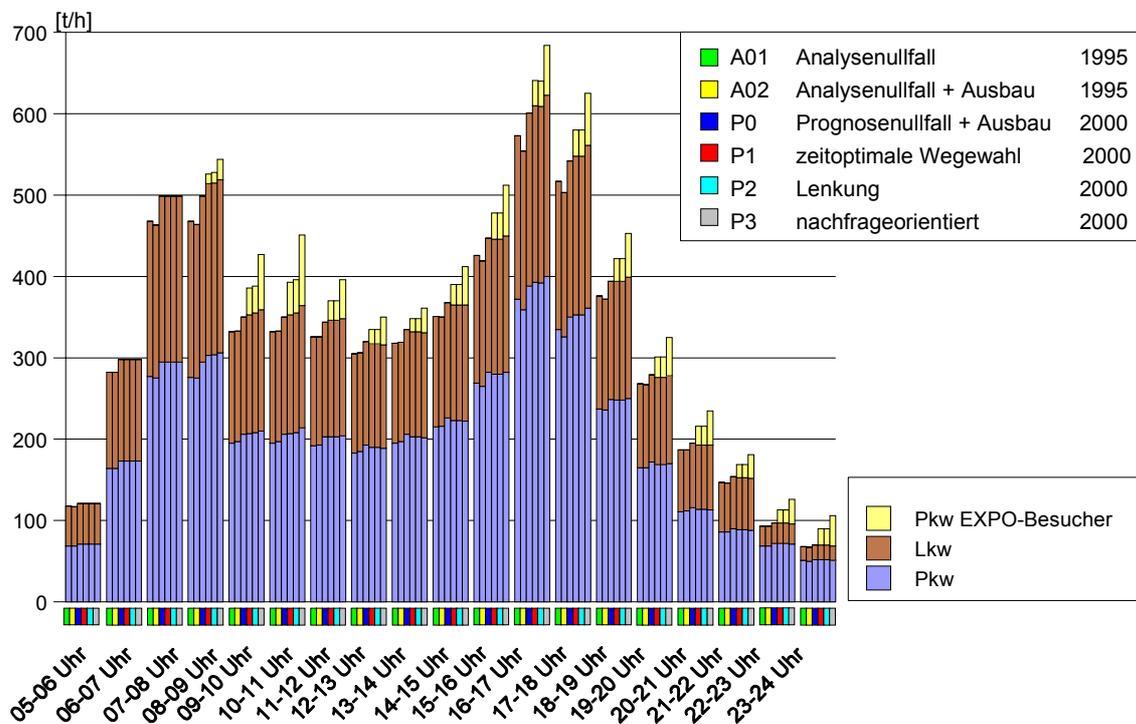


Abb. 60: Absolute Emission von CO₂ im Großraum Hannover im Verlauf eines Tages während der EXPO 2000

Mit dem Einsetzen des EXPO-bedingten Zusatzverkehrs ab etwa 8.00 Uhr, ist sowohl bei dem Schwerverkehr als auch beim werktäglichen Normalverkehr mit Personenkraftwagen eine leichte Zunahme der CO₂-Emissionen gegenüber dem Prognosenullfall (Planfall P0) zu erkennen (vgl. Abb. 60, S. 110). In der Anreisepitzenstunde zur EXPO 2000 von 10.00 bis 11.00 Uhr sind die absoluten Emissionen von CO₂ durch den EXPO-bedingten Zusatzverkehr am größten. Erstaunlich hoch sind die absoluten Emissionen von CO₂ jedoch auch in der nachmittäglichen Hauptverkehrszeit. Obwohl im Zeitraum von 16.00 bis 18.00 Uhr der Anteil des EXPO-bedingten Zusatzverkehrs deutlich geringer ist als in der Anreisepitzenstunde von 10.00 bis 11.00 Uhr (vgl.

Abb. 7, S. 8), wird in der nachmittäglichen Hauptverkehrszeit durch den EXPO-bedingten Zusatzverkehr fast ebensoviel CO₂ emittiert wie in der Anreisespitzenstunde. Der Grund dafür ist das insgesamt höhere Verkehrsaufkommen in der nachmittäglichen Hauptverkehrszeit (vgl. Abb. 21, S. 49) und die teilweise umwegige Abreise des EXPO-bedingten Zusatzverkehrs vom Weltausstellungsgelände (vgl. Abb. 4, S. 5).

Der prozentuale Anteil der CO₂-Emissionen durch Personenkraftwagen von Besuchern der EXPO 2000 an der Gesamtemission von CO₂ ist in den späten Abendstunden am höchsten. Bei einer nachfrageorientierten Verkehrsplanung (Planfall P3) wären die CO₂-Emissionen durch die Personenkraftwagen von EXPO-Besuchern doppelt so hoch wie bei einer zielorientierten Verkehrsplanung (Planfall P1 und P2).

Das Ergebnis der einzelnen Verkehrsmodellrechnungen für die Stundenintervalle (vgl. Abb. 61) wurde anschließend wieder zu einer Tagesemission zusammengefasst und für die untersuchten Straßentypen ausgewertet (vgl. Abb. 61).

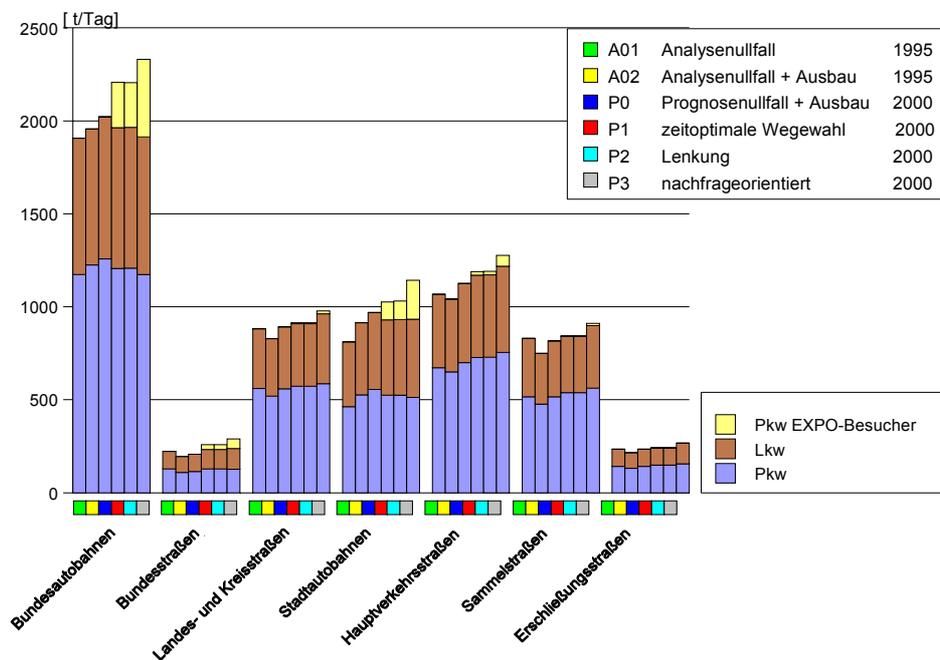


Abb. 61: Absolute Emission von CO₂ in t/Tag während der Weltausstellung EXPO 2000

CO₂ wird durch den EXPO-bedingten Zusatzverkehr fast ausschließlich an Bundesautobahnen und Stadtautobahnen emittiert. Zu erkennen ist, dass es durch den Ausbau der Bundesautobahnen im Planfall A02 gegenüber dem Planfall A01 zu erhöhten Kohlendioxidemissionen auf den Bundesautobahnen und den Stadtautobahnen kommt (vgl. Abb. 61), auf den anderen Straßentypen werden die Kohlendioxidemissionen verringert.

Insgesamt ergibt sich für den Großraum Hannover im Planfall A02 sogar ein leichter Rückgang der Kohlendioxidemissionen (vgl. Abb. 62). Dies war so nicht zu erwarten. Es wurde daher in einer Analyse der Differenzen der Verkehrsbelastungen im Großraum Hannover für die Planfälle A01 und A02 der Ursache für diesen leichten Rückgang der Emissionen nachgegangen. Da bei beiden Planfällen dieselbe Fahrtenmatrix für das Jahr 1995 verwendet wurde und da die im Netzmodell für das Jahr 2000 ausgebauten Streckenabschnitte jeweils am Großraumrand liegen, kann es am Großraumrand, der gleichzeitig Netzmodellrand ist, zu keiner Erhöhung des Verkehrsstärken kommen. Am Netzmodellrand wird in beiden Planfällen dieselbe Verkehrsstärke aus der Fahrtenmatrix für das Jahr 1995 in das Netzmodell eingespeist. Die potentiell von einer

Verringerung der Reisezeiten auf den Bundesautobahnen profitierenden Städte und Gemeinden (Verkehrszellen) liegen außerhalb des Großraumes Hannover. Die Auswirkungen eines Ausbaus der Bundesautobahnen wird daher im Modell unterschätzt. Zu einer tatsächlichen Verringerung der Kohlendioxidemissionen durch den Ausbau der Bundesautobahnen wird es nicht kommen. Es ist eher von einer Erhöhung der Kohlendioxidemissionen auszugehen. Im verwendeten Netzmodell kommt es durch die Überlagerung unterschiedlicher Ausbau- und Umbaumaßnahmen im Großraum Hannover zu dieser leichten Abnahme der Kohlendioxidemissionen. Die Unterschätzung der Auswirkungen des Ausbaus der Bundesautobahnen bezieht sich netzmodellbedingt auf alle Emissionen. Die Aussagen die aus dem Planfall A02 abgeleitet werden können, sind modellbedingt demensprechend gering.

Hier zeigt sich wieder einmal deutlich, dass es erforderlich ist bei der Interpretation von Modelldaten sehr vorsichtig zu sein. Ein Verkehrsplaner muss kritisch bleiben und die Ergebnisse des Modells immer wieder hinsichtlich der Plausibilität prüfen. Ein Modell kann nicht für jede Fragestellung aussagekräftige Ergebnisse liefern, wenn Randbedingungen, die modellbedingt sind, das Ergebnis beeinflussen.

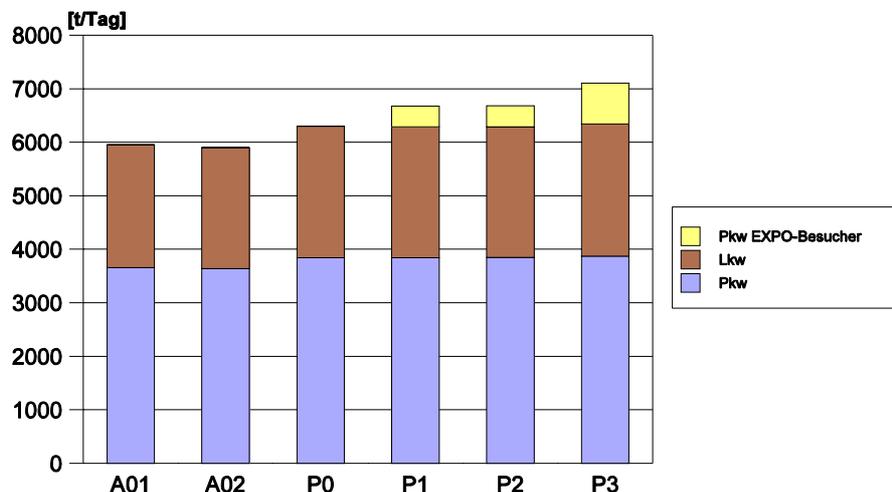


Abb. 62: Absolute tägliche Emission von CO₂ in t/Tag während der EXPO 2000 nach Planfällen

Zur Berechnung der jährlichen Kohlendioxidemissionen muss man berücksichtigen, dass sich der hier abgebildete werktägliche Verkehr für den Großraum Hannover auf einen fünfmonatigen Zeitraum bezieht, in dem auf den Bundesautobahnen saisonbedingt durch Urlaubsverkehr mit einem gegenüber dem Jahresmittel erhöhten Verkehrsaufkommen zu rechnen ist. Eine Auswertung der Dauerzählstelle Berkhof hat ergeben, dass der Jahresmittelwert der Verkehrsstärke auf der Bundesautobahn A7 nur etwa 87% der mittleren Verkehrsstärke des Zeitraumes von Juni bis Oktober ausmacht. Legt man dies für den Großraum Hannover zugrunde, so ergibt sich für das Jahr 1995 eine jährliche Kohlendioxidemission von 1,95 Mio. t/a durch den Kraftfahrzeugverkehr im Großraum Hannover. Für das Jahr 2000 ergibt sich eine Kohlendioxidemission von 2,06 Mio. t/a durch den Kraftfahrzeugverkehr (vgl. Tab. 39).

Planfall	CO ₂ fließender Kfz-Verkehr [t/a]	CO ₂ Startzuschläge [t/a]	CO ₂ insgesamt [t/a]
A01 Analysenullfall 1995	1.890.375 [96,8%]	62.431 [3,2%]	1.952.806 [100,0%]
P0 Prognosenullfall 2000	2.001.200 [97,2%]	58.299 [2,8%]	2.059.499 [100,0%]

Tab. 39: Kohlendioxidemissionen durch den Kraftfahrzeugverkehr im Großraum Hannover

Zum Vergleich kann die „CO₂-Minderungsstudie Verkehr Großraum Hannover“ [26] aus dem Jahr 1997 herangezogen werden. Die Aufteilung der Emissionen auf die Verkehrsmittel wird dort für den Großraum Hannover wie in Tabelle 63 dargestellt angegeben. Die dort durchgeführten Emissionsberechnungen basieren allerdings nur auf Verkehrsmatrizen für den mittleren Tagesverkehr. Eine kumulative dynamische Einzelstundenumlegung mit teilweise stark gerichteten Spitzenstundenverkehren, wie sie im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, ergibt zweifellos zutreffendere Erkenntnisse.

	CO ₂ -Emission in %	CO ₂ t/a
Straße	88,7	1507900
Schiene	10	170000
Wasser	1,3	22100
insgesamt	100	1700000

Tab. 40: CO₂-Emissionen durch den Verkehr 1990 im Großraum Hannover (CO₂-Minderungsstudie 1997 [26])

Die 1,7 Mio. t/a CO₂ durch den Verkehr (vgl. Tab. 63) machen nach der CO₂-Minderungsstufe etwa 20% der Gesamtemissionen des Großraums Hannover aus [26]. Eine zweite Studie, die allerdings nur überschläglich die Emissionen des Straßenverkehrs ermittelt hat, kam für den Großraum Hannover für das Jahr 1990 auf Kohlendioxidemissionen von insgesamt 2,6 Mio. t/a durch den Kraftfahrzeugverkehr, was etwa 28% der gesamten CO₂-Emissionen entsprach. Die in der CO₂-Minderungsstudie im Szenario Trend für den Straßenverkehr für das Jahr 2010 ermittelten CO₂-Emissionen von 1,87 Mio. t/a werden nach den Ergebnissen dieser Arbeit schon im Jahr 1995 erreicht und überschritten. Die in dieser Arbeit durchgeführte Trendprognose ergab für den Großraum Hannover schon für das Jahr 2000 CO₂-Emissionen von 2,06 Mio. t/a durch den Straßenverkehr. Dies bedeutet für den Zeitraum von 1995 bis zum Jahr 2000 im Großraum Hannover einen Anstieg der CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs um 5,6%.

Szenarien mit verstärkten regionalen Maßnahmen des Klimaschutzes wurden in dieser Arbeit nicht überprüft. Jedoch stimmt zumindest die Fahrgastbilanz der Hannoverschen Verkehrsbetriebe für das Jahr 1998 nachdenklich, in der aufgezeigt wurde, dass die Üstra im Jahre 1997 noch 156,7 Mio. Fahrgäste auf insgesamt 843,4 Mio. Personenkilometern beförderte, während sie im Jahr 1998 nur noch 149,6 Mio. Fahrgäste auf insgesamt 808,1 Mio. Personenkilometern beförderte. Dies bedeutet einen Rückgang der Fahrgastzahlen um 7,1 Mio. Fahrgäste in einem Jahr. Die in der Verkehrsmittelwahl angestrebte Trendwende scheint derzeit nicht erreicht zu werden. Wenn der angestrebte Rückgang der CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2010 um 10% gegenüber dem Jahr 1990 im Großraum Hannover erreicht werden soll, reichen offenbar die regional verfügbaren Mittel dafür nicht aus.

Die EXPO-bedingte Zunahme der Kohlendioxidemissionen gegenüber dem Prognosenullfall (ohne EXPO) sind der Tabelle 41 zu entnehmen.

Planfall	CO ₂ [t in 153 Tagen]	Anstieg der jährlichen CO ₂ -Emission gegenüber dem Prognosenullfall P0
P1 zeitoptimale Wegewahl	57375	2,86%
P2 zielorientiert	58293	2,91%
P3 nachfrageorientiert	123012	6,15%

Tab. 41: EXPO-bedingte CO₂-Emissionen durch den Straßenverkehr

Gegenüber der nachfrageorientierten Verkehrsplanung (Planfall 3) kann durch eine zielorientierte Verkehrsplanung (Planfälle P1 und P2) die zusätzliche Kohlendioxidemission durch die Weltausstellung EXPO 2000 um die Hälfte reduziert werden. Da die CO₂-Konzentrationen nicht von Bedeutung sind, wurden die Betrachtungen des Treibhausgases CO₂ hiermit abgeschlossen.

6.3.5 Normierte Abgasemissionen

Die Normierung der absoluten Emissionen auf einen mittleren Kilometer Straßenlänge der untersuchten Straßentypen ist erforderlich, um die mittleren Konzentrationen für die untersuchten Straßentypen zu ermitteln. Durch die Normierung wird der Netzanteil der untersuchten Straßentypen berücksichtigt. Bei einem geringen Netzanteil eines Straßentyps und einer hohen absoluten Emission werden die höchsten mittleren Schadstoffkonzentrationen erreicht. Bei der Interpretation der Ergebnisse der normierten Abgasemissionen ist zu beachten, dass es in der Regel wenig sehr hoch belastete Straßen innerhalb eines Straßentyps gibt und der Anteil der Mittel und gering belasteten Straßen deutlich höher ist. Es kann also auf den wenigen hochbelasteten Straßen eines Straßentyps zu deutlichen Abweichungen von den Mittelwerten der normierten Abgasemissionen für einen Kilometer eines Straßentyps kommen. Die normierten Emissionen werden hier am Beispiel der Kohlenmonoxidemissionen erläutert.

Emission von Kohlenmonoxid (CO)

Vergleicht man die auf einen mittleren Kilometer je Straßentyp normierten Emissionen von Kohlenmonoxid aus Abbildung 63 mit der absoluten Emission von Kohlenmonoxid je Straßentyp, so wird deutlich, dass es zu einer Veränderung der Bedeutung der Emissionen auf den einzelnen Straßentypen kommt.

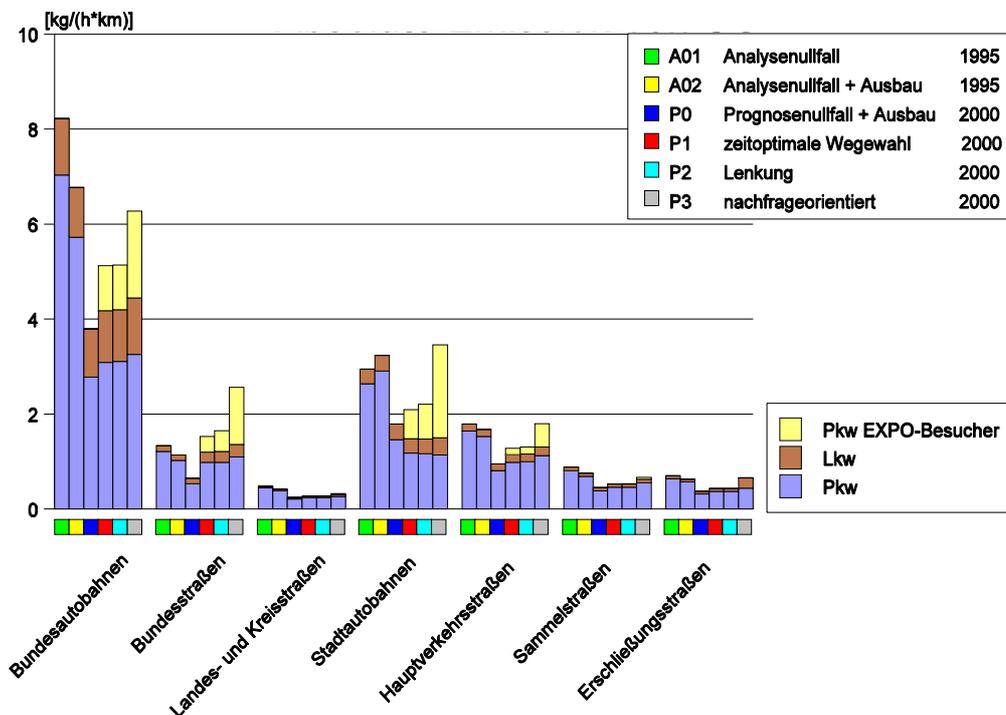


Abb. 63: Normierte Emission von CO (10.00 bis 11.00 Uhr)

Der Anteil der Stadtautobahnen in Bezug auf die absolute Gesamtemission von Kohlenmonoxid ist relativ gering gewesen. Da der Netzanteil der Stadtautobahnen im Großraum Hannover gegenüber dem Gesamtnetz jedoch gering ist, sind die mittleren Konzentrationen von Kohlenmonoxid an Stadtautobahnen höher als an den Hauptverkehrsstraßen oder den Sammelstraßen, deren Netzanteile deutlich größer sind. Die höchsten mittleren Konzentrationen von Kohlenmonoxid werden an Bundesautobahnen erreicht. Etwa halb so hohe mittlere Konzentrationen von Kohlenmonoxid wie an Bundesautobahnen treten an Stadtautobahnen auf. Während in den Planfällen A01 und A02 sowie dem Planfall P0 die mittleren Konzentrationen von Kohlenmonoxid an innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen höher sind als an den Bundesstraßen (außerorts), kommt es durch den EXPO-bedingten Zusatzverkehr in den Planfällen P1, P2 und P3 dazu, dass die mittleren Konzentrationen von Kohlenmonoxid an Bundesstraßen (außerorts) höher sind als an den innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen. Insgesamt ist die Bedeutung der Emissionen des EXPO-bedingten Zusatzverkehrs an den Bundesstraßen (außerorts) größer als an den innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen. Überwiegend handelt es sich bei dem EXPO-bedingten Zusatzverkehr auf Bundesstraßen um den aus dem Umland von Hannover (bis 50 km) anreisenden Besucherverkehr, der somit als ortskundig einzustufen ist und der mit Lenkungsstrategien weniger leicht zu beeinflussen ist als der ortsunkundige aus dem Fernbereich (>50 km) anreisende Besucherverkehr. Das im Lenkungskonzept für die EXPO 2000 [2] angestrebte Ziel, den EXPO-bedingten Zusatzverkehr über Bundesautobahnen, Stadtautobahnen und Bundesstraßen zum Weltausstellungsgelände zu lenken, wird in allen drei Planfällen (P1, P2 und P3) erreicht. Bei einer nachfrageorientierten Verkehrsplanung (Planfall P3) wäre es jedoch im Nahbereich des Weltausstellungsgeländes erforderlich, auch andere Straßen als den Messeschnellweg zur Anfahrt zum Weltausstellungsgelände zu nutzen. Dies bedeutet für die umliegenden Gemeinden eine erhebliche zusätzliche Belastung, die für fünf Monate als kaum zumutbar angesehen werden muss.

Lediglich an den Stadtautobahnen und Bundesstraßen (außerorts) werden im Planfall P3 (nachfrageorientierte Planung) höhere mittlere Konzentrationen von Kohlenmonoxid erreicht als im Jahr 1995 in den Planfällen A01 und A02 (vgl. Abb. 63). An allen anderen Straßentypen liegen die mittleren Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid in den Planfällen für das Jahr 2000 unter denen des Jahres 1995.

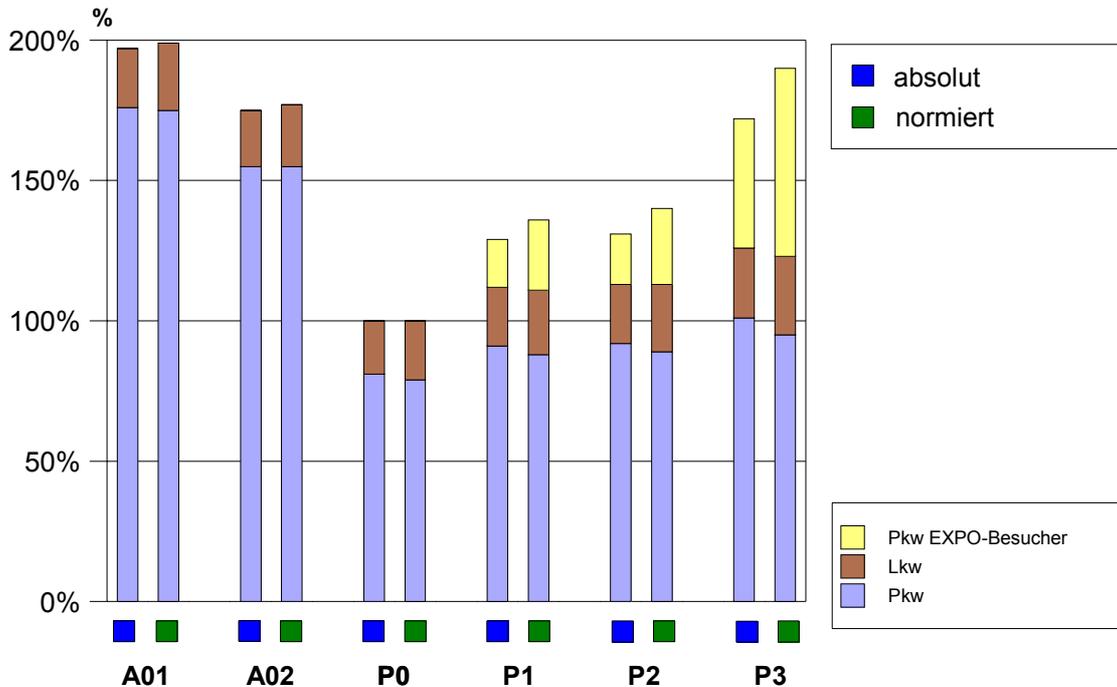


Abb. 64: Vergleich der absoluten und der normierten Bewertung der CO-Emissionen nach Planfällen mit dem Planfall P0 als Bezugsplanfall

Je höher die Konzentration einer untersuchten Fahrtenkategorie (Pkw, Lkw, Pkw EXPO Besucher) auf den Straßentypen mit besonders hohem Emissionsniveau ist (Bundesautobahnen, Stadtautobahnen, Bundesstraßen (vgl. Abb. 63)), desto stärker weicht die Bewertung eines Planfalles von den Emissionen im Prognosenullfall (Planfall P0) ab. In Bezug zum Prognosenullfall P0 nimmt für eine Bewertung der Planfälle sowohl der Einfluss der des EXPO-bedingten Zusatzverkehrs als auch des Schwerverkehrs durch die Normierung zu, da diese beiden Fahrzeugkategorien besonders hohe Konzentrationen auf den Straßentypen mit hohem Emissionsniveau aufweisen. Schon im Prognosenullfall ist zu erkennen, dass die Bedeutung des Schwerverkehrs durch die stärkere Konzentration des Schwerverkehrs auf Straßen mit hohem Emissionsniveau gegenüber der absoluten Bewertung steigt.

6.3.6 Gewichtete Abgasemissionen

Die Gewichtung der normierten Emissionen mit den mittleren Anwohnerzahlen an einer Straße der untersuchten Straßentypen ist erforderlich, um herauszufinden, wie viele Anwohner einer Straße von dem dort emittierten Emissionen betroffen sind. Durch die Gewichtung mit der Anwohnerzahlen werden die von den Abgasemissionen Betroffenen in die Bewertung der Planfälle einbezogen. Bei einem geringen Netzanteil eines Straßentyps und einer hohen absoluten Emission sowie einer großen Anzahl von Anwohnern werden die höchsten gewichteten Schadstoffkonzentrationen erreicht. Die aus der Einwohnerpunktekarte der Stadt Hannover für das Jahr 1998 ermittelten mittleren Anwohnerzahlen an den untersuchten Straßentypen sind der Abbildung 65 zu entnehmen.

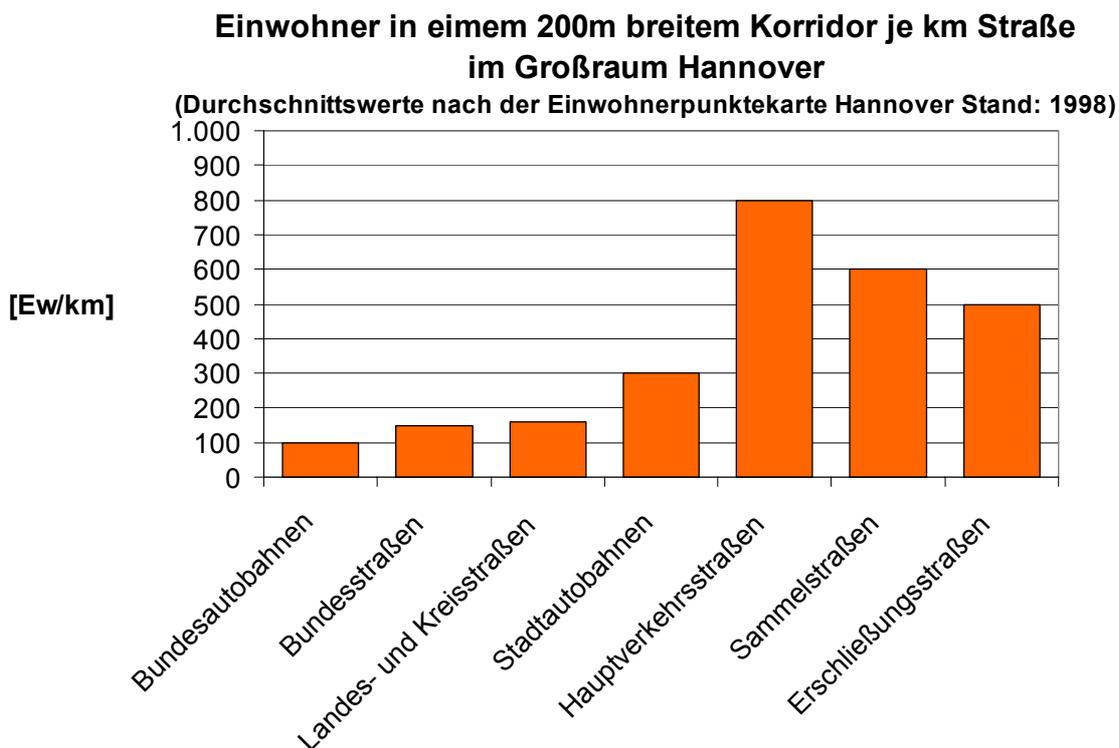


Abb. 65: Mittlere Anwohnerzahlen (Basis: Einwohnerpunktekarte Hannover 1998)

Vereinfachend wird hier von einer annähernden Konstanz der mittleren Anwohnerkonzentrationen an den untersuchten Straßentypen im Untersuchungszeitraum von 1995 bis zum Jahr 2000 ausgegangen. Da der tatsächlich stattfindende Prozess der Bevölkerungsverlagerungen (Zersiedlung) ein recht langwieriger ist und da der Untersuchungszeitraum mit fünf Jahren relativ kurz ist, ist die sich dadurch einstellende Fehleinschät-

zung, bezogen auf den Großraum Hannover, als gering anzusehen. Für eine Bewertung der Planfälle untereinander erhalten die innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen jetzt eine deutlich höhere Bedeutung (vgl. Abb. 65).

Da für einen Straßentyp im gesamten Untersuchungszeitraum vereinfachend jeweils dieselbe mittlere Anwohnerzahl zugrundegelegt wurde, ergibt sich bei einem Vergleich der Planfälle innerhalb eines Straßentyps kein Unterschied im Verhältnis der Planfälle untereinander (vgl. z.B. Bundesautobahnen Abb. 66 und Abb. 63, S. 114).

Emission von Kohlenmonoxid (CO)

Durch die Gewichtung (Multiplikation) der mittleren Konzentrationen der normierten Emissionen je Kilometer eines Straßentyps mit den mittleren Anwohnerzahlen für die unterschiedlichen Straßentypen ergibt sich erneut eine Veränderung in der Bedeutung der unterschiedlichen Straßentypen bei den Emissionen von Kohlenmonoxid (CO).

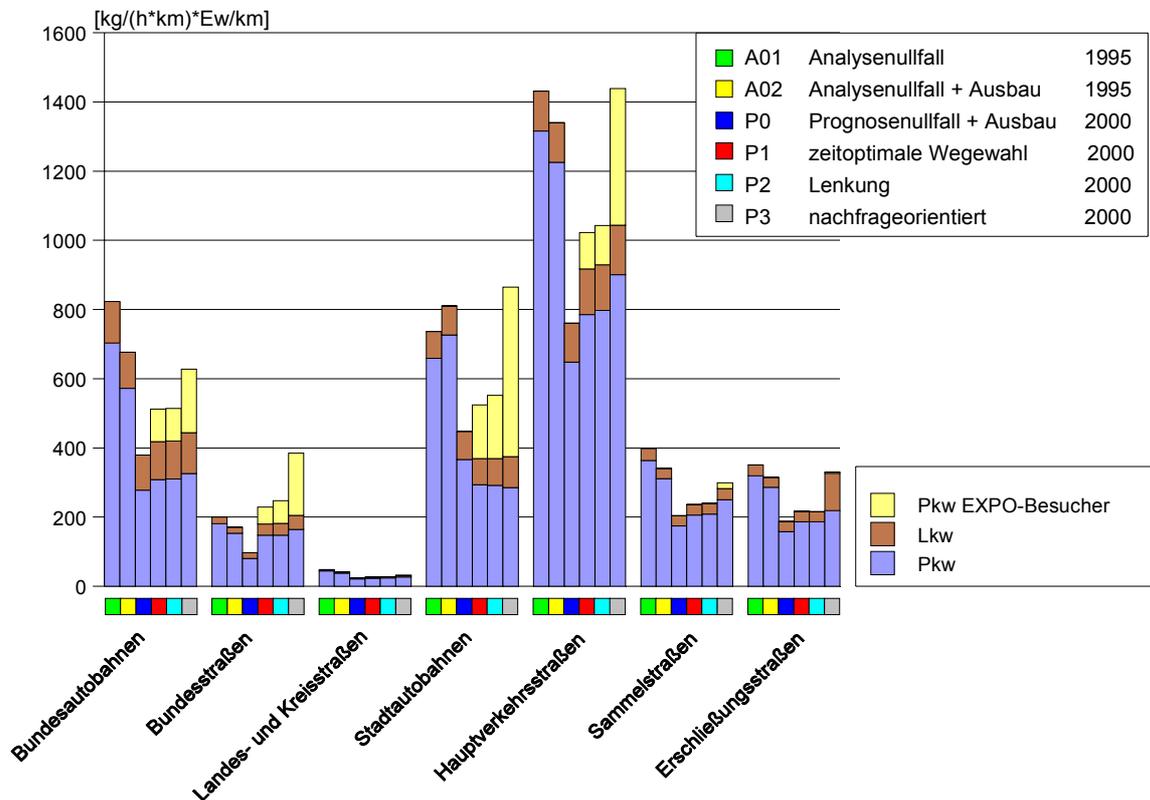


Abb. 66: Gewichtete Emission von CO (10.00 bis 11.00 Uhr)

Bei der mit den mittleren Anwohnerzahlen gewichteten Bewertung der CO-Emissionen kommt den innerorts gelegenen Hauptverkehrsstraßen, Sammelstraßen und Erschließungsstraßen eine deutlich größere Bedeutung zu als den außerorts gelegenen Bundesautobahnen, Bundesstraßen und Landes- und Kreisstraßen.

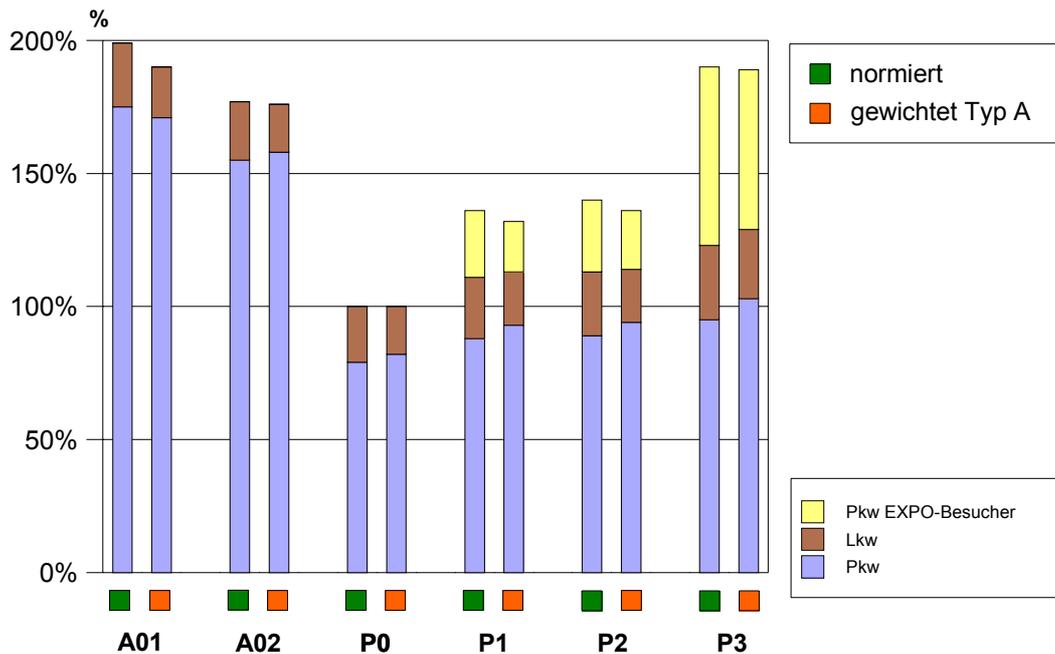


Abb. 67: Vergleich der normierten und der mit Typ A gewichteten Bewertung der CO-Emissionen nach Planfällen mit dem Planfall P0 als Bezugsplanfall

Die Bedeutung der Emissionen des Schwerverkehrs geht durch die Gewichtung der Emissionen mit den mittleren Anwohnerzahlen je Kilometer eines Straßentyps insgesamt zurück. Dies liegt daran, dass die Bundes- und Stadtautobahnen, die die höchsten mittleren Konzentrationen der CO-Emissionen durch den Schwerverkehr aufweisen (vgl. Abb. 66), gegenüber den innerörtlichen Straßen nur wenig Bedeutung bei der Gewichtung mit den mittleren Anwohnerzahlen haben (vgl. Abb. 65).

In Bezug auf den Prognosenullfall P0 ist zu erkennen, dass es durch die Verdrängung des ortskundigen Verkehrs mit Personenkraftwagen von den Bundes- und Stadtautobahnen auf die innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen, Sammelstraßen und Erschließungsstraßen zu einer Erhöhung der Emissionen durch den Verkehr mit Personenkraftwagen auf den innerörtlichen Straßen kommt (vgl. Abb. 66). Durch die Gewichtung mit den mittleren Anwohnerzahlen steigt die Bedeutung der innerörtlichen Straßen für die Bewertung der Planfälle stark an. Dadurch geht die Verdrängung des ortskundigen Verkehrs mit Personenkraftwagen gegenüber dem Prognosenullfall P0 um so mehr ein, je mehr Verkehr auf die innerörtlichen Straßen verdrängt wird (vgl. Abb. 67).

Die Bedeutung des EXPO-bedingten Zusatzverkehrs geht bei der Gewichtung der Emissionen mit den mittleren Anwohnerzahlen gegenüber der normierten Bewertung der Emissionen insgesamt zurück, da sich der EXPO-bedingte Zusatzverkehr überwiegend auf die Bundes- und Stadtautobahnen konzentriert und diese Straßentypen bei der Gewichtung mit den mittleren Anwohnerzahlen nur eine geringe Bedeutung haben.

Beim Vergleich der Planfälle P1 und P2 (zielorientierte Verkehrsplanung) mit dem Planfall P3 (nachfrageorientierte Verkehrsplanung) wird deutlich, dass der Abstand zwischen den Planfällen mit zielorientierter und nachfrageorientierter Verkehrsplanung durch die Gewichtung mit den mittleren Anwohnerzahlen für die unterschiedlichen Straßentypen noch größer wird. Gegenüber den beiden Planfällen P1 und P2 weist der Planfall P3 deutlich höhere Konzentration der CO-Emissionen durch den EXPO-bedingten Zusatzverkehr auf den Hauptverkehrsstraßen auf (vgl. Abb. 66). Außerdem sind an den Hauptverkehrsstraßen im Großraum Hannover im Mittel die Anwohnerzahlen am größten. Dadurch kommt es durch die Gewichtung mit den

mittleren Anwohnerzahlen zu einer Vergrößerung des Abstandes zwischen den beiden Planfällen P2 und P3.

6.3.7 Lärmemissionen

Die Ermittlung der Lärmemissionen erfolgte wie die Berechnung der Kohlendioxidemissionen auf der Basis von Umlegungsergebnissen von dynamischen Einzelstundenumlegungen mit dem Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML. Die Auswertung des Lärms erfolgte jeweils für den mittleren Lärmpegel einer Stunde. Es wurde bei der Auswertung jeweils der mit der Streckenlänge gewichtete mittlere Lärmpegel für die untersuchten Straßentypen ausgewertet.

An Bundesautobahnen weist der mittlere mit der Streckenlänge gewichtete Lärmpegel an Bundesautobahnen im Großraum Hannover über einen Tag nur geringe Schwankungsbreiten auf (vgl. Abb. 68). Der hohe Anteil des Schwerverkehrs am mittleren Lärmpegel ist für den relativ konstanten Verlauf über den Tag verantwortlich. Der prozentuale Lärmanstieg durch den EXPO-bedingten Zusatzverkehr ist generell gering. Die absolute Erhöhung des mittleren Lärmpegels bleibt unter der Schwelle von 3 db(A), von dem an der Mensch eine Erhöhung des Lärmpegel wahrnehmen kann (eine Zunahme von 10 db(A) entspricht in etwa einer Verdopplung der wahrgenommenen Lautstärke des Kraftfahrzeugverkehrs). An den Bundesautobahnen wird es während der EXPO 2000 im Mittel zu keiner für den Menschen wahrnehmbaren Erhöhung der Lärmemissionen kommen. Auf einzelnen hochbelasteten Streckenabschnitten von Bundesautobahnen kann es jedoch zu Zunahmen kommen, die für Menschen wahrnehmbar sind.

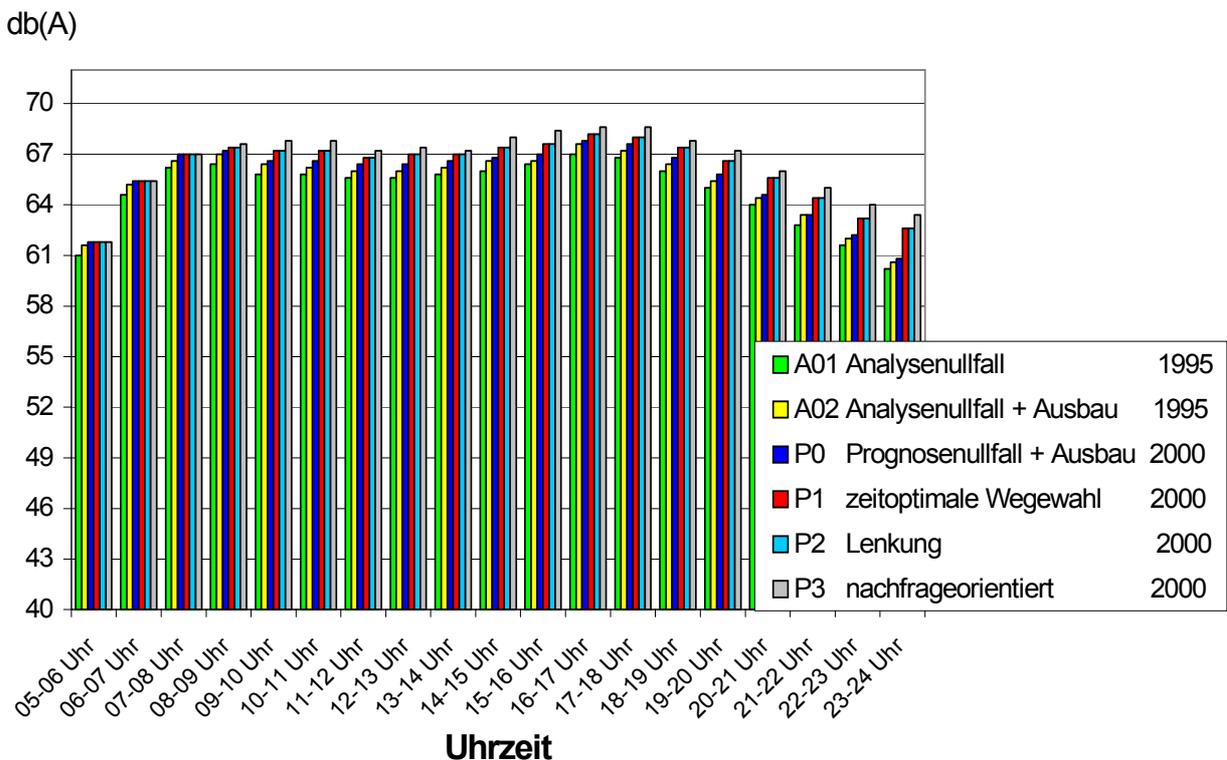


Abb. 68: Mittlerer mit der Streckenlänge gewichteter Lärmpegel in db(A) an Bundesautobahnen im Großraum Hannover in Stundenintervallen

An den Stadtautobahnen weist der mittlere Lärmpegel im Großraum Hannover gegenüber den Bundesautobahnen ein etwas niedrigeres Lärmniveau auf. Im Zeitraum von 6.00 bis 21.00 Uhr schwanken die

Lärmemissionen an Stadtautobahnen zwischen 61 und 65 db(A) (vgl. Abb. 69). In den späten Abendstunden verringert sich der Lärm deutlich. Gegenüber dem Prognosenullfall kommt es in den Planfällen P1, P2 und P3 zu keinen Erhöhungen des mittleren Lärmpegels, die die Wahrnehmbarkeitsschwelle von 3 db(A) erreichen. Nur in den späten Abendstunden erhöht sich im Planfall P3 der mit den Streckenlängen gewichtete mittlere Lärmpegel an Stadtautobahnen um fast 3 db(A). In den späten Abendstunden ist bei einer nachfrageorientierten Planung (Planfall P3) auf Streckenabschnitten in unmittelbarer Nähe zum Weltausstellungsgelände der EXPO 2000 also mit einer wahrnehmbaren Erhöhung des mittleren lokalen Lärmpegels (ungewichtet) um mehr als 3 db(A) zu rechnen.

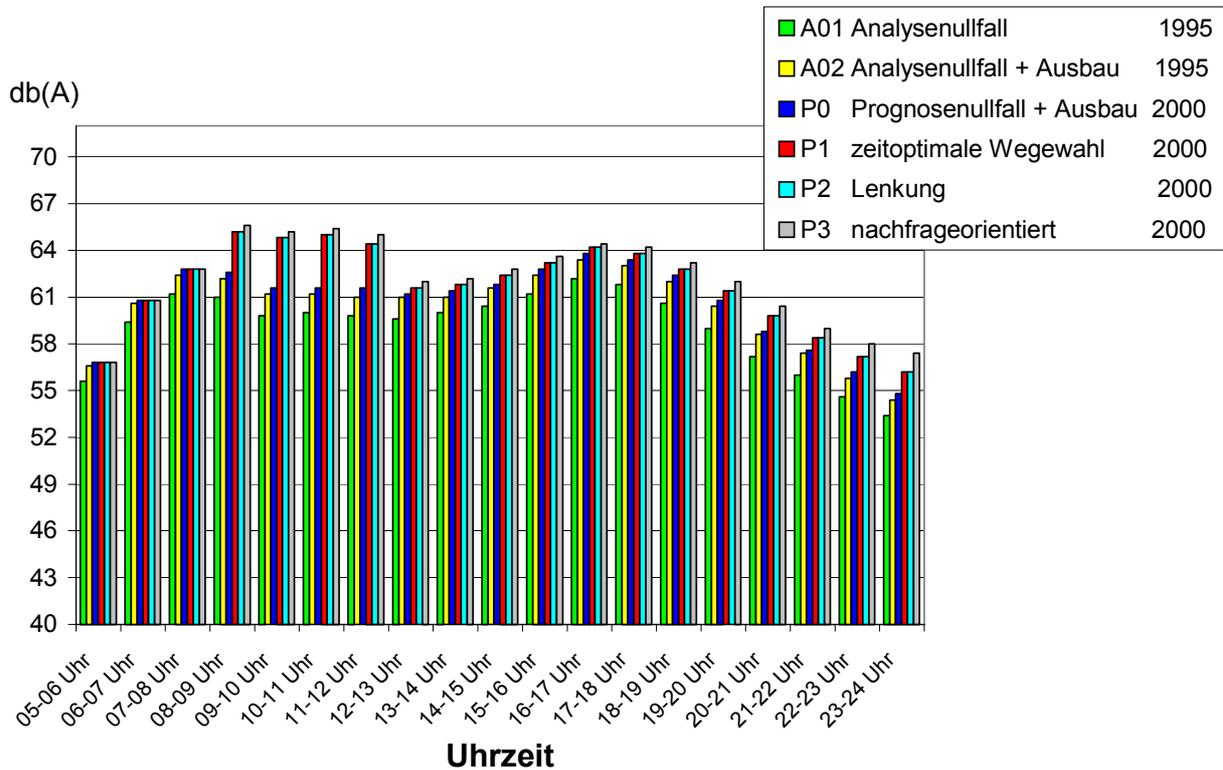


Abb. 69: Mittlerer mit der Streckenlänge gewichteter Lärmpegel in db(A) an Stadtautobahnen im Großraum Hannover in Stundenintervallen

An den Stadtautobahnen kommt es in der Zeit von 8.00 Uhr bis 11.00 Uhr zu einer für den Menschen wahrnehmbaren Steigerung des mittleren mit der Streckenlänge gewichteten Lärmpegels um etwa 4 db(A). In diesem Zeitraum wurde im Netzmodell die Maßnahme A aktiviert und der anreisende Kraftfahrzeugstrom zur EXPO 2000 wurde konzentriert über den Messeschnellweg zum Weltausstellungsgelände gelenkt.

An den Hauptverkehrs-, Sammel- und Erschließungsstraßen im Großraum Hannover ist durch den EXPO-bedingten Zusatzverkehr kaum eine Erhöhung des mit den Streckenlängen gewichteten mittleren Lärmpegels zu erkennen. Auch die stattfindenden Verkehrsverlagerungen führen zu keiner signifikanten Erhöhung des mit den Streckenlängen gewichteten mittleren Lärmpegels auf diesen Straßentypen.

Für eine Bewertung der untersuchten Planfälle wurde auch für die Lärmemissionen eine Gewichtung mit den mittleren Anwohnerzahlen je km für die unterschiedlichen Straßentypen durchgeführt (vgl. Abb. 65, S. 116). Da bisher lediglich für hohe Lärmemissionen (>55 db(A)) eine die Gesundheit beeinträchtigende Wirkung (Schlafstörungen, Störungen der Kommunikation, Störungen der Rekreation) nachgewiesen wurde [8], wurden die mittleren Lärmbelastungen unter 55 db(A) nicht mit in die Bewertung der Planfälle einbezogen. In die Bewertung der Lärmemissionen gehen damit die mittleren Lärmemissionen an Sammel-, Erschließungs- und Landes- und Kreisstraßen nicht ein. Auf den Hauptverkehrsstraßen erreicht die mit der Streckenlänge gewichtete mittlere Lärmemissionen nur in der nachmittäglichen Hauptverkehrszeit Werte, die über 55 db(A) liegen (vgl. Abb 70).

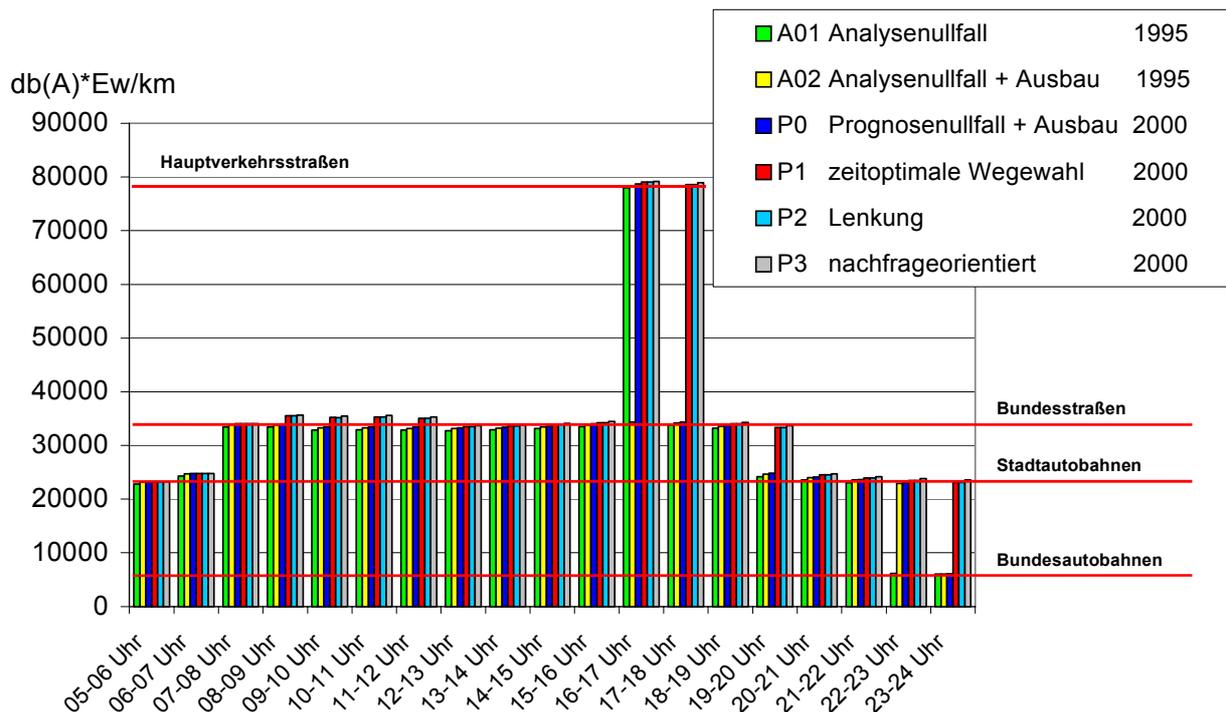


Abb. 70: Mit den mittleren Anwohnerzahlen und Streckenlängen gewichtete mittlere Lärmemissionen (nur >55 db(A)) im Großraum Hannover in Stundenintervallen

Der Einfluss der einzelnen Straßentypen auf die mit den mittleren Anwohnerzahlen gewichteten mittleren Lärmemissionen ist in der Abbildung 70 durch die horizontalen Linien gekennzeichnet. Die Überschreitung einer mittleren Lärmbelastung von 55 db(A) auf den Hauptverkehrsstraßen in der nachmittäglichen Hauptverkehrszeit geht bei der Bewertung der Lärmemissionen besonders stark ein, da an den Hauptverkehrsstraßen die meisten Anwohner von den Lärmemissionen betroffen werden. Ohne die Überschreitung der hier zugrundegelegten Grenzbelastung von 55 db(A) auf Hauptverkehrsstraßen in der Stunde von 17.00 bis 18.00 Uhr wäre zwischen dem Prognosenußfall und den Planfällen P1, P2 und P3 kein deutlicher Unterschied festzustellen.

Gegenüber den Bewertungen der gewichteten Abgasemissionen ist der Unterschied zwischen den Planfällen mit einer zielorientierten Verkehrsplanung (Planfälle P1 und P2) und dem Planfall P3 mit einer nachfrageorientierten Verkehrsplanung bei der Bewertung der mit der Streckenlänge gewichteten Lärmemission sehr gering (vgl. Abb. 71). Dies liegt einerseits daran, dass Lärmemissionen sich nicht linear sondern logarithmisch erhöhen, andererseits kommt es durch die Erhöhung der Verkehrsstärke, die auch eine Erhöhung der Lärmbelastung bedeutet, gleichzeitig zu einer Verminderung der Geschwindigkeit, die wiederum zu einer Verringerung der Lärmbelastung führt.

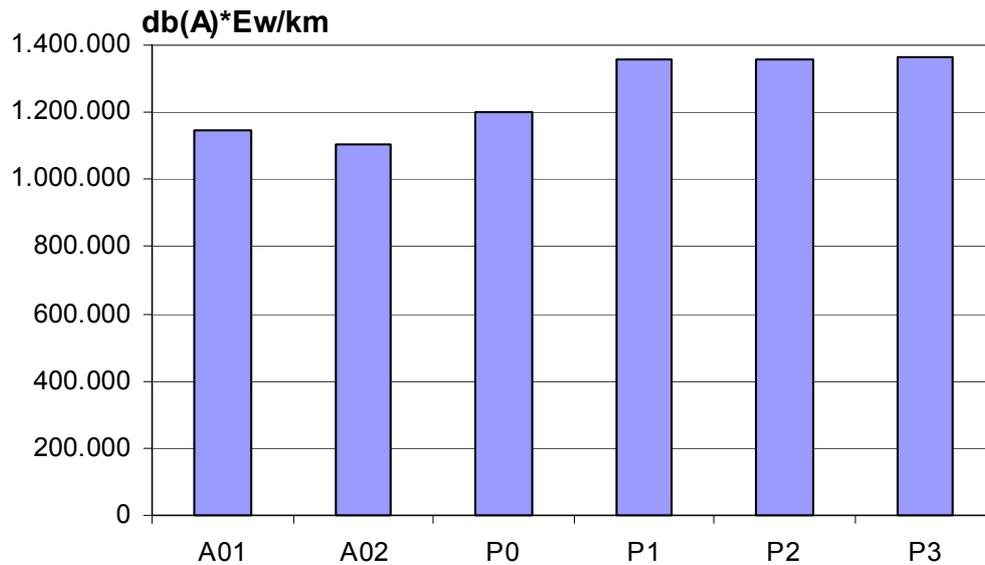


Abb. 71: Summe der täglichen mit den mittleren Anwohnerzahlen und Streckenlängen gewichtete mittlere Lärmemissionen (nur >55 db(A)) im Großraum Hannover nach Planfällen

Insgesamt lässt sich festhalten, dass es durch den EXPO-bedingten Zusatzverkehr im Großraum Hannover nur zu einer geringfügigen Erhöhung der Lärmbelastungen kommt, die tagsüber im mit der Streckenlänge gewichteten Mittel generell unter der Grenze der Wahrnehmbarkeit von 3 db(A) bleibt. Nur bei einer nachfrageorientierten Verkehrsplanung (Planfall P3) kommt es in den späten Abendstunden zu einer an der Grenze der Wahrnehmbarkeit liegenden zusätzlichen Lärmbelastung an den Bundesautobahnen und an den Stadtautobahnen. Auf kurzen hoch belasteten Streckenabschnitten von Bundesautobahnen und Stadtautobahnen treten in den Spitzenstunden und den späten Abendstunden wahrnehmbare EXPO-bedingte Lärmemission von mehr als 3 db(A) auf.

6.4 Ergebnisse der Kapazitätsuntersuchungen und Schwachstellenanalyse

6.4.1 Untersuchte Planfälle

Es wurden Planfälle untersucht, in denen der Ablauf des täglichen Verkehrsaufkommens während der EXPO 2000 als Ganzes betrachtet wird. Da die Entscheidung für eine Verkehrslenkungsstrategie während der Anreise direkte Auswirkungen auf die Abreise hat, war es für eine realitätsnahe dynamische Simulation des Verkehrs während der EXPO 2000 notwendig, ein Simulationsmodell zu entwickeln, das den Zu- und Abfluss des EXPO-bedingten Zusatzverkehrs als Gesamtsystem betrachtet. Das heißt, wenn morgens viele Kraftfahrzeuge auf dezentral gelegenen P+R-Plätzen abgestellt werden, so ist es für eine realistische Simulation des Verkehrsablaufes erforderlich, dass diese Kraftfahrzeuge während der Abreise auch wieder von denselben dezentral gelegenen P+R-Plätzen abreisen. Wenn ein P+R-Platz während der Anreise z.B. fast ausschließlich aus Richtung Westen beschickt worden ist, so ist mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auch von einer überwiegenden Abreise in Richtung Westen auszugehen.

Für alle untersuchten Planfälle (vgl. Tab. 42) ist für die Nachtstunden zwischen 0.00 und 5.00 Uhr, aufgrund der schlechten Datenlage und der geringen Bedeutung dieser Stunden auf eine Simulation verzichtet worden. Lediglich etwa 2% des täglichen Fahrtenaufkommens findet in diesem Zeitraum statt.

Der **Analysenullfall A0** bildet den mittleren Kraftfahrzeugverkehr im Großraum Hannover im Jahre 1997 im Modell ab (für den Zeitraum der EXPO 2000 vom 1. Juni bis zum 31. Oktober). Der Analysenullfall diente zur Überprüfung und Kalibrierung der einzelnen Fahrtenmatrizen für die Stundenzeiträume.

Der **Prognosenullfall P0** bildet den Kraftfahrzeugverkehr im Großraum Hannover im Jahre 2000 ohne die Weltausstellung EXPO 2000 ab. Der Vergleich des Analysenullfalles mit dem Prognosenullfall liefert Aussagen über die Verkehrsentwicklung im Großraum Hannover für den Zeitraum vom Jahr 1997 bis zum Jahr 2000. Die weiteren Planfälle P1 bis P4 sollten mit dem Prognosenullfall verglichen werden, da so die Verkehrsentwicklung in der Region Hannover von den Effekten, die EXPO-bedingt sind, getrennt werden kann.

Im **Planfall P1** wird für den EXPO-bedingten Zusatzverkehr ein Werktag mit 370.000 Besuchern zugrunde gelegt. Für den werktäglichen Normalverkehr in der Region Hannover ist das Szenario mit 370.000 Besuchern das Szenario mit der höchsten Besucheranzahl, die nicht an allen Werktagen erreicht wird (vgl. Abb. 6, S. 7). Lediglich an etwa 25 Werktagen ist während der EXPO 2000 mit einer solch hohen Besucheranzahl zu rechnen. Für die Entwicklung von Handlungsstrategien zur Vermeidung von Störungen im Straßennetz des Großraumes von Hannover ist es jedoch sinnvoll, die maximalen Szenarien genau zu untersuchen, da bei diesen Szenarien die meisten Schwachstellen im Straßennetz zu erkennen sind. Für den Planfall P1 wurde für die Simulation des Veranstaltungsverkehrs mit SIMVER von einer weitgehend hohen Akzeptanz auch der dezentral gelegenen P+R-Plätze mit guter ÖPNV-Anbindung ausgegangen. Als maximaler P+R-Aktivierungslevel wurde der Level 3 festgelegt, d.h. Parkplätze mit dem Aktivierungslevel 4 bleiben in diesem Planfall ungenutzt. Der für jede Stunde definierte P+R-Aktivierungslevel für die Planfälle P1, P2 und P3 ist der Abbildung 56 zu entnehmen. Dieser Planfall orientiert sich an der in der Untersuchung „P+R-Wegweisung in der Region Hannover“ [5] empfohlenen Wegweisung für einen Werktag mit 370.000 Besuchern. In der Zeit von 8.00 bis 12.00 Uhr wird im Planfall P1 die Maßnahme A mit Einrichtungsverkehr zum Weltausstellungsgelände aktiviert. Auf eine Aktivierung der Maßnahme R für die Rückreise wird im Planfall P1 verzichtet.

Planfall A0	Analysenullfall 1997	- Fahrtenmatrizen - Verkehrsnetzmodell	1997 1997
	kein EXPO-bedingter Zusatzverkehr Planfall zum Kalibrieren der Verkehrsmatrizen		
Planfall P0	Prognosenufall 2000	- Fahrtenmatrizen - Verkehrsnetzmodell	2000 2000
	kein EXPO-bedingter Zusatzverkehr Planfall zum Abschätzen der Auswirkungen der Verkehrsentwicklung im Großraum Hannover bis zum Jahr 2000		
Planfall P1 370.000 Besucher werktags	Planfall P1 2000	- Fahrtenmatrizen - Verkehrsnetzmodell	2000 2000
	- zielorientiert gelenkter EXPO-bedingter Zusatzverkehr - weitgehend hohe Akzeptanz der Besucher auch für die Anreise zu dezentralen P+R-Plätzen - Maßnahme A im Zeitraum von 8.00 bis 12.00 Uhr - Aktivierungslevel der Parkplätze bis zum Level 3		
Planfall P2 370.000 Besucher werktags	Planfall P2 2000	- Fahrtenmatrizen - Verkehrsnetzmodell	2000 2000
	- zielorientiert gelenkter EXPO-bedingter Zusatzverkehr - hohe Priorität der Besucher für geländenahe P+R-Plätze - Maßnahme A im Zeitraum von 8.00 bis 12.00 Uhr - Aktivierungslevel der Parkplätze bis zum Level 3		
Planfall P3 370.000 Besucher werktags	Planfall P3 2000	- Fahrtenmatrizen - Verkehrsnetzmodell	2000 2000
	- zielorientiert gelenkter EXPO-bedingter Zusatzverkehr - weitgehend hohe Akzeptanz der Besucher auch für die Anreise zu dezentralen P+R-Plätzen - Maßnahme A im Zeitraum von 8.00 bis 12.00 Uhr - Maßnahme R im Zeitraum von 16.00 bis 19.00 Uhr - Aktivierungslevel der Parkplätze bis zum Level 3		
Planfall P4 370.000 Besucher werktags	Planfall P4 2000	- Fahrtenmatrizen - Verkehrsnetzmodell	2000 2000
	- zielorientiert gelenkter EXPO-bedingter Zusatzverkehr - weitgehend hohe Akzeptanz der Besucher auch für die Anreise zu dezentralen P+R-Plätzen - Maßnahme A im Zeitraum von 8.00 bis 12.00 Uhr - Aktivierungslevel der Parkplätze bis Level 4 (mit Bantorf)		

Tab. 42: Untersuchte Planfälle für den werktäglichen Kraftfahrzeugverkehr im Großraum Hannover

Auch der **Planfall P2** bildet einen Werktag mit 370.000 Besuchern ab. Dabei wird angenommen, dass der P+R-Platz Laatzen-Süd durch die zu P+R-Plätzen anreisenden Besucher besonders attraktiv eingeschätzt wird, bzw. dass mit Hilfe von Verkehrshinweisen besonders viele Besucher zum P+R-Platz Laatzen-Süd geführt werden (Rang 1). Der Planfall P2 soll im Vergleich mit dem Planfall P1 dazu dienen, die Schwankungsbreite aufzuzeigen, die auch bei voller Ausnutzung der dynamischen Wegweisung in der Region noch zu erwarten ist. Durch die Definition eines höheren Ranges für den P+R-Platz Laatzen-Süd im Simulationsmodell SIMVER ist ein schnelleres Auffüllen des P+R-Platzes Laatzen-Süd zu erwarten. Gleichzeitig werden

im Planfall P3 deutlich mehr Personenkraftwagen von Besuchern bis dicht an das Weltausstellungsgelände geführt. Die Aktivierung der Wegweisung mit den unterschiedlichen Aktivierungslevels für die unterschiedlichen P+R-Plätze wird gegenüber dem Planfall P1 nicht verändert. Im Planfall P2 wird lediglich die Akzeptanz der Wegweisung und die Attraktivität der P+R-Plätze geändert. Der maximale P+R-Aktivierungslevel ist im Planfall P3 der Level 3, d.h. Parkplätze mit dem Aktivierungslevel 4 bleiben auch in diesem Planfall ungenutzt.

Der **Planfall P3** entspricht während der Anreise zur EXPO 2000 dem Planfall P1. Im Gegensatz zum Planfall P1 wird jedoch im Planfall P3 in der Zeit von 16.00 bis 19.00 Uhr die Maßnahme R mit Einrichtungsverkehr auf dem Messeschnellweg in Richtung Norden zwischen dem Messegelände und dem AK Hannover-Buchholz aktiviert. Hinsichtlich der Simulation des Veranstaltungsverkehrs mit dem Simulationsprogramm SIMVER gibt es keine Unterschiede zwischen dem Planfall P1 und dem Planfall P3. Der maximale P+R-Aktivierungslevel ist auch für den Planfall P3 der Level 3.

Für den **Planfall P4** wurden für die P+R-Plätze in der Simulation die selben Rangfolgen und Aktivierungslevel zugrunde gelegt wie in den Planfällen P1 und P3 (vgl. Tab. 43). Lediglich der maximale P+R-Aktivierungslevel wurde auf den Level 4 angehoben (vgl. Abb. 72). Damit sind im Planfall P4 erstmals alle für Werkzeuge zur Verfügung stehenden P+R-Plätze in der Wegweisung aktiviert worden.

P+R-Platz	Rang (Attraktivität)	Deaktivierungs- Auslastungsgrad	Aktivierungslevel			
			Westen	Norden	Osten	Süden
Bantorf	2	75%	4	-	-	-
Wunstorf	1	80%	2	-	-	-
Marienwerder	5	80%	(3) Sa/So	-	-	-
Stöcken	6	80%	(3) Sa/So	-	-	-
Brink	3	80%	2	-	3	-
Alte Heide	4	75%	2	-	-	-
Mellendorf	8	80%	-	3	-	-
Kaltenweide	9	90%	4	4	-	-
Flughafen	7	80%	4	4	-	-
Godshorn	10	80%	4	2	-	-
Laatzen-Süd	11 (P1,P3,P4) bzw. 1 (P2)	90%	4	3	1	1
Heisede	12	85%	-	4	3	3

Tab. 43: Simulationsparameter für das Simulationsmodell Veranstaltungsverkehr SIMVER

Den Planfällen P1, P2 und P3 wurden dieselben Aktivierungslevel im Verlauf über den Tag zugrunde gelegt. Nur im Planfall P4 wurden in der Hauptreisezeit von 10.00 bis 12.00 Uhr auch die P+R-Plätze, die erst vom Aktivierungslevel 4 an auf den Bundesautobahnen ausgewiesen werden sollen, aktiviert (vgl. Abb. 72).

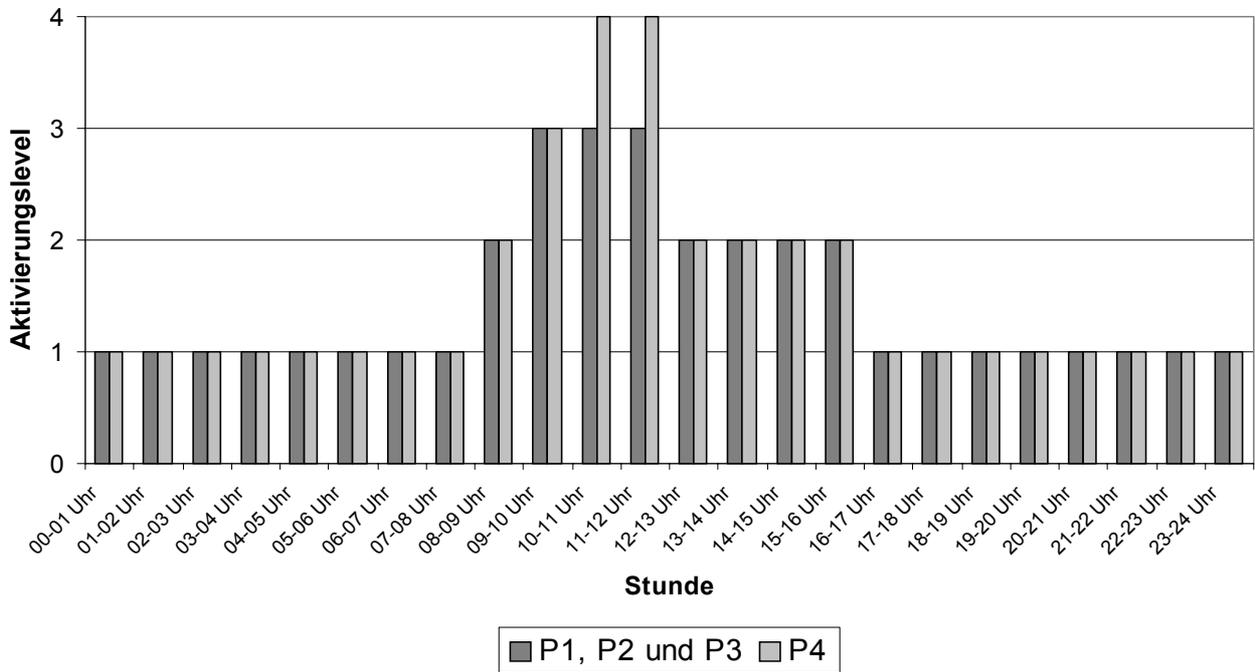


Abb. 72: Aktivierungslevel der P+R-Plätze in den untersuchten Planfällen

6.4.2 Simulation des Veranstaltungsverkehrs mit dem Simulationsmodell SIMVER

Durch die Simulation mit dem Simulationsmodell SIMVER ist es möglich, ein dynamisches Verkehrsleitsystem zu Parkplätzen und das Auffüllen dieser Parkplätze im Verlauf über einen Tag im Modell abzubilden. Zu unterschiedlichen Tageszeiten werden mit dem Simulationsmodell SIMVER die zur Verfügung stehenden Parkplätze nach Bedarf aktiviert und deaktiviert. Das Simulationsmodell SIMVER kann zu einer Prüfung unterschiedlicher möglicher Schaltzustände eines dynamischen Verkehrsleitsystems zu Parkplätzen eingesetzt werden.

Planfall P1

Im Planfall P1 werden die Personenkraftwagen von Besuchern der EXPO 2000 überwiegend auf dezentral gelegene P+R-Plätze mit gutem Anschluss an den ÖPNV geführt. Diese Verkehrslenkungsstrategie vermindert auf den hochbelasteten Streckenabschnitten der A 2, der A 7 und auf dem Messeschnellweg den kritischen Anreisespitzenverkehr und vermindert somit insgesamt die Störungswahrscheinlichkeit durch Überlastung einzelner Streckenabschnitte. Gleichzeitig wird der P+R-Platz Laatzen-Süd in diesem Planfall nicht voll ausgenutzt (Auslastungsgrad 75%), es stehen somit in Geländenähe noch Stellplätze für eventuelle Störfälle und für regelwidrig (ohne Parkplatzberechtigung) zum Weltausstellungsgelände angereiste Personenkraftwagen zur Verfügung.

Parkplatz	9 Uhr	10 Uhr	11 Uhr	12 Uhr	13 Uhr	14 Uhr	15 Uhr	16 Uhr	17 Uhr
Weltausstellungsgelände	9%	31%	59%	76%	86%	89%	88%	82%	70%
Bantorf	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Wunstorf	20%	40%	60%	80%	99%	96%	91%	82%	69%
Marienwerder	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Stöcken	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Brink	2%	42%	82%	81%	80%	78%	84%	76%	64%
Alte Heide	0%	11%	25%	37%	42%	49%	47%	47%	44%
Mellendorf	0%	27%	43%	80%	79%	77%	72%	65%	55%
Kaltenweide	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Flughafen	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Godshorn	12%	23%	42%	46%	60%	66%	67%	65%	55%
Laatzen-Süd	9%	26%	47%	62%	72%	75%	75%	71%	60%
Heisede	0%	1%	14%	21%	20%	20%	19%	17%	14%

Legende

	Aktivierungslevel 1
	Aktivierungslevel 2
	Aktivierungslevel 3
81	deaktiviert wegen Überlaufgefahr

Abb. 73: Auslastungsgrad der Parkplätze im Planfall P1

Planfall P2

Parkplatz	9 Uhr	10 Uhr	11 Uhr	12 Uhr	13 Uhr	14 Uhr	15 Uhr	16 Uhr	17 Uhr
Weltausstellungsgelände	9%	31%	59%	76%	86%	89%	88%	82%	70%
Bantorf	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Wunstorf	2%	22%	42%	61%	81%	78%	84%	78%	64%
Marienwerder	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Stöcken	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Brink	0%	36%	76%	88%	87%	84%	80%	79%	67%
Alte Heide	0%	0%	6%	6%	11%	19%	18%	16%	14%
Mellendorf	0%	3%	16%	16%	15%	15%	14%	13%	11%
Kaltenweide	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Flughafen	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Godshorn	0%	0%	0%	15%	15%	22%	26%	28%	23%
Laatzen-Süd	15%	43%	72%	95%	97%	95%	91%	83%	70%
Heisede	0%	1%	14%	14%	41%	52%	59%	60%	51%

Legende

	Aktivierungslevel 1
	Aktivierungslevel 2
	Aktivierungslevel 3
81	deaktiviert wegen Überlaufgefahr

Abb. 74: Auslastungsgrad der Parkplätze im Planfall P2

Im Planfall P2 wird mit dem Einsetzen des EXPO-bedingten Zusatzverkehrs ab etwa 8.00 Uhr der zu P+R-Plätzen anreisende Besucherverkehr mit Personenkraftwagen überwiegend zum P+R-Platz Laatzen-Süd geführt. In der Stunde von 8.00 bis 9.00 Uhr fahren den P+R-Platz Laatzen-Süd aus allen Anreiserichtungen schon mehr als 1.200 Kfz/h an. Von 9.00 bis 10.00 Uhr sind es schon etwa 2.200 Kfz/h. Der Parkplatz Laatzen-Süd wird im Planfall P2 sehr schnell gefüllt. Schon um 12.00 Uhr muss der P+R-Platz Laatzen-Süd, auf dem insgesamt 10.000 Stellplätze zur Verfügung stehen (vgl. Tab. 3), deaktiviert werden, da er vollgelaufen ist (vgl. Abb. 74). Gleichzeitig muss auch der P+R-Platz Brink, der wegen der doppelten Aktivierung für die aus den Richtungen Westen und Osten im Aktivierungslevel 3 schnell gefüllt wird, deaktiviert werden (vgl. Abb. 72). Mit der Deaktivierung der P+R-Plätze Laatzen-Süd und Brink sind die zur Verfügung stehenden P+R-Kapazitäten für die aus den Richtungen Osten und Süden nicht mehr ausreichend. Der anreisende Kraftfahrzeugverkehr muss zum P+R-Platz Heisede weitergeleitet werden. Dabei ist an der AS Laatzen und auf der B 443 mit Behinderungen zu rechnen, da die maximalen Zuflussmengen überschritten werden.

Im Planfall P2 kommt es in der morgendlichen Anreisespitzenstunde auf dem durch den aus Richtung Osten zum Weltausstellungsgelände anreisenden Kraftfahrzeugverkehr schon stark belasteten Streckenabschnitt zwischen dem Autobahnkreuz Hannover-Ost und der AS Hannover-Anderten zu einem zusätzlichen Kraftfahrzeugverkehr von mehr als 1.000 Pkw/h, die zum P+R-Platz Laatzen-Süd anreisen. Es ist daher in der Zeit von 9.00 bis 12.00 Uhr an der AS Laatzen mit erheblichen Behinderungen zu rechnen. Ein frühzeitiges Auffüllen des P+R-Platzes Laatzen-Süd ist insgesamt als sehr nachteilig einzustufen, da dies während der Abreise an der AS Laatzen zu Problemen führt.

Planfall P3

Zwischen dem Planfall P3 und dem Planfall P1 bestehen hinsichtlich der Simulation mit dem Simulationsmodell SIMVER keine Unterschiede. Die Zielwahl durch das Simulationsmodell ist in beiden Planfällen identisch. Unterschiede ergeben sich erst bei der Betrachtung der Ergebnisse der Verkehrsumlegungen, da im Planfall P3 während der Rückreise im Zeitraum von 16.00 bis 19.00 Uhr die Maßnahme R aktiviert wurde. Bei den unterschiedlichen Netzangeboten werden im Verkehrsumlegungsprozess bei eigentlich gleichen Fahrtbeziehungen F_{ij} unterschiedliche Routen gewählt.

Planfall P4

Die Auswertung des Planfalles P1 hat ergeben, dass im Zeitraum von 10.00 bis 12.00 Uhr für die aus Richtung Westen anreisenden Besucher die aktivierten dezentralen P+R-Plätze nicht ausreichen, daher müssen Kraftfahrzeuge ungünstig bis zum P+R-Platz Laatzen-Süd weitergeführt werden. Im Planfall P4 wurde daher in der Zeit von 10.00 bis 12.00 Uhr die Aktivierung auf den Level 4 angehoben (vgl. Abb. 72), so dass für den anreisenden Besucherverkehr drei weitere P+R-Plätze (Bantorf, Kaltenweide und Flughafen) zur Verfügung stehen.

Im Planfall P4 wird der aus Richtung Westen anreisende Kraftfahrzeugverkehr zu P+R-Plätzen bereits vor dem Weltausstellungsgelände auf dezentralen P+R-Plätzen abgefangen. Die hochbelasteten Streckenabschnitte auf der A 2, der A 7, dem Messeschnellweg und der B 443 werden so entlastet. Der Planfall P4 ist generell besser zu bewerten als die Planfälle P1, P2 und P3, bei denen in noch stärkerem Maße mit Behinderungen vor der AS Laatzen zu rechnen ist. Trotz der zweistündigen Aktivierung des P+R-Platzes Kaltenweide wird im Simulationsmodell kein Kraftfahrzeug zu diesem P+R-Platz geführt, da günstigere P+R-Plätze zur Verfügung stehen, die im Simulationsmodell als attraktiver eingestuft werden. Nach den Ergebnissen der Simulation kommen am P+R-Platz Bantorf im Falle einer Aktivierung ca. 400 Pkw/h an. Dies bedeutet, dass bei einem durchschnittlichen Besetzungsgrad von 2,1 Pers./Pkw in der Zeit von 10.00 bis 12.00 Uhr ca. 840 Pers./h mit der Bahn zum Weltausstellungsgelände zu befördern sind.

Parkplatz	9 Uhr	10 Uhr	11 Uhr	12 Uhr	13 Uhr	14 Uhr	15 Uhr	16 Uhr	17 Uhr
Weltausstellungsgelände	9%	31%	59%	76%	86%	89%	88%	82%	70%
Bantorf	0%	0%	27%	53%	53%	51%	58%	44%	37%
Wunstorf	20%	40%	60%	80%	99%	96%	91%	82%	69%
Marienwerder	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Stöcken	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Brink	2%	42%	82%	81%	80%	78%	84%	76%	64%
Alte Heide	0%	11%	16%	17%	22%	30%	29%	31%	26%
Mellendorf	0%	27%	53%	58%	57%	56%	52%	47%	40%
Kaltenweide	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Flughafen	0%	0%	10%	20%	20%	19%	18%	16%	14%
Godshorn	12%	23%	23%	23%	38%	44%	47%	47%	40%
Laatzen-Süd	9%	26%	46%	60%	70%	73%	73%	69%	58%
Heisede	0%	1%	14%	21%	20%	20%	19%	17%	14%

Legende

	Aktivierungslevel 1
	Aktivierungslevel 2
	Aktivierungslevel 3
	Aktivierungslevel 4
81	deaktiviert wegen Überlaufgefahr

Abb. 75: Auslastungsgrad der Parkplätze im Planfall P4

Generell kann durch die Aktivierung der P+R-Plätze mit dem Aktivierungslevel 4 in der Hauptanreisezeit zum Weltausstellungsgelände auf den hochbelasteten Streckenabschnitten im Großraum Hannover eine günstige Verringerung der Verkehrsstärke erreicht werden. Dies gilt besonders für den aus Richtung Westen anreisenden Verkehr. Bei einer Aktivierung des P+R-Platzes Bantorf ist jedoch sicherzustellen, dass die Besucher auch mit der Bahn zum Weltausstellungsgelände befördert werden können.

6.4.3 Verkehrsumlegungen mit dem Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML

6.4.3.1 Umlegungsmethodik

Für die Ermittlung der Kapazitätsreserven im Großraum Hannover war es erforderlich, den Verkehrsablauf aufbauend auf den bestehenden Planungen und Prognosen für die EXPO 2000 so realitätsnah wie möglich im Modell abzubilden. Zu berücksichtigen waren dabei das entwickelte Lenkungskonzept, die während der Anreise geplante Maßnahme A mit Einrichtungsverkehr auf dem Messeschnellweg zum Weltausstellungsgelände sowie das dynamische Verkehrsleitsystem zu den P+R-Plätzen.

Da sich auch schon ohne die Durchführung von multi-sukzessiven Umlegungen eine realistische Verdrängung des werktäglichen Normalverkehrs durch den zusätzlichen veranstaltungsbedingten Verkehr einstellte, wurde aus Rechenzeitgründen für die durchgeführten dynamischen Einzelstundenumlegungen auf die mögliche mehrfache Verschachtelung der unterschiedlichen Fahrtenkategorien verzichtet (vgl. Abb. 27, S. 61). Die einzelnen Teilumlegungen wurden vom Modell ROUML jedoch so verarbeitet, dass eine gegenseitige Beeinflussung der Teilumlegungen und Fahrtenkategorien stattfindet.

Je nach Verkehrsdichte in den unterschiedlichen untersuchten Stundenziträumen erfordert die Konvergenz einer Gleichgewichtsumlegung mit einer Teilmatrix unterschiedlich viel Zeit. Für die Umlegung der nachmittäglichen Spitzenstunde, die bezogen auf das Gesamtnetz des Großraumes Hannover in der Stunde von 16.00 bis 17.00 Uhr liegt, benötigte das Routensuch- und Umlegungsmodell für eine Simultanumlegung von insgesamt 18 Fahrtenmatrizen (vgl. Tab. 44) etwa 35 min auf einem Computer mit einem 350 MHz Pentium II Prozessor. Von den 35 Minuten Rechenzeit wurden etwa 80% für die Umlegung des werktäglichen Normalverkehrs mit Personenkraftwagen benötigt. Für die 19 Einzelstundenumlegungen in dem Zeitraum von 5.00 bis 24.00 Uhr für einen Tag und die dabei durchgeführten jeweils 18 Teilumlegungen (vgl. Tab. 44) betrug die Rechenzeit je nach Planfall zwischen 6 h und 8 h. Eine Simulation des Verkehrsablaufes für den jeweils nächsten Tag ist damit mit dem kompletten relevanten Straßennetz des Großraumes Hannover möglich. Durch den Einsatz von 19 Computern wäre sogar innerhalb von etwa 35 min eine offline-Simulation des Zeitraumes von 5.00 bis 24.00 Uhr zu erreichen. Auch das Testen unterschiedlicher Lenkungsstrategien ist durch den Einsatz mehrerer Computer in kurzer Zeit möglich.

Die in der Tabelle 44 angegebene Reihenfolge der Teilumlegungen gewährleistet eine realitätsnahe Verdrängung des werktäglichen ortskundigen Verkehrs mit Personenkraftwagen auf das nachgeordnete Straßennetz, da jede einzelne Teilumlegung alle vorangegangenen Teilumlegungen bei der Bewertung der Reisezeit für die einzelnen Kanten berücksichtigt. Für alle auf ein weitgehend leeres Straßennetz umgelegten Fahrtenmatrizen wird eine realitätsnahe Einschätzung der Reisezeit im Modell ROUML dadurch erreicht, dass für alle Kanten von einer Mindestauslastung von etwa 40% der jeweiligen Bemessungsverkehrsstärke (vgl. Tab. 22, S. 63) ausgegangen wird. Dieses Verfahren führt zu einer schnellen Konvergenz der mit dem Gleichgewichtsverfahren durchgeführten Teilumlegungen, da die Reisezeiten von Beginn an realitätsnäher eingeschätzt werden. Für den Schwerverkehr wurde für die durchgeführten Umlegungen davon ausgegangen, dass kaum überregionaler Schwerverkehr von den Bundesautobahnen auf nachgeordnete Straßen im Großraum Hannover ausweicht. Durch eine programminterne Rückkopplung ist auch bei einem Verzicht auf eine multi-sukzessive Umlegung der Fahrtenkategorien jederzeit sichergestellt, dass der zu Beginn des Umlegungsprozesses umgelegte Schwerverkehr keine höheren Reisegeschwindigkeiten erreichen kann, als der zuletzt umgelegte werktägliche Normalverkehr mit Personenkraftwagen.

Teilumlegung	Fahrten-Gruppe	Inhalt der Fahrtenmatrix	Wegewahl
1	Schwerverkehr	Lkw-Normalverkehr	freie Routenwahl
2 bis 5	EXPO-Besucher Pkw Abreise	Fernverkehr nach Westen	mit Wegweisung im Umlegungsmodell ROUML
		Fernverkehr nach Norden	
		Fernverkehr nach Osten	
		Fernverkehr nach Süden	
6	EXPO-Besucher Pkw Anreise	Fernverkehr alle Richtungen	mit Wegweisung im Umlegungsmodell ROUML
7 bis 10	EXPO-Besucher Busse Abreise	Fernverkehr nach Westen	mit Wegweisung im Umlegungsmodell ROUML
		Fernverkehr nach Norden	
		Fernverkehr nach Osten	
		Fernverkehr nach Süden	
11	EXPO-Besucher Busse Anreise	Fernverkehr alle Richtungen	mit Wegweisung im Umlegungsmodell ROUML
12	EXPO-Besucher Pkw Anreise	Umland alle Richtungen	freie Routenwahl
13	EXPO-Besucher Pkw Abreise	Umland alle Richtungen	freie Routenwahl
14	EXPO-Besucher Pkw Anreise	Fahrten zu P+R-Plätzen	mit Zielwahl im Simulationsmodell SIMVER
15	EXPO-Besucher Pkw Abreise	Fahrten von P+R-Plätzen	mit Quelldefinition im Simulationsmodell SIMVER
16	EXPO-Besucher Pkw Anreise	Fahrten zu Parkplätzen an Stadtbahn und S-Bahn	mit Zielwahl im Simulationsmodell SIMVER
17	EXPO-Besucher Pkw Abreise	Fahrten von Parkplätzen an Stadtbahn und S-Bahn	mit Quelldefinition im Simulationsmodell SIMVER
18	Pkw	Pkw-Normalverkehr	freie Routenwahl

Tab. 44: Teilumlegungen mit dem Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML für eine Stunde während der EXPO 2000

Für die Abreise des Pkw-Fernverkehrs und der Reisebusse ist die Abbildung der Wegweisung komplizierter als für die Anreise. Der Grund dafür ist, dass es während der Anreise für den Fernverkehr nur das gemeinsame Ziel „EXPO“ gibt, während für die Abreise die vier unterschiedlichen Fernwegweiser „Dortmund“, „Hamburg“, „Berlin“ und „Kassel“ vorhanden sind. Durch die Aufteilung der Fahrtenmatrizen ist es im Routensuch- und Umlegungsmodell möglich, für jeden Fernwegweiser eine realistische Berücksichtigung zu gewährleisten.

6.4.3.2 Verkehrsstärken auf den Haupttrouten

Allgemeines

Die Ergebnisse der dynamischen Einzelstundenumlegung wurden, um sie besser auswerten zu können, mit den in Ziff. 5.4.6 beschriebenen Auswertungsmodulen zu Diagrammen für den Verkehrsablauf über den einen ganzen Tag zusammengefasst. Für die einzelnen Streckenabschnitte im Netzmodell des Großraumes Hannover ergeben sich dabei, trotz der für die Aufteilung der Verkehrsnachfrage auf die einzelnen Stunden verwendeten mittleren Tagesganglinie für den Großraum Hannover (vgl. Abb. 21, S. 49), sehr unterschiedliche Ganglinien. Da eine vollständige Auflistung der Ergebnisse der Simulationen im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen kann, werden im Folgenden Abschnitt nur einige der wichtigen Ergebnisse dargestellt, die zeigen sollen, dass es gelungen ist, den Verkehrsablauf im Großraum Hannover dynamisch über einen ganzen Tag zu simulieren.

Für die eine dynamische Einzelstundenumlegung wurden 18 Fahrtenmatrizen mit 450 Verkehrszellen also mit mehr als 200.000 Fahrtbeziehungen auf das Netzmodell umgelegt. Insgesamt wurden also mehr als 65.000.000 potenzielle Fahrtbeziehungen hinsichtlich ihrer Relevanz für einzelne Streckenabschnitte in jeweils einem Diagramm kombiniert (vgl. z.B. Abb. 76).

A 2 in Richtung Berlin

Die A 2 in Richtung Berlin ist nach den Prognosen für die Weltausstellung die Bundesautobahn, die am stärksten vom EXPO-bedingten Zusatzverkehr betroffen sein wird (vgl. Tab. 1). Im Westen von Hannover überlagert sich der zur Weltausstellung mit Personenkraftwagen anreisende Besucherverkehr zumindest teilweise mit dem nach Hannover einpendelnden Berufsverkehr (vgl. Abb. 76).

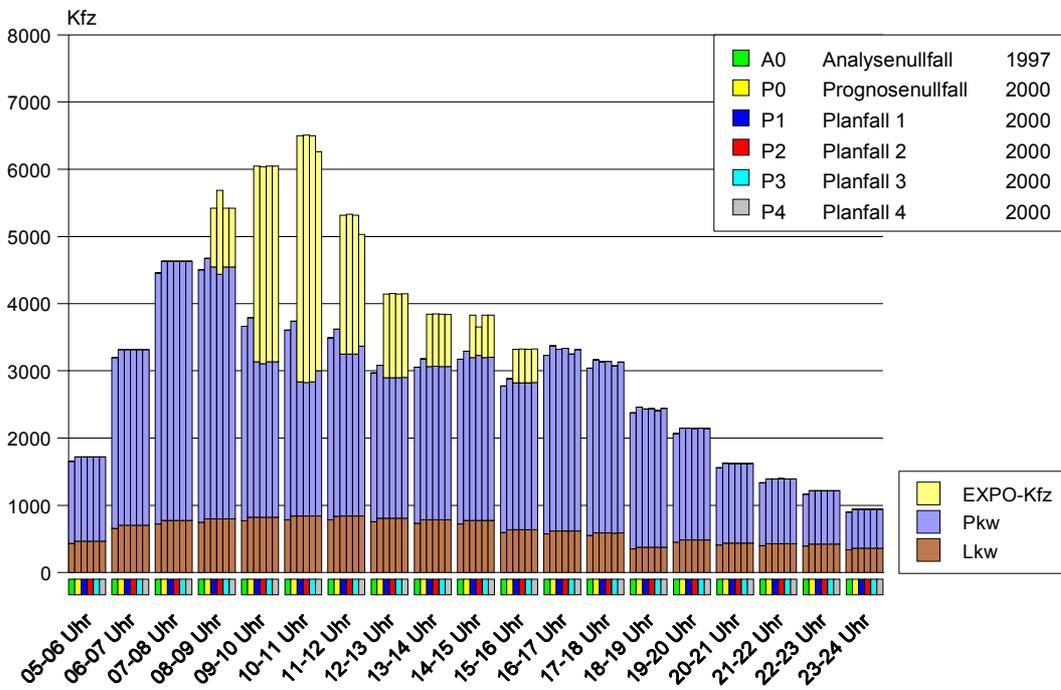


Abb. 76: Verkehrsstärken auf dem Streckenabschnitt zwischen der AS Garbsen und der AS Hannover-Herrenhausen in Richtung Berlin (werktags, 370.000 Besucher)

Vor allen in der Hauptanreisezeit zur Weltausstellung etwa zwischen 9.00 und 11.00 Uhr ist gegenüber dem Prognosenufall eine deutliche Verdrängung des werktäglichen Normalverkehrs von der A 2 zu erkennen (vgl. Abb.76). Zieht man zum Vergleich einen Streckenabschnitt auf der A 2 heran, der etwas östlich vom Zentrum und noch etwas dichter am Stadtkern von Hannover liegt, so ergibt sich ein ganz anderer Verlauf der Tagesganglinie (vgl. Abb. 77). Der in Abbildung 77 dargestellt Streckenabschnitt zwischen der AS Bothfeld und der AS Lahe weist eine deutlich vom auspendelnden Berufsverkehr dominierte Ganglinie auf. Die ungünstige Überlagerung des zur EXPO 2000 anreisenden Besucherverkehrs mit dem Berufsverkehr ist auf diesem Streckenabschnitt während der Anreise zum Weltausstellungsgelände nicht so ausgeprägt, wie auf dem Streckenabschnitt zwischen der AS Garbsen und der AS Hannover-Herrenhausen (vgl. Abb. 76).

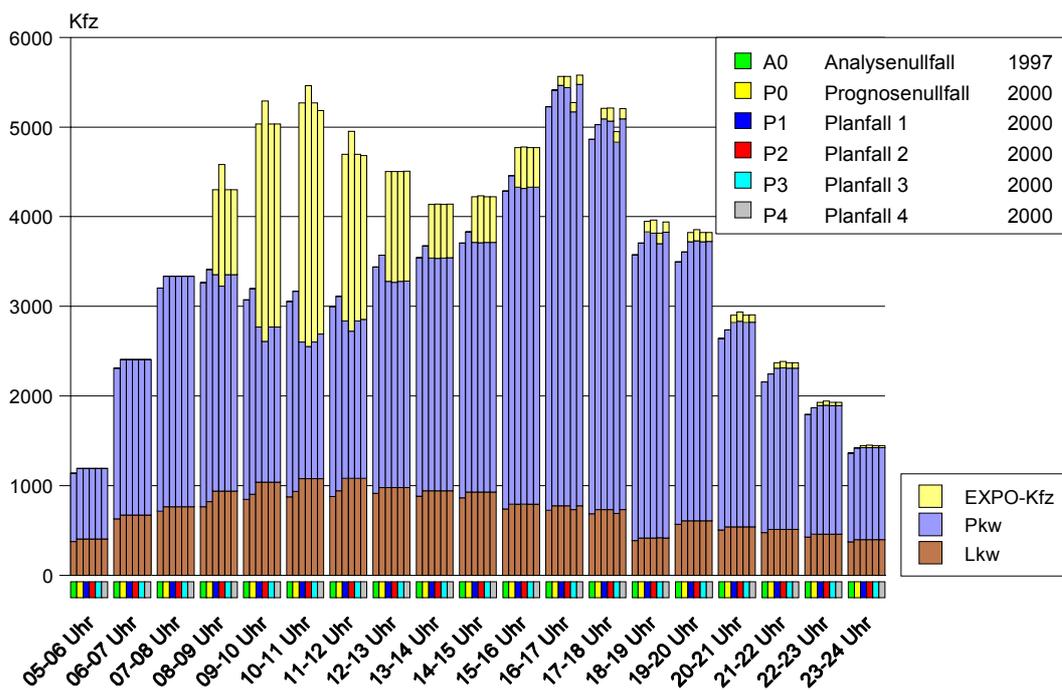


Abb. 77: Verkehrsstärken auf dem Streckenabschnitt zwischen der AS Hannover-Bothfeld und der AS Hannover-Lahe in Richtung Berlin (werktags, 370.000 Besucher)

Im Planfall P2 (vierte Säule der Darstellung in Abb. 77) ist zu erkennen, dass die zugrunde gelegte Verkehrslenkungsstrategie, den aus Richtung Westen anreisenden Besucherverkehr nicht auf dezentralen P+R-Plätzen abzufangen, sich in der Zeit von etwa 8.00 Uhr bis 12.00 Uhr erkennbar nachteilig auswirkt. Der EXPO-bedingte Zusatzverkehr im Planfall P2 weist in diesem Zeitraum die höchsten Verkehrsstärken auf.

A 2 in Richtung Dortmund

Während es bei der Anreise zum Weltausstellungsgelände auf dem Streckenabschnitt zwischen der AS Hannover-Bothfeld und der AS Hannover-Lahe zu einer im Prinzip günstigen Entzerrung der Anreisespitzenstunde zum Weltausstellungsgelände und der ausgeprägten nachmittagsspitzenstunde im Berufsverkehr kommt (vgl. Abb. 77), findet auf der A 2 während der Abreise vom Weltausstellungsgelände in Fahrtrichtung Dortmund eine Überlagerung des aus der Stadt auspendelnden Berufsverkehrs mit dem Abreiseverkehr vom Weltausstellungsgelände statt. Besonders deutlich ist dies auf dem dreistreifigen Streckenabschnitt zwischen der AS Hannover-Herrenhausen und der AS Garbsen zu erkennen (vgl. Abb. 76). Die Verkehrsstärken sind in der nachmittäglichen Hauptverkehrszeit von 16.00 Uhr bis 18.00 Uhr so hoch, dass sie nach den zugrunde

gelegten Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes (vgl. Tab. 37) als sehr störanfällig bzw. nicht abwickelbar einzustufen sind. Ohne Gegenmaßnahmen ist an einem Werktag mit bis zu 370.000 Besuchern in der nachmittäglichen Hauptverkehrszeit des Normalverkehrs von 16.00 bis etwa 18.00 Uhr auf den hoch belasteten Streckenabschnitten in Richtung Dortmund mit regelmäßig auftretenden Staus zu rechnen. Etwa 25 der 153 Veranstaltungstage der EXPO 2000 sind nach den Prognosen hiervon betroffen. Eine bereits empfohlene Gegenmaßnahme ist die frühzeitige Information der Besucher auf dem Weltausstellungsgelände, so dass im Falle von auftretenden Störungen die Abreise vom Weltausstellungsgelände verschoben werden kann.

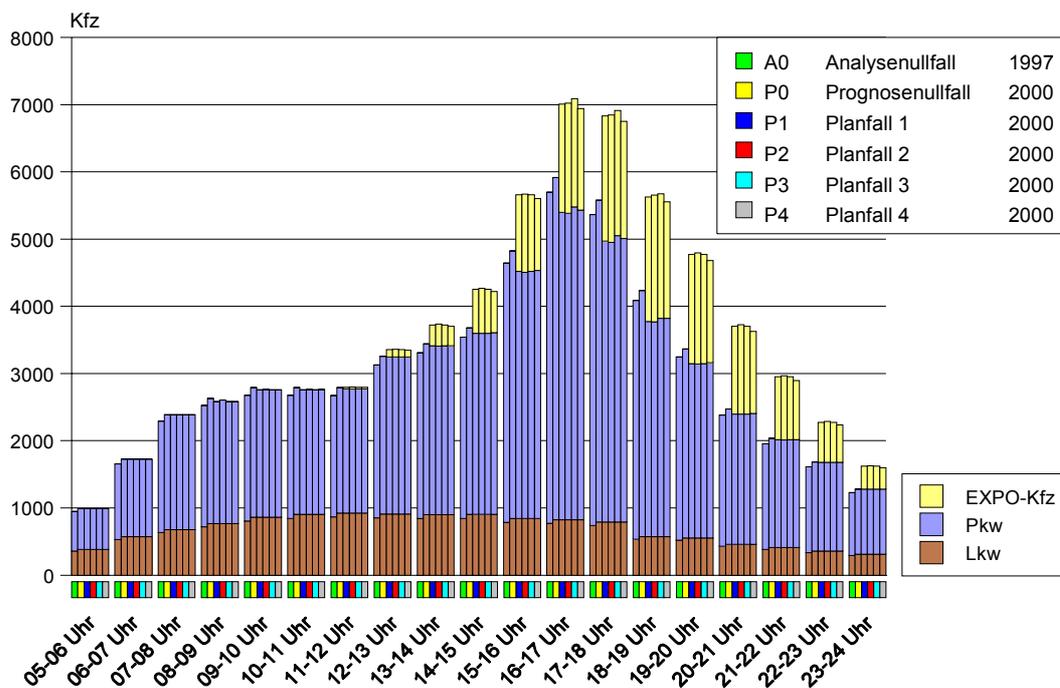


Abb. 78: Verkehrsstärken auf dem Streckenabschnitt zwischen der AS Hannover-Herrenhausen und der AS Garbsen in Richtung Dortmund (werktags, 370.000 Besucher)

Die durchgeführte Simulation eines ganzen Werktages ermöglicht es auch, Schwachstellen im Großraum von Hannover zu lokalisieren, die außerhalb der An- und Abreisepitzenstunden zum bzw. vom Weltausstellungsgelände liegen.

Berücksichtigung der betrieblichen Maßnahmen A (Anreise) und R (Rückreise)

Die Maßnahme A (Anreise) und die damit verbundene Sperrung des Messeschnellweges in Fahrtrichtung Norden hat erhebliche Auswirkungen auf den werktäglichen Normalverkehr in der Region. Sie ist jedoch zur Abwicklung des prognostizierten anreisenden Besucherverkehrs mit Personenkraftwagen zum Weltausstellungsgelände etwa in der Zeit von 8.00 bis 12.00 Uhr erforderlich. Auch die Maßnahme R (Rückreise) wurde in dieser Arbeit hinsichtlich ihrer Notwendigkeit geprüft.

Den beiden Abbildungen 79 und 80 sind die Wechselwirkungen zwischen dem Messeschnellweg und der parallel verlaufenden A 7 zu entnehmen. In der Zeit von 8.00 bis 12.00 Uhr ist in den Planfällen P1 bis P4 die Maßnahme A aktiv, das bedeutet, der Messeschnellweg ist in Richtung Norden für den Normalverkehr gesperrt. Auf der parallel verlaufende A 7 in Richtung Hamburg ist ein deutlicher Anstieg des Normalverkehrs zu erkennen.

Im Planfall P3 wurde in der Zeit von 16.00 bis 19.00 Uhr die Maßnahme R mit der damit verbundenen Sperrung des Messeschnellweges für den Normalverkehr in Richtung Süden vorgenommen. Der Abbildung 79 ist der deutliche Anstieg des EXPO-bedingten Zusatzverkehrs aber auch ein deutlicher Anstieg des Normalverkehrs (durch die Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Messeschnellweges) zu entnehmen. Auf der A 7 ist in Richtung Kassel durch die Sperrung des Messeschnellweges in Richtung Süden eine deutliche Zunahme des Normalverkehrs zu erkennen (ohne Abbildung). Die Maßnahme R ist nach dem Lenkungs-konzept für die Weltausstellung nicht vorgesehen (vgl. Verkehrlenkungskonzept Abb. 3 und 4). Es ist jedoch generell möglich die Maßnahme R zu nutzen, um langanhaltende Störungen während der Abreise aufzulösen. Generell haben die Untersuchungen der Maßnahme R jedoch gezeigt, dass eine Aktivierung der Maßnahme R nicht vor 18.00 Uhr erfolgen sollte, da ansonsten die zu erwartende Störungen des werktäglichen Normalverkehrs zu hoch sind.

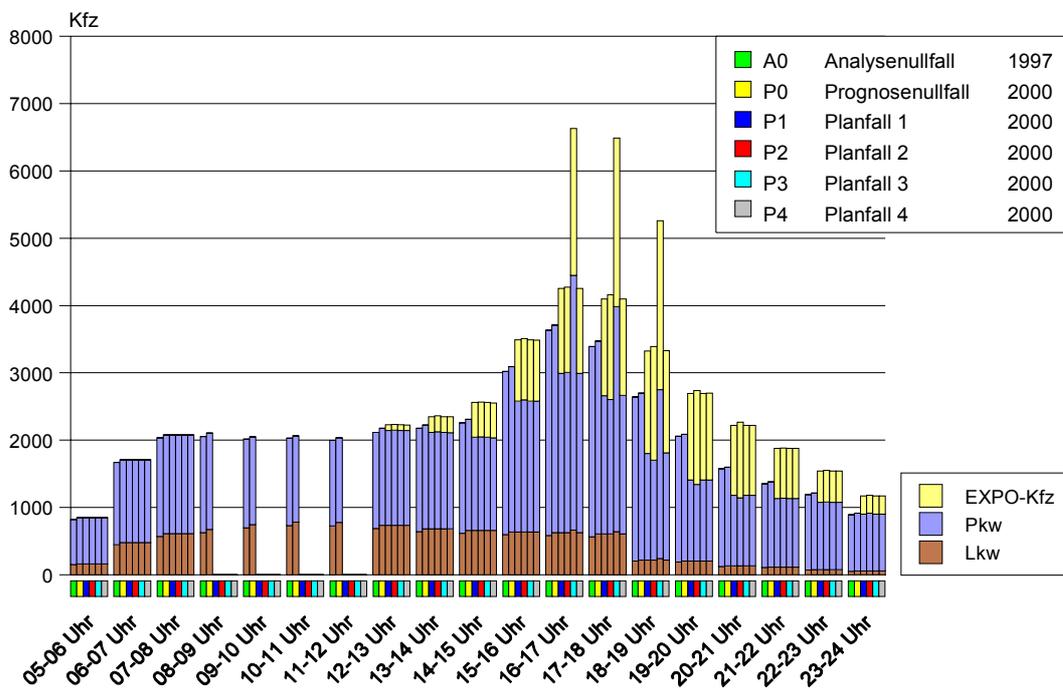


Abb. 79: Verkehrsstärken auf dem Messeschnellweg auf dem Streckenabschnitt zwischen der AS Pferderturm und der AS Weidetor in Richtung Norden (werktags, 370.000 Besucher)

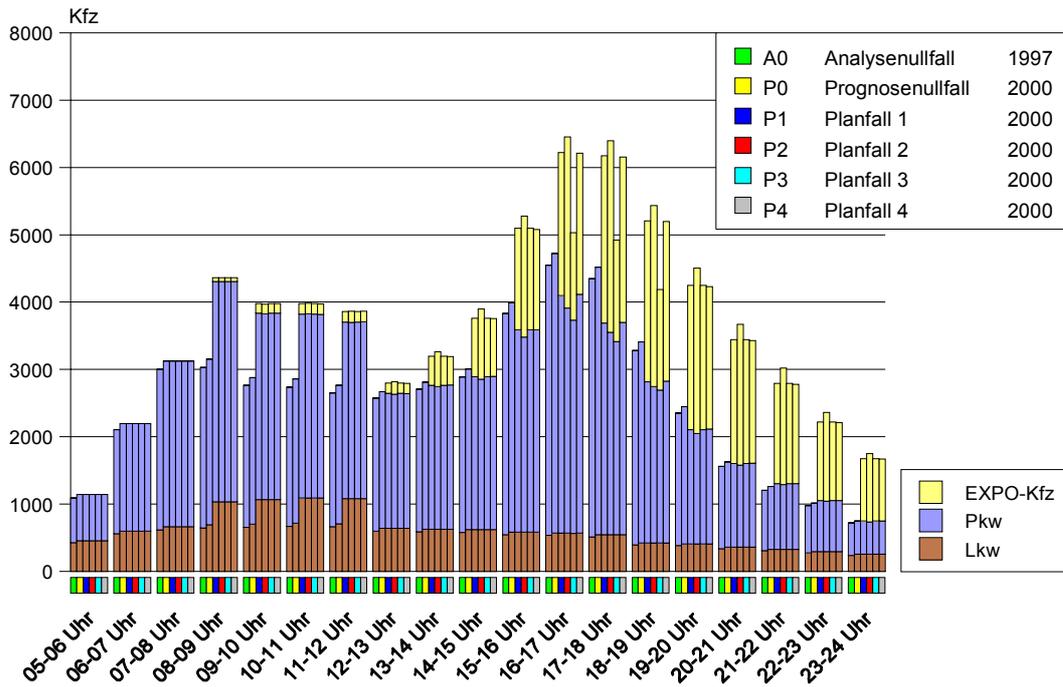


Abb. 80: Verkehrsstärken auf der A 7 auf dem Streckenabschnitt zwischen der AS Hannover-Anderten und dem AK Hannover-Ost in Richtung Hamburg (werktags, 370.000 Besucher)

Auch auf anderen parallel zum Messeschnellweg verlaufenden Straßen konnte eine Verlagerung des Verkehrs während der betrieblichen Maßnahme A und R nachgewiesen werden.

6.4.3.3 Schwachstelle B 443

Anreise

Die B 443 in Richtung Westen ist im Planfall P3 zwischen der AS Laatzen und der Zufahrt zum P+R-Platz Laatzen-Süd mit bis zu 3.000 Kfz/h stark belastet. Ob es auf dem Streckenabschnitt zu Staus kommt, ist jedoch nicht maßgebend von der Streckenbelastung, sondern von der Geschwindigkeit der Abnahme des Verkehrs zum P+R-Platz Laatzen-Süd abhängig. Im gesamten Anreisezeitraum sind die Verkehrsstärken auf dem Streckenabschnitt zwischen der AS Laatzen und der Zufahrt zum P+R-Platz Laatzen-Süd im Planfall P2 deutlich höher als in den Planfällen P1, P3, und P4 (vgl. vierte Säule von links, Abb. 81).

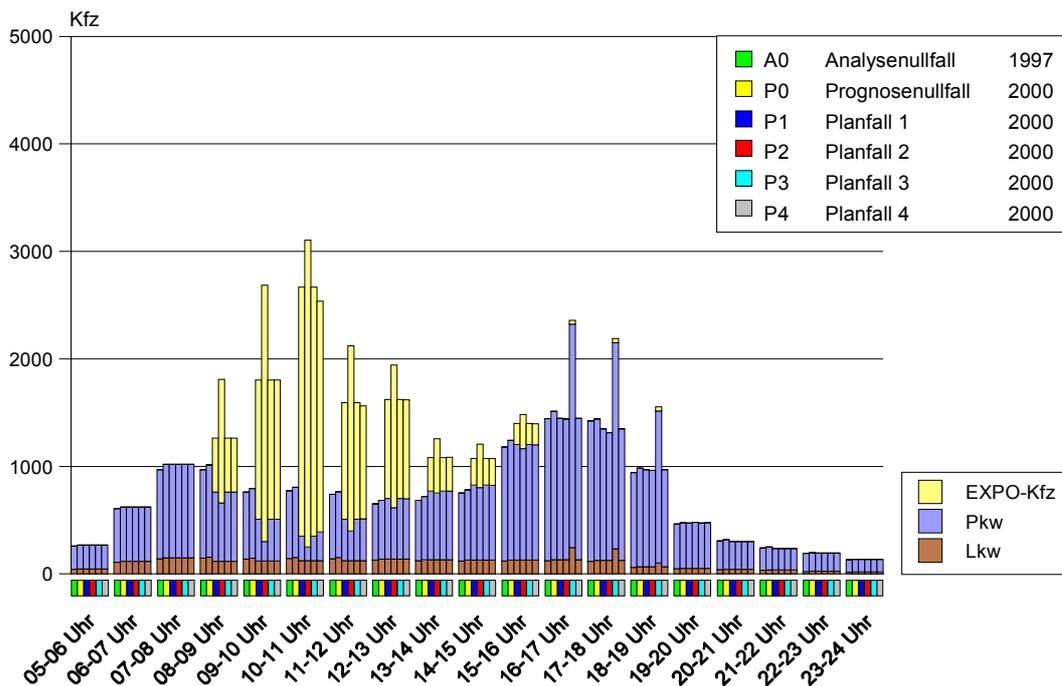


Abb. 81: Verkehrsstärken auf der B 433 zwischen der AS Laatzen und der Zufahrt zum P+R-Platz Laatzen Süd in Richtung Westen (werktags, 370.000 Besucher)

Während der Maßnahme R im Planfall P3 steigen die Verkehrsstärken auf der B 443 in Richtung Westen in der Zeit von 16.00 bis 19.00 um bis zu 800 Kfz/h an. Die Erhöhung der Verkehrsstärken erfolgt durch werktäglichen Kraftfahrzeugverkehr, der ohne die Maßnahme R den Messeschnellweg in Richtung Süden genutzt hätte. Auch auf der B 65 in Richtung Osten ist dieser zusätzliche, durch die Maßnahme R zu Umwegen gezwungene, Kraftfahrzeugverkehr zu erkennen.

Zur Vermeidung von Staus auf der B 443, die zurück bis in die A 7 reichen können, sollte eine Beschickung des P+R-Platzes Laatzen-Süd, wie im Planfall P2, unbedingt vermieden werden, zumal sich dieser Planfall auf der B 443 auch während der Abreise als äußerst störanfällig erweist. Statt dessen sollte zur Entspannung der Verkehrslage in der Region Hannover an Tagen, an denen mit bis zu 370.000 Besuchern zu rechnen ist, während der Anreise generell eine Aktivierung der Parkplätze bis zum Aktivierungslevel 4 erfolgen, wie sie im Planfall P4 vorgenommen wurde. Auf eine Aktivierung der Maßnahme R vor 18.00 Uhr sollte unbedingt verzichtet werden, da in dieser Zeit zu viele Kraftfahrzeuge des werktäglichen Normalverkehrs zu Umwegen gezwungen werden.

Abreise

Auf der B 443 treten auf dem Streckenabschnitt zwischen dem Knotenpunkt B 6/B 443 und der Zufahrt zum P+R-Platz Laatzen-Süd (10.000 Stellplätze) in Richtung Osten sowohl während der Anreise als auch während der Abreise Verkehrsstärken von etwa 2.000 Kfz/h auf. Bei aktivierter Maßnahme A ist ein zusätzlicher Kraftfahrzeugstrom zur AS Laatzen von bis zu 900 Kfz/h zu erkennen (vgl. Abb. 82).

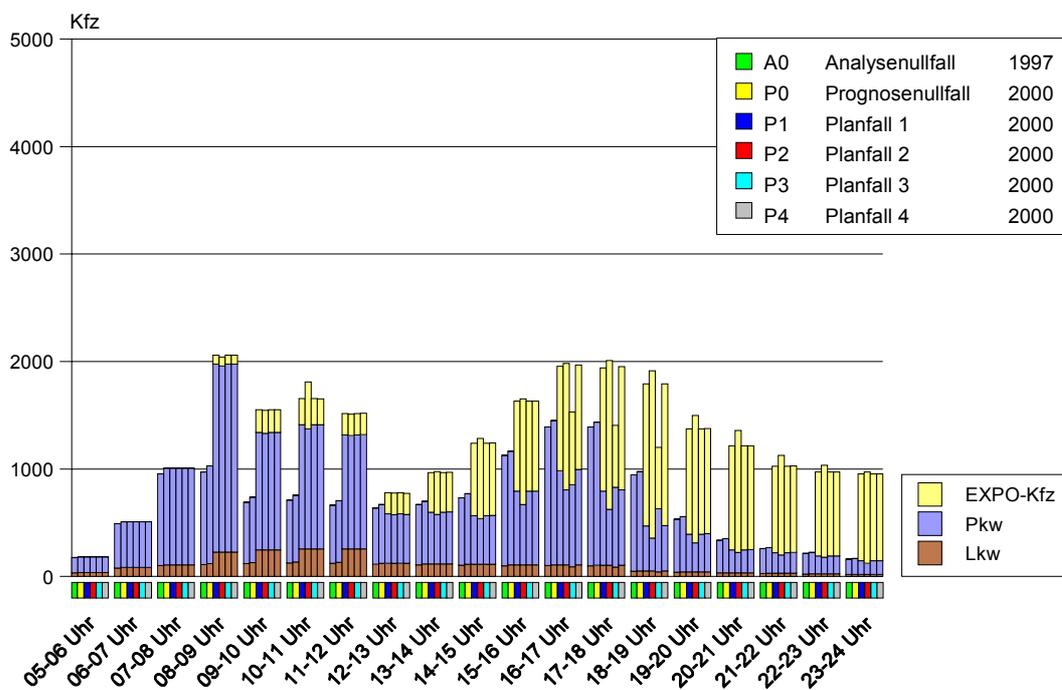


Abb. 82: Verkehrsstärken auf dem Streckenabschnitt zwischen dem Knotenpunkt B 6/B 443 und der Zufahrt zum P+R-Platz Laatzen-Süd in Richtung Osten (werktags, 370.000 Besucher)

In der Zeit von 16.00 bis 19.00 Uhr ist der Streckenabschnitt als störanfällig einzustufen, da auf der B 443 an der Zufahrt zum P+R-Platz Laatzen-Süd lediglich ein Fahrstreifen für den durchgehenden Verkehr zur Verfügung steht. Der vom P+R-Platz Laatzen-Süd in Richtung Osten über die B 443 zur AS Laatzen abreisende Kraftfahrzeugverkehr wird mittels Fahrstreifenaddition auf die B 443 geführt. Im gesamten Abreisezeitraum ist zu erkennen, dass im Planfall P2, in dem besonders viele Kraftfahrzeuge zum P+R-Platz Laatzen-Süd geführt worden sind, um etwa 400 Kfz/h höhere Abreiseverkehrsstärken erreicht werden als in den anderen Planfällen mit EXPO-bedingtem Zusatzverkehr. Die Verkehrsstärken auf diesem Streckenabschnitt sind generell schon sehr hoch. Noch kritischer sind jedoch die Verkehrsstärken an der Einfahrt in die A 7 in Richtung Norden einzuschätzen. Die Leistungsfähigkeit der Einfahrt von maximal etwa 1.000 Kfz/h wird bei Verkehrsstärken von bis zu 2.400 Kfz/h in Richtung Norden erheblich überschritten. Auf der B 443 ist ohne die Maßnahme R in der Zeit von 16.00 bis 21.00 Uhr mit Staus auf der B 443 in Richtung Osten vor der AS Laatzen zu rechnen (vgl. Abb. 83).

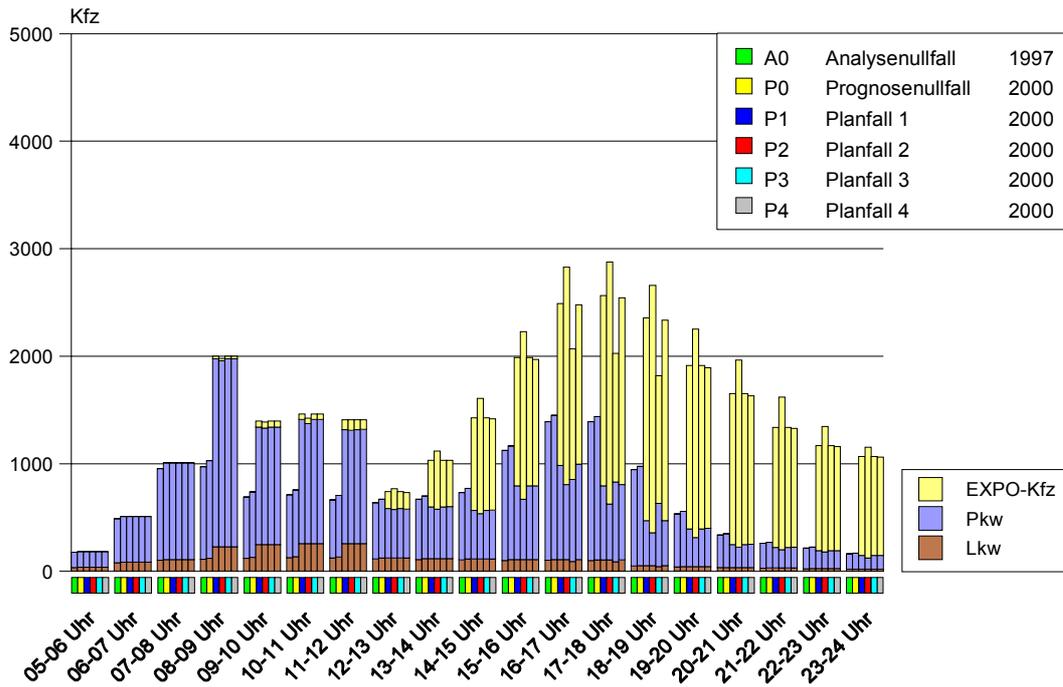


Abb. 83: Verkehrsstärken auf der B 443 auf dem Streckenabschnitt zwischen der Zufahrt zum P+R-Platz Laatzen-Süd und der AS Laatzen in Richtung Osten (werktags, 370.000 Besucher)

Während der Abreise ist nach den durchgeführten Simulationen auf der B 443 in Richtung Osten in der Zeit von 16.00 bis 21.00 Uhr mit erheblichen Behinderungen (Staus) zu rechnen. Zur Vermeidung von Staus in den Abendstunden könnte in der Zeit von 18.00 bis 21.00 Uhr die Maßnahme R geschaltet werden.

7. Zusammenfassung und Empfehlungen

7.1 Ausgangssituation und Vorarbeiten für eine dynamische Simulation des motorisierten Individualverkehrs

Zur Verkehrssteuerung in der Region Hannover während der EXPO 2000 wurden bzw. werden unterschiedliche Systeme aufgebaut:

- eine Wechselwegweisungsanlage,
- mehrere Verkehrsbeeinflussungsanlagen,
- Fahrstreifensignalisierungen an Knotenpunkten der Bundesautobahnen und auf dem Messering,
- ein dynamisches Verkehrsleitsystem zu den P+R-Plätzen und
- ein weitgehend automatisches System zum Schalten der betrieblichen Maßnahme A oder R (Einrichtungsverkehr auf dem Messeschnellweg während der Anreise und Rückreise zum bzw. vom Messegelände).

Die in der regionalen Planung normalerweise ausreichende Modellierung des mittleren werktäglichen Normalverkehrs, die auch für den Großraum Hannover schon vorlag, ist zur Beurteilung der Verkehrsqualität im Straßennetz der Region Hannover während einer Großveranstaltung wie der EXPO 2000 nicht geeignet. Bei dem veranstaltungsbedingten Krafffahrzeugverkehr während der EXPO 2000 handelt es sich um einen extrem gerichteten Verkehr zum und vom Weltausstellungsgelände. Dieser veranstaltungsbedingte Krafffahrzeugverkehr wird deutlich ausgeprägte Spitzenstunden aufweisen, die jedoch nicht mit den Hauptverkehrszeiten im werktäglichen Normalverkehr zusammenfallen müssen bzw. sollen.

In der Region Hannover wurde im Zeitraum von 1995 bis 1998 ein Lenkungskonzept für die Weltausstellung EXPO 2000 erarbeitet [2]. Dieses wird von der move GmbH, die den Verkehr während der Weltausstellung EXPO 2000 steuern soll, umgesetzt werden. Die anreisenden Besucher sollen nach dem entwickelten Lenkungskonzept so gesteuert werden, dass die vorhandene Infrastruktur optimal ausgenutzt werden kann. Zur Prüfung und Verfeinerung des Verkehrslenkungskonzeptes für den motorisierten Individualverkehr für die Weltausstellung EXPO 2000 war es daher erforderlich, mit den am Institut eingesetzten ökonomischen Verkehrsnachfragemodell SAN stundengenaue Verkehrsnachfragematrizen für den Großraum Hannover zu ermitteln, um den Verkehrsablauf in der Region Hannover realitätsnah abbilden zu können.

Die Verkehrsmodellrechnungen für EXPO 2000 im Rahmen der Untersuchung „Verkehrliche Auswirkungen EXPO-bedingter Zusatzverkehre im Großraum Hannover“ [2] haben gezeigt, dass die Abbildung von Wechselwegweisungsanlagen und des weitgehend ortsunkundigen Veranstaltungsverkehrs mit den herkömmlichen Verkehrsumlegungsmodellen schwierig ist. Die in der Untersuchung aus dem Jahre 1996 angewandte Methode, den EXPO-bedingten Zusatzverkehr über die Definition von Zwischenzielen auf die ausgeschilderten Routen zu lenken, war nur ein erster Ansatz, um den EXPO-bedingten Zusatzverkehr realitätsnah abzubilden. Die Abbildung von Störfällen im Straßennetz ist jedoch mit dem damals angewandten Verfahren nicht oder zumindest nur sehr eingeschränkt möglich.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte eine Aktualisierung der stundengenauen Verkehrsnachfragematrizen für den werktäglichen Personenverkehr im Großraum Hannover. Aus der beim Kommunalverband Großraum Hannover vorliegenden Wirtschaftsverkehrsmatrix für einen mittlere Werktag wurden in dieser Arbeit Fahrtenmatrizen für den Schwerverkehr in Stundengenauigkeit abgeleitet. Die Kalibrierung dieser stundengenauen Wirtschaftsverkehrsmatrizen für den Großraum Hannover erfolgte überwiegend mit Hilfe von Auswertungen von Dauerzählstellendaten rund um Hannover. Für den Zeitraum der EXPO 2000 erfolgte für die Verkehrsnachfragematrizen des werktäglichen Normalverkehrs eine Trendprognose von dem Basisjahr 1997 auf das Jahr 2000.

7.2 Entwickelte Verkehrsmodelle

Die bisher in der Region Hannover eingesetzten Verkehrsumlegungsmodelle DIAL-IV und VISUM konnten das Verkehrslenkungs-konzept für die EXPO 2000 nicht bzw. nicht realitätsnah umsetzen, da diese Programmsysteme keine ausreichend flexiblen Möglichkeiten bieten, einzelne Fahrzeugkollektive kontrolliert über vorgegebene Routen zu einem definierten Ziel zu führen. Auch die Abbildung eines dynamischen Verkehrsleitsystems zu P+R-Plätzen ist mit diesen Programmsystemen nicht möglich.

Aus diesem Grund wurden in der vorliegenden Arbeit zwei Verkehrsmodelle entwickelt, die es gemeinsam ermöglichen, den Verkehrsablauf einer Region (Region Hannover) während einer Großveranstaltung wie der EXPO 2000 realitätsnah abzubilden.

- Im **Simulationsmodell Veranstaltungsverkehr (SIMVER)** erfolgt während der simulierten Anreise zur Veranstaltung die Zielwahl der Besucher, die zu P+R-Plätzen fahren. Für die Abreise von den P+R-Plätzen erfolgt die Quelldefinition gemäß der während der Anreise getroffenen Zielwahl. Die Prognosen für den Besucherverkehr zur EXPO 2000, die der Simulation mit dem Simulationsmodell SIMVER zugrunde liegen, basieren auf den im Arbeitskreis Verkehrsmanagement abgestimmten Szenarien. Das Simulationsmodell protokolliert während der Anreise auch, zu welchem Parkplatz wie viele Personenkraftwagen von Besuchern aus welcher Himmelsrichtung angereist sind. Dies ist erforderlich, um die Personenkraftwagen von Besuchern während der Abreise vom jeweiligen P+R-Platz auch wieder in die entsprechende Richtung abreisen zu lassen.

Als Ergebnis eines Simulationslaufes werden die Fahrtenmatrizen für den veranstaltungsbedingten Besucherverkehr ausgegeben. Der Protokollausdruck der Simulation der An- und Abreise eines ganzen Tages liefert erste Hinweise darauf, von welcher Stunde eines Tages an während der Anreise zur untersuchten Großveranstaltung aus welcher Richtung mit Problemen zu rechnen ist, da Warnungen ausgegeben werden, sobald weniger P+R-Stellplatzkapazitäten für eine Anreiserichtung zur Verfügung stehen, als Fahrzeuge anreisen.

Eine Bewertung unterschiedlicher Verkehrslenkungsstrategien ist mit dem Simulationsmodell SIMVER noch nicht abschließend möglich, da das Simulationsmodell den Verkehrszustand auf den einzelnen Streckenabschnitten im Netzmodell nicht kennt und somit nicht beurteilt werden kann, ob die Verkehrszustände, die sich aufgrund der aktuell geschalteten Wegweisung im Straßennetz auf den einzelnen Streckenabschnitten im Großraum Hannover einstellen, überhaupt abzuwickeln sind. Abschließend kann eine Bewertung unterschiedlicher Verkehrslenkungsstrategien erst dann erfolgen, wenn die Ergebnisse des Simulationsmodells SIMVER (die Fahrtenmatrizen für den EXPO-bedingten Zusatzverkehr) mit dem Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML zusammen mit den Fahrtenmatrizen für den werktäglichen Normalverkehr (Schwerverkehr und Personenkraftwagen) auf das Netzmodell für den Großraum Hannover umgelegt werden.

- **Das Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML** ermöglicht es, neben der Abbildung des werktäglichen Normalverkehrs (Lkw und Pkw) auch gelenkten und überwiegend ortsunkundigen Veranstaltungsverkehr abzubilden. Der Umlegungsprozess erfolgt im Modell ROUML simultan für den Schwerverkehr, für den ortsunkundigen EXPO-Besucherverkehr und für den ortskundigen Personenkraftwagenverkehr, so dass sich die unterschiedenen Fahrzeugkategorien gegenseitig beeinflussen. In einer multi-sukzessiven Simultanumlegung (vgl. Abb. 84) können die unterschiedenen Fahrtenkategorien (Lkw, ortsunkundige Pkw von Veranstaltungsbesuchern, ortskundige Pkw) mehrfach in unterschiedlich großen Anteilen umgelegt werden.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML ermöglicht es, beliebig viele unterschiedliche Fahrtenmatrizen in einem multi-sukzessiven Simultanumlegungsprozess miteinander zu kombinieren. Für jede Teilumlegung einer Fahrtenmatrix kann zwischen unterschiedlichen Umlegungsverfahren gewählt werden. Für den ortsunkundigen Veranstaltungsverkehr kann während jeder Teilumlegung einer Fahrtenmatrix zusätzlich eine Wegweisung vorgegeben werden. Dies ermöglicht es, für jede An- und Abreiserichtung die vorhandene Wegweisung nachzubilden. Die Verkehrsumlegungen für den Schwerverkehr berücksichtigen die Unterschiede von Lastkraftwagen gegenüber den Personenkraftwagen hinsichtlich des Fahrverhaltens und der Routenwahl.

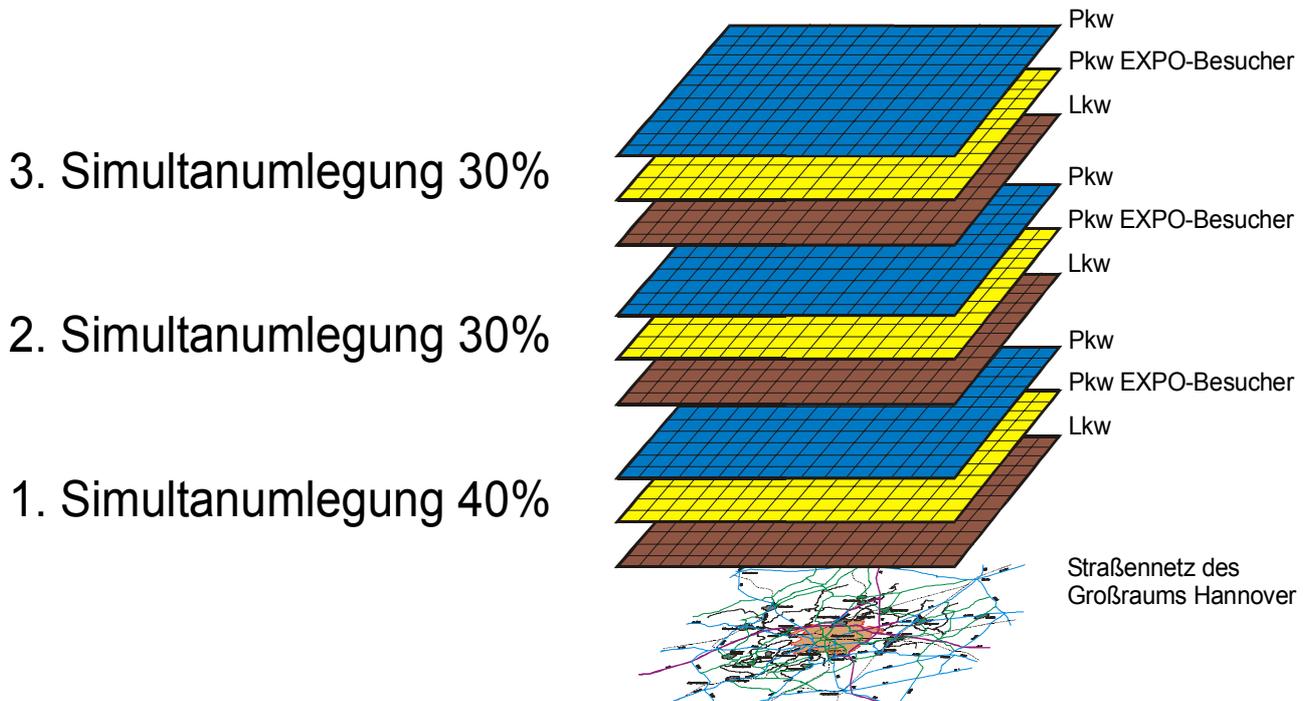


Abb. 84: Prinzip der multi-sukzessiven Simultanumlegung im Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML

Die Kombination der Simulation der Verkehrslenkungsstrategie im Simulationsmodell SIMVER mit den dynamischen Einzelstundenumlegungen im Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML ermöglicht es, die Folgen einer Verkehrslenkungsstrategie mit dem Ziel eines optimalen Einsatzes von Stellplatzreserven zur Vermeidung von Überlastungen des Straßennetzes zu überprüfen.

Schon seit Jahren wird in der Region Hannover bei Leitmesen wie der Hannover Messe Industrie oder der CeBIT auf dem Messegelände der Deutschen Messe AG eine besondere betriebliche Maßnahme auf dem Messeschnellweg eingerichtet. Der an- und abreisende Personenkraftwagenverkehr wird in den Spitzenzeiten auf dem vier- bzw. abschnittsweise sogar sechstreifigem Messeschnellweg jeweils im Einrichtungsverkehr geführt (Maßnahme A (Anreise), Maßnahme R (Rückreise)). Untersuchungen haben gezeigt (vgl. [48][49][50]), dass zumindest die Maßnahme A auch während der Großveranstaltung EXPO 2000 notwendig ist.

Für eine dynamische Simulation des Verkehrsablaufes in einer Region (Region Hannover) ist es erforderlich, auch das Netzmodell dynamisch verändern zu können, um Prognosen für den Verkehrsablauf während betrieblicher Maßnahmen wie z.B. der Maßnahme A und R machen zu können. Verkehrsmodellrechnungen mit möglichst hoher zeitlicher Differenzierung sind zur Abbildung des Verkehrsablaufes während einer Großveranstaltung wie der EXPO 2000 erforderlich, da sonst die auftretenden Spitzenbelastungen nicht genau genug eingeschätzt werden können. Zur Abbildung des Normalverkehrs und der während großer Veranstaltungen in Hannover üblichen betrieblichen Maßnahmen A und R sind zumindest drei Netzmodellzustände (Normalzustand, Maßnahme A, Maßnahme R) erforderlich.

7.3 Dynamische Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs am Beispiel der EXPO 2000

Es hat sich gezeigt, dass es nur mit einer dynamischen Simulation eines ganzen Veranstaltungstages möglich ist, das Verkehrsaufkommen einer entsprechenden Großveranstaltungen mit der Nutzung von dezentral gelegenen P+R-Plätzen im Modell realitätsnah abbilden (vgl. Abb. 85).

Für eine dynamische Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs unter Berücksichtigung einer Großveranstaltung wie der EXPO 2000 sind zwei Arbeitsschritte erforderlich (vgl. Abb. 85):

- Im ersten Arbeitsschritt müssen zur Vorbereitung der dynamischen Simulation die Verkehrsnachfragematrizen für den werktäglichen Normalverkehr (Personenkraftwagen und Schwerverkehr) in Stundengenauigkeit erarbeitet werden.
- Im zweiten Arbeitsschritt kann die dynamische Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs erfolgen. Durch die Vorbereitung der Verkehrsnachfragematrizen für den Schwerverkehr und den Verkehr mit Personenkraftwagen ist es möglich, die eigentliche dynamische Simulation eines ganzen Werktages unter Einbeziehung einer Prognose (z.B. für den nächsten Tag) und einer Simulation des veranstaltungsbedingten Verkehrs in relativ kurzer Zeit durchzuführen.

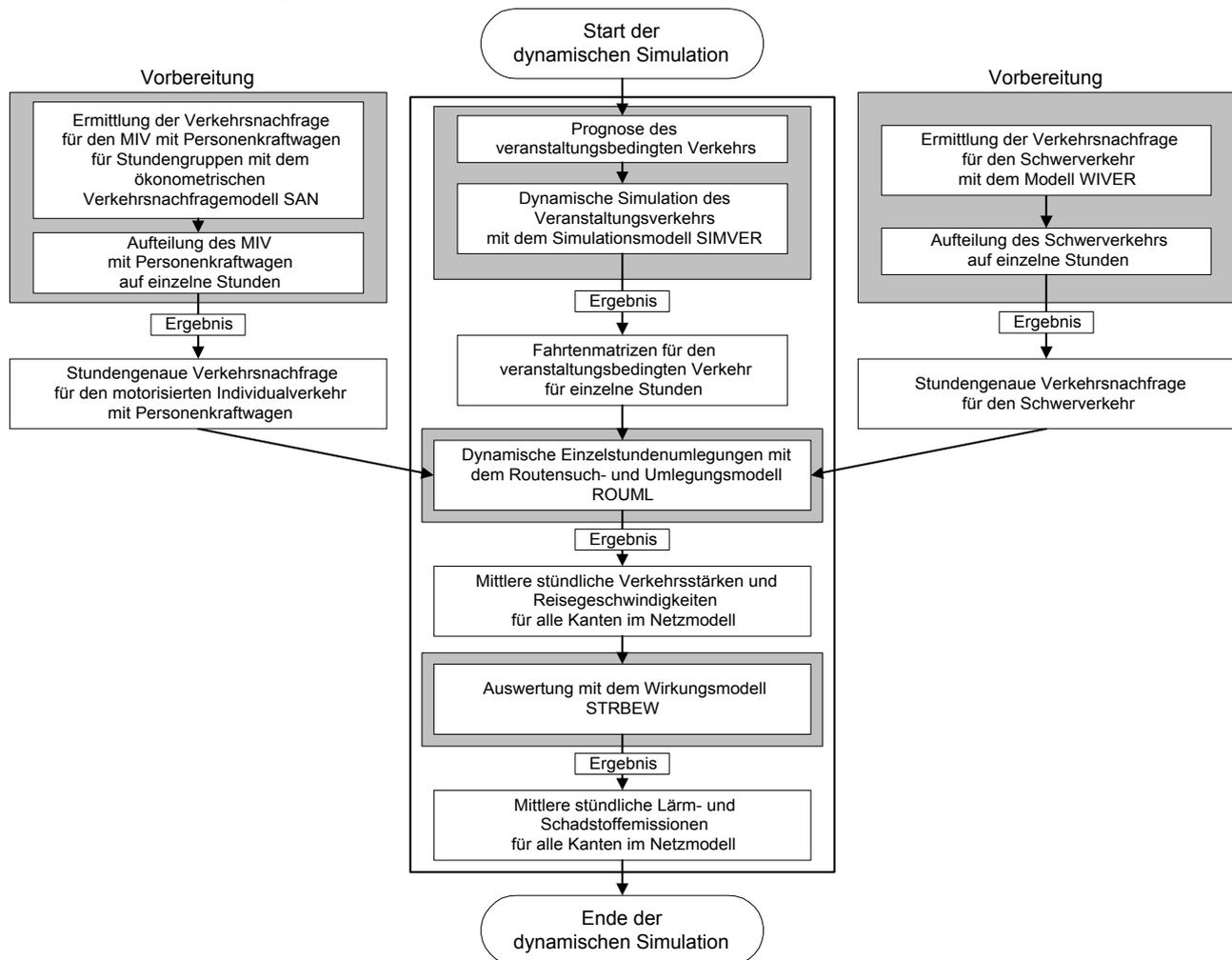


Abb. 85: Dynamische Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs

Während der in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen eines ganzen Werktages wurden mit dem Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML die dynamischen Einzelstundenumlegungen so durchgeführt,

dass sich die unterschiedenen Fahrtenkategorien (Lkw, ortsunkundige Pkw von Veranstaltungsbesuchern, ortskundige Pkw) gegenseitig beeinflussen und die Wegweisung für den EXPO-Besucherverkehr mit Personenkraftwagen gemäß dem entwickelten Lenkungskonzept für die Weltausstellung erfolgte [2]. Berücksichtigung fanden im Routensuch- und Umlegungsmodell auch die betrieblichen Maßnahmen A und R zur temporären Erhöhung der Leistungsfähigkeit des hannoverschen Hauptverkehrsstraßennetzes während An- bzw. Abreise von der EXPO 2000.

Aufbauend auf den stundengeauen Verkehrsnachfragematrizen und den damit durchgeführten dynamischen Einzelstundenumlegungen konnten in dieser Arbeit Emissionsberechnungen für den motorisierten Individualverkehr von bisher für den Großraum Hannover noch nicht erreichter Genauigkeit ermittelt werden. Die Simulation des Veranstaltungsverkehrs mit dem Simulationsmodell SIMVER stellt sicher, dass der Zusammenhang der Verkehrslenkungsstrategie über einen ganzen Tag gewahrt bleibt. Das Simulationsmodell SIMVER überwacht prognostisch die Aktivierung und Deaktivierung des dynamischen Verkehrsleitsystems zu P+R-Plätzen.

Die Ergebnisse der in dieser Arbeit durchgeführten dynamischen Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs während der EXPO 2000 im Großraum Hannover gingen in die Planungen für die EXPO 2000 ein. Mit den entwickelten Verkehrsmodellen und Verkehrsnachfragedaten ist es zusätzlich möglich den Verkehrsablauf im Großraum Hannover im Jahr 2000 im Modell z.B. für den jeweils folgenden Tag prognostisch abzubilden. Als Eingangsdaten in das Simulationsmodell SIMVER werden dazu lediglich möglichst exakte Daten für die Besucheranreise benötigt. Sofern diese Daten von der EXPO GmbH durch den Ticketverkauf nicht exakt genug geliefert werden können, ist wäre möglich, das Schätzen dieser Eingangsdaten während der Veranstaltung zu erlernen.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Abschätzungen des Verkehrsablaufes während der EXPO 2000 sind und bleiben Prognosen, d.h. begründete Vermutungen auf der Basis von Modellen. Wie sich die Besucher während der EXPO 2000 verhalten werden und ob sich die prognostizierten Besucherzahlen erreichen lassen oder ob diese sogar übertroffen werden, ist noch offen. Für eine zeitlich noch stärker disaggregierte Ermittlung der Verkehrsnachfrage fehlten gesicherte Eingangsdaten. Es ist jedoch auch fraglich, ob eine noch stärkere Disaggregation der Verkehrsnachfrage überhaupt zu verifizieren gewesen wäre. Nicht alles was simuliert werden kann, sollte auch unbedingt simuliert werden, wenn die entsprechenden Eingangsdaten für die Simulation fehlen, oder wenn bekannt ist, dass die Randbedingungen des Simulationsmodells das Ergebnis beeinflussen. Besonders im Hinblick auf das Freizeitverkehrsverhalten ist daher zu empfehlen, die Forschungen zum Mobilitätsverhalten zu intensivieren.

Für die Ermittlung der Verkehrsnachfrage an Wochenenden, an denen die meisten Besucher während der EXPO 2000 zu erwarten sind, sind die vorhandenen Eingangsdaten so lückenhaft, dass eine experimentelle Ermittlung der stundengenauen Verkehrsnachfrage für den Großraum Hannover im Rahmen der Verkehrsplanungen für die EXPO 2000 nur unter ausdrücklichem Vorbehalt und unter dem Druck der problematischen Situation erfolgte. Auf eine wissenschaftliche Verwertung der Ergebnisse der Verkehrsnachfrageberechnungen für die Wochenenden wird daher in dieser Arbeit bewusst verzichtet. Es ist aber dringend zu empfehlen, in Zukunft auch dem Verkehrsablauf an Wochenenden verstärkt Beachtung zu schenken, zumal die Bedeutung des Wochenendverkehrs durch die starke Erhöhung des Freizeitverkehrs in den letzten Jahren gestiegen ist. Die in dieser Arbeit durchgeführten offline-Simulationen werden von der PTV AG im Auftrag der move GmbH in ein online-Simulationsmodell (VISUM-Online) überführt. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verkehrsnachfragedaten für den motorisierten Individualverkehr werden dabei als Basiswerte für Kurzfristprognosen verwendet. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verkehrsmodelle SIMVER und ROUML sind nicht nur auf den Spezialfall EXPO 2000 beschränkt. Während der Entwicklung der Verkehrsmodelle wurde vielmehr darauf geachtet, dass die Modelle so flexibel wie möglich bleiben und auch für andere Fragestellungen einzusetzen sind.

8. Literaturverzeichnis

- [1] Anthes, R.
Entwicklung eines Programms zur Ermittlung von Schadstoff- und Lärmemissionen für Personenkraftwagen und Lastkraftwagen.
Studienarbeit am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, Hannover 1997
- [2] Arbeitskreises Verkehrsmanagement
Lenkungskonzept zur Verkehrssteuerung EXPO 2000 in Hannover.
Rahmenkonzept des Arbeitskreises Verkehrsmanagement, Hannover Februar 1999
- [3] Beckmann, K.J., Wulfhorst, G.
Dynamische Routensuche und Umliegung: Prüfung und Weiterentwicklung des Modellkonzeptes DRUM.
Schriftenreihe Stadt Region Land, Heft 67, S. 79-88, Aachen 1999
- [4] Bierschenk, H.
Ökonometrisches Verkehrsnachfragemodell mit räumlicher Übertragbarkeit
Dissertation am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, Hannover 1981
- [5] Bischoff, P.
P+R-Wegweisung in der Region Hannover (während der EXPO 2000).
Untersuchung im Auftrag der Gesellschaft zur Vorbereitung und Durchführung der Weltausstellung EXPO 2000 mbH
Hannover 1999
- [6] Brilon, W., Großmann, M., Blanke, H.
Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes auf Straßen.
Heft 669 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau- und Straßenverkehrstechnik“ des Bundesministers für Verkehr, Bonn 1994, aktualisierte Fassung Juni 1998
- [7] Brücher, W., Gawron, C., Kaufmann, S., Rindsfüser, G., Wagener, P.
Simulation von Transportsystemen auf der Basis von Einzelpersonen und Einzelfahrzeugen.
Internationales Verkehrswesen 52 (2000), Hamburg 2000
- [8] BUND
Neue Ansätze zur Darstellung und Belastung von Wohngebieten durch verkehrsbedingte Lärm- und Schadstoffemissionen und Maßnahmen zur Lärminderung und Luftreinhaltung.
Reader zur Tagung vom 28. Februar 1997, Hannover 1997
- [9] Dantzig, G. B.
On the shortest path through a network.
Management Science, Vol. 6, S. 187-190, 1959
- [10] Dial, R.B.
A multipath traffic assignment model.
Highway Research Board, Bd. 369, S. 199-210, Washington 1962

- [11] Dijkstra, E. W.
A note on two problems in connection with graphs.
Numerische Mathematik 1,
S. 269-271, 1959
- [12] Floyd, E.
Algorithm '97: shortest path.
Communications of the ACM 1967
- [13] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Leitfaden für Verkehrsplanungen.
Köln 1985
- [14] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Richtlinien für die Anlage von Straßen RAS, Teil: Querschnitte RAS-Q 96.
Köln, 1996
- [15] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Empfehlungen für die Anlage von Erschließungsstraßen (EAE 85/95).
Köln 1985, Ergänzte Fassung 1995
- [16] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Richtlinie für die Anlage von Straßen - Teil: Leitfaden für die funktionale Gliederung des Straßennetzes (RAS-N).
Köln, 1985
- [17] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Empfehlungen für die Anlage von Hauptverkehrsstraßen (EAHV).
Köln, 1993, Berichtigter Nachdruck 1998
- [18] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen - Teil: Straßen ohne oder mit lockerer Randbebauung (MLuS-92). (Geänderte Fassung 1996), Köln 1996
- [19] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS).
Aktualisierung der RAS-W 86, Köln 1997
- [20] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Richtlinie für Lichtsignalanlagen (RiLSA).
- Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr -
Köln 1992
- [21] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Richtlinie für den Lärmschutz an Straßen (RLS-81).
Köln 1981

-
- [22] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Richtlinie für den Lärmschutz an Straßen (RLS-90).
Köln 1990, Berichtigte Fassung 1992
- [23] Goltermann, S., Kölle, M., Oral, Y., F. Schütte
Konzept zur Berechnung an Wartezeiten an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage für ein Verkehrsumlegungsprogramm.
Forschungsprojekt am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, Hannover Mai 1999
- [24] Hart, P. E., Nilsson, N. J., Raphael, B.
A formal basis for the heuristic determination of minimal cost paths.
IEEE Transactions on System Science and Cybernetics 4(2), S. 100-107, 1968
- [25] Heck, H.-M., Fabian, I., Marx, G.
Verkehrsbeziehungen im Raum Hannover - Ermittlung der Verkehrsnachfrage für den öffentlichen Nahverkehr und den Individualverkehr.
Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, Hannover 1992
- [26] Ifeu-Institut/Prognos AG
CO₂-Minderungsstudie Verkehr Großraum Hannover - Materialien zur regionalen Entwicklung.
Untersuchung im Auftrag des Kommunalverbandes Großraum Hannover und des Niedersächsischen Umweltministeriums, Heidelberg/Basel 1997
- [27] Infrac AG/TÜV-Rheinland
Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs.
Untersuchung im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin (UBA)
Zürich Oktober 1995, Aktualisierte Fassung 1999
- [28] Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau
Umlegungsmodell DIAL-IV.
Forschungsprojekt am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, Hannover 1980
- [29] IVS, BLIC, IVU, WVI u. a.
TTS TeleTravel System - Telematiksystem zur automatischen Erfassung des Verkehrsverhaltens.
Forschungsprojekt im Auftrag des BMB+F, 1. Zwischenbericht, Braunschweig 1999
- [30] Kleiner, C.
Ein Modell zur Routensuche und Verkehrsumlegung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Personengruppen und Fahrzeugtypen bei Großveranstaltungen.
Diplomarbeit am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, Hannover 1997
- [31] Kommunalverband Großraum Hannover, Landeshauptstadt Hannover, Landkreis Hannover
Statistischer Vierteljahresbericht Hannover - Jahresübersicht 1997.
Hannover 1998

- [32] Ludwig, R., Mangold, M.
EXPO 2000 Hannover Verkehrskonzeption - Modell zur Abbildung des Verkehrs während der EXPO 2000.
Untersuchung im Auftrag der Gesellschaft zur Vorbereitung und Durchführung der Weltausstellung EXPO 2000 mbH, Albert Speer & Partner, Frankfurt 1998
- [33] Ludwig, R., Mangold, M.
EXPO 2000 Verkehrskonzeption - Modell zur Abbildung des Verkehrs während der EXPO 2000.
Untersuchung im Auftrag der Gesellschaft zur Vorbereitung und Durchführung der Weltausstellung EXPO 2000 mbH, Albert Speer & Partner, Frankfurt 1999
- [34] Meimbresse, B., Dziel, N.
Berechnung des regionalen Wirtschaftsverkehrs im Großraum Hannover und Aufbereitung anderer verkehrlicher Daten zur Integration in das europäische Projekt COST 321.
IVU - Gesellschaft für Informatik, Verkehrs- und Umweltplanung,
Untersuchung im Auftrag des Kommunalverbands Großraum Hannover, Berlin 1998
- [35] Moore
The shortest path through a maze.
International Symposium on the theory of switching,
Harvard University, 1957
- [36] Morgenroth, T., Regner, M, Schütte, F.
NetMaster - Anwendung zum Editieren von Straßennetzen für Microsoft Windows Oberflächen 95/98/NT.
Projekt am Bildungszentrum für Informationsverarbeitende Berufe e.V. (b.i.b.) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Hannover 1999
- [37] Oral, Y.
Konzept zur Berechnung der Wartezeiten an Knotenpunkten.
Diplomarbeit am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, Hannover 1999
- [38] PDC
Ergebnisse der empirischen Kundenbefragung in Deutschland - Quantitative Zielgruppen-/ Potential-Analyse.
Untersuchung im Auftrag der Gesellschaft zur Vorbereitung und Durchführung der Weltausstellung EXPO 2000 mbH, Frankfurt 1997
- [39] Perarl, J.
HEURISTICS - intelligent search strategies for computer problem solving.
Addison-Wesley Publishing Company 1984
- [40] Poeck, M., Zumkeller, D.
Gesamtverkehrsplan Großraum Nürnberg.
München 1976

-
- [41] PTV AG
Dynemo Traffic simulation Model, User's Manual DYNEMO.
Karlsruhe 1998
- [42] Ptv System
Benutzerhandbuch VISUM (23.04.98) Version 6.20.
Karlsruhe 1998
- [43] Ptv System
Benutzerhandbuch VISEM.
Karlsruhe 1997
- [44] Ptv System
Benutzerhandbuch VISSIM.
Karlsruhe 1998
- [45] Roland Berger Forschungs-Institut für Markt- und Systemforschung GmbH
Marktforschung EXPO 2000 Verkehr.
Untersuchung im Auftrag der Gesellschaft zur Vorbereitung und Durchführung der Weltausstellung EXPO 2000 mbH, München, Mai 1999
- [46] Schnüll, R.
Umdruck zur Vorlesung Städtebau und Verkehrsplanung.
Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover,
Hannover 1998
- [47] Schnüll, R., Schütte, F.
Verkehrliche Auswirkungen EXPO-bedingter Zusatzverkehre im Großraum Hannover.
Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover,
Untersuchung im Auftrag der des Niedersächsischen Ministeriums für Wirtschaft, Technologie und Verkehr, Hannover 1996
- [48] Schnüll, R., Schütte, F., Handke, N.
Wochentagspezifische Schwachstellenanalyse für Bundesfernstraßen während der Weltausstellung EXPO 2000.
Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover,
Untersuchung im Auftrag der Gesellschaft zur Vorbereitung und Durchführung der Weltausstellung EXPO 2000 mbH, Hannover 1998
- [49] Schnüll, R., Hoffmann, S.
Einsatzbereiche betrieblicher Maßnahmen in planfreien Knotenpunkten.
Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover,
Untersuchung im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Bonn 1997

- [50] Schnüll, R., Schütte, F.
Expertise zur Abschätzung der verkehrlichen Auswirkungen des EXPO-bedingten Zusatzverkehrs im erweiterten Großraum Hannover.
Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover,
Untersuchung im Auftrag des Niedersächsischen Ministeriums für Wirtschaft, Technologie und Verkehr,
Hannover 1998
- [51] Schnüll, R., Schütte, F.
Reduktion der Emissionsbelastungen bei Großveranstaltungen durch eine zielorientierte Verkehrsplanung am Beispiel der Weltausstellung EXPO 2000.
Gefördert durch die Dr. Joachim und Hanna Schmidt Stiftung für Umwelt und Verkehr, Hannover 1999
- [52] Schnüll, R., Schütte, F.
Untersuchung der Ausweichrouten zur Weltausstellung EXPO 2000.
Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover,
Untersuchung im Auftrag des Niedersächsischen Ministeriums für Wirtschaft, Technologie und Verkehr,
Hannover 1997
- [53] Schnüll, R., Handke, N., Hoffmann, S., Schütte, F., Seitz, K.
Auswirkungen der Geschwindigkeitsbeschränkungen zwischen dem Autobahnkreuz Hannover-Ost und der Anschlussstelle Wunstorf-Luthe. Ergebnisse des Modellversuches zwischen dem Autobahnkreuz Hannover-Ost und der Anschlussstelle Wunstorf-Luthe.
Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover,
Untersuchung im Auftrag des Niedersächsischen Ministeriums für Wirtschaft, Technologie und Verkehr,
Hannover 1994
- [54] Schnüll, R., Schütte F.
Stellungnahme des Instituts für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau zum Arbeitspapier EXPO 2000 Verkehrskonzeption Stand 09.1999.
Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover,
Hannover 1999
- [55] Scholz, G., Bierschenk, H. , Wolff, H.:
Die Verkehrsmobilität in Abhängigkeit von der Angebots- und Siedlungsstruktur.
Untersuchung im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Heft 380, Bonn-Bad Godesberg 1980
- [56] Schönharting, J.
Zur Crux mit den Verkehrsmodellen.
Festschrift für Gerd Steierwald, Schriftenreihe des Institutes für Verkehrssystemplanung, TU Wien,
Band 6, S. 147-162, Wien 1999
- [57] Schütte, F.
CO₂-Emissionen im Stadtgebiet von Hannover - Alternative Szenarien im Vergleich.
Studienarbeit am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover,
Hannover 1992

-
- [58] Serwill, D.
DRUM - Modellkonzept zur dynamischen Routensuche und Umlegung.
Institut für Stadtbauwesen, RWTH Aachen,
Aachen 1994
- [59] SOCIALDATA GmbH
PAW Hannover - Mobilitätsverhalten - Tabellenband.
München 1990
- [60] SOCIALDATA GmbH
Mobilitätsverhalten Hannover.
München, März 1995
- [61] SOCIALDATA GmbH
Public Awareness zur Mobilität in Hannover - Potentialanalyse.
München, Juni 1996
- [62] SOCIALDATA GmbH
Mobilitätsverhalten Hannover -Zeitvergleich 1994 - 1995.
München, März 1996
- [63] SOCIALDATA GmbH
Public Awareness zur Mobilität in Hannover.
München, März 1996
- [64] SOCIALDATA GmbH
Einstellungen und Einschätzungen zur Mobilität in Hannover 1994 - 1995 - 1996.
München, März 1997
- [65] SOCIALDATA GmbH
Mobilität in Hannover - Bericht.
München, Mai 1997
- [66] SOCIALDATA GmbH
Mobilität in Hannover - UP-Date '97.
München, Juni 1998
- [67] SOCIALDATA GmbH
Mobilität in Hannover - Bericht.
München, Juli 1997
- [68] Sparmann, U.
ORIENT - Ein verhaltensorientiertes Simulationsmodell zur Verkehrsprognose.
Heft 20 der Schriftenreihe des Institutes für Verkehrswesen, Universität (TH) Karlsruhe,
Karlsruhe 1980
- [69] Steierwald, G., Künne, H.-D., et al
Stadtverkehrsplanung - Grundlagen - Methoden - Ziele -
Stuttgart: Springer 1993

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Prozentuale Prognose der Besucherherkunft [32]	9
Tab. 2:	Prognose der Besucherherkunft [32]	9
Tab. 3:	Stellplätze auf den P+R-Plätzen	11
Tab. 4:	Allgemeine Gleichung zur Ermittlung der Verkehrsnachfrage mit dem ökonomischen Verkehrsnachfragemodell SAN	27
Tab. 5:	Streckentypentabelle DIAL-IV (Stand 01.1996) [47]	34
Tab. 6:	Knotentypentabelle DIAL-IV	35
Tab. 7:	Stadt Hannover 1995: Wege an Werktagen nach Verkehrsmitteln und Stundengruppen [60]	44
Tab. 8:	Landkreis Hannover 1990: Wege an Werktagen nach Verkehrsmitteln und Stundengruppen [59]	44
Tab. 9:	Stadt Hannover 1995: Wege an Werktagen nach Wegezweck und Stundengruppen in [%] [60]	45
Tab. 10:	Landkreis Hannover 1990: Wege an Werktagen nach Wegezweck und Stundengruppen in [%] [59]	45
Tab. 11:	Hannover 1997 / Landkreis 1990/1997: Zweck der Wege im MIV und insgesamt je Tag [60][61][65]	46
Tab. 12:	Verkehrsmittelnutzung nach Wegezweck in Prozent [60][61][65]	46
Tab. 13:	Stadt Hannover 1997: Wege pro Person (MIV) nach Stundengruppen	47
Tab. 14:	Landkreis Hannover 1990/1997: Wege pro Person (MIV) nach Stundengruppen	47
Tab. 15:	Prozentuale Richtungsverteilung der Wege pro Person nach Wegewecken	48
Tab. 16:	MIV Fahrtenmatrix für Personenkraftwagen 1997 [Pkw-Fahrten/Tag]	51
Tab. 17:	MIV Fahrtenmatrix für Lastkraftwagen 1997 [Lkw-Fahrten/Tag]	51
Tab. 18:	Anstieg des Fahrtenaufkommens für den MIV mit Personenkraftwagen (1997-2000)	52
Tab. 19:	MIV Fahrtenmatrix für Personenkraftwagen 2000 [Pkw-Fahrten/Tag]	52
Tab. 20:	MIV Fahrtenmatrix für Lastkraftwagen 2000 [Lkw-Fahrten/Tag]	53
Tab. 21:	Rang, Deaktivierungs-Auslastungsgrad und Aktivierungslevel nach Anreiserichtung	57
Tab. 22:	Streckentypentabelle Hannover (Stand 04.1999)	63
Tab. 23:	Stromdatei für den Beispielknotenpunkt	65
Tab. 24:	Faktoren für die Umrechnung der Verkehrsstärken der Nebenströme in Pkw-Einheiten (für Knotenpunkte mit einer Längsneigung von $s=0\%$)	74
Tab. 25:	Ermittlung der maßgebenden Hauptstrombelastungen q_p für Einmündungen	75
Tab. 26:	Ermittlung der maßgebenden Hauptstrombelastungen q_p für Kreuzungen	75
Tab. 27:	Fahrmuster für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge (<3,5 t), Quelle [27]	91
Tab. 28:	Fahrmustergruppen für schwere Nutzfahrzeuge [27]	92
Tab. 29:	Regelfälle für Verkehrssituationen nach dem Handbuch für Emissionsfaktoren [27]	93
Tab. 30:	Sonderfälle für Verkehrssituationen nach dem Handbuch für Emissionsfaktoren [27]	94
Tab. 31:	Verkehrssituationen für Personenkraftwagen zur Ermittlung der Abgasemissionen im Wirkungsmodell STRBEW	95
Tab. 32:	Verkehrssituationen für Lastkraftwagen (SNF) zur Ermittlung der Abgasemissionen im Großraum Hannover	96
Tab. 33:	Beispiel für Emissionsfaktorendateien im Wirkungsmodell STRBEW (Bezugsjahr 2000)	96
Tab. 34:	Maßgebende Lkw-Anteile p (über 2,8 t zulässiges Gesamtgewicht)	98
Tab. 35:	Maßgebende Verkehrsstärke M in [Kfz/h]	98

Tab. 36:	Grenzwerte der mittleren Pkw-Reisegeschwindigkeiten auf Bundesautobahnen nach dem Handbuch zur Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS [6])	101
Tab. 37:	Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes auf Bundesautobahnen	102
Tab. 38:	Untersuchte Planfälle	109
Tab. 39:	Kohlendioxidemissionen durch den Kraftfahrzeugverkehr im Großraum Hannover	112
Tab. 40:	CO ₂ -Emissionen durch den Verkehr 1990 im Großraum Hannover (CO ₂ -Minderungsstudie 1997 [26])	113
Tab. 41:	EXPO-bedingte CO ₂ -Emissionen durch den Straßenverkehr	113
Tab. 42:	Untersuchte Planfälle für den werktäglichen Kraftfahrzeugverkehr im Großraum Hannover	124
Tab. 43:	Simulationsparameter für das Simulationsmodell Veranstaltungsverkehr SIMVER	125
Tab. 44:	Teillumlegungen mit dem Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML für eine Stunde während der EXPO 2000	131

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Beschickung der Parkplätze vom Messeschnellweg an der AS Messe-Nord bei aktivierter Maßnahme A	3
Abb. 2:	Parkbereiche am Weltausstellungsgelände	4
Abb. 3:	Verkehrslenkungsstrategie für die Anreise zum Weltausstellungsgelände	5
Abb. 4:	Verkehrslenkungsstrategie für die Abreise vom Weltausstellungsgelände	5
Abb. 5:	Ausweichrouten während der Weltausstellung EXPO 2000	6
Abb. 6:	Prognose der Besuchermengen über den Veranstaltungszeitraum der EXPO 2000 (Quelle: EXPO GmbH)	7
Abb. 7:	Prognostizierte An- und Abreiseganglinie für den motorisierten Individualverkehr während der EXPO 2000	8
Abb. 8:	Parkplätze für die EXPO 2000	10
Abb. 9:	Verkehrsplanungsprozess [13]	13
Abb. 10:	Gliederung von Verkehrsnachfragemodellen in Teilmodelle	15
Abb. 11:	Ablaufdiagramm Orient, verhaltensorientiertes Simulationsmodell zur Verkehrsprognose, SPARMANN [68]	23
Abb. 12:	Zuordnungen der quell-ziel-bezogenen Personengruppen zu den Wegezwecken im ökonomischen Verkehrsnachfragemodell SAN	29
Abb. 13:	Abstandsfunktion BIERSCHEK [4]	30
Abb. 14:	Einflussgröße Raumstruktur (Lagefunktion) BIERSCHEK [4]	31
Abb. 15:	Einfluss Angebot (qualitativ) BIERSCHEK [4]	31
Abb. 16:	Auflösung eines vierarmigen Knotenpunktes	32
Abb. 17:	Verkehrsbezirke in der Stadt Hannover (174 Verkehrsbezirke)	41
Abb. 18:	Verkehrsbezirkseinteilung im Großraum Hannover (199 Verkehrsbezirke)	41
Abb. 19:	Verkehrsbezirkseinteilung im Umland (verkehrliches Einflussgebiet, 77 Verkehrsbezirke)	42
Abb. 20:	Wege Pro Person im motorisierten Individualverkehr im Jahr 1997	48
Abb. 21:	Mittlere Tagesganglinie der im MIV im Großraum Hannover zurückgelegten Wege	49
Abb. 22:	Werktägliches Schwerverkehr im Großraum Hannover in Stundengruppen [34]	50
Abb. 23:	Tagesganglinie für den werktäglichen Schwerverkehr in der Region Hannover	50
Abb. 24:	Dynamische Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs	54
Abb. 25:	Parkplatz-Aktivierungslevel über einen ganzen Tag	57
Abb. 26:	Ablaufdiagramm der P+R-Simulation des Veranstaltungsverkehrs mit SIMVER	59
Abb. 27:	Prinzip der multi-sukzessiven Simultanumlegung im Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML	61
Abb. 28:	Beispielknotenpunkt	65
Abb. 29:	Aufgelöster Knotenpunkt im Netzmodell	65
Abb. 30:	Benutzeroberfläche des Programms NETMASTER	66
Abb. 31:	Streckenmenü	66
Abb. 32:	Knotenmenü	66
Abb. 33:	Darstellung benachbarter aufgelöster Knotenpunkte	67
Abb. 34:	Beschriftungsmenü	67
Abb. 35:	Verkehrsstärken als Streckenbeschriftungen	67
Abb. 36:	Algorithmus zur Ermittlung der besten Wege von einer Quelle zu allen Zielen nach DIJKSTRA [11]	70
Abb. 37:	Prinzipskizzen der klassischen und heuristischen Bestwegsuche	72
Abb. 38:	Stromnummerierung für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage	74

Abb. 39: Mittlere Wartezeit in Abhängigkeit von der Belastungsreserve R und der Kapazität C (nach Kimber, Holis 1979)	78
Abb. 40: Maßgebende Ströme an Kreisverkehrsplätzen	79
Abb. 41: Stromnummern im Modell an drei- und vierarmigen Kreisverkehrsplätzen	79
Abb. 42: Kapazitäten von Kreisverkehrszufahrten	81
Abb. 43: Stromnummern im Modell an Knotenpunkten und Einmündungen	83
Abb. 44: Beispiel einer Dreiphasensteuerung an einer Kreuzung	84
Abb. 45: Beispiel einer Vierphasensteuerung an einer Kreuzung	84
Abb. 46: Beispiel einer Zweiphasensteuerung an einer Einmündung	84
Abb. 47: Beispiel einer Dreiphasensteuerung an einer Einmündung	85
Abb. 48: Ausschnitt eine PHASEN-Datei	85
Abb. 49: Beispiel für die Standardwerte zur Berechnung von Lichtsignalanlagen	86
Abb. 50: Prozentuale Reduktion der Abgasemissionen von Personenkraftwagen (Bezugsjahr 1990)	105
Abb. 51: Prozentuale Reduktion der Abgasemissionen von Lastkraftwagen (Bezugsjahr 1990)	105
Abb. 52: Reduktion der Emission von CO	106
Abb. 53: Reduktion der Emission von HC	106
Abb. 54: Reduktion der Emission von SO ₂	106
Abb. 55: Reduktion der Emission von NO _x	106
Abb. 56: Reduktion der Emission von Blei	107
Abb. 57: Reduktion der Emission von Partikeln	107
Abb. 58: Reduktion der Emission von CO ₂	107
Abb. 59: Reduktion der Emission von Benzol	107
Abb. 60: Absolute Emission von CO ₂ im Großraum Hannover im Verlauf eines Tages während der EXPO 2000	110
Abb. 61: Absolute Emission von CO ₂ in t/Tag während der Weltausstellung EXPO 2000	111
Abb. 62: Absolute tägliche Emission von CO ₂ in t/Tag während der EXPO 2000 nach Planfällen	112
Abb. 63: Normierte Emission von CO (10.00 bis 11.00 Uhr)	114
Abb. 64: Vergleich der absoluten und der normierten Bewertung der CO-Emissionen nach Planfällen mit dem Planfall P0 als Bezugsplanfall	115
Abb. 65: Mittlere Anwohnerzahlen (Basis: Einwohnerpunktkarte Hannover 1998)	116
Abb. 66: Gewichtete Emission von CO (10.00 bis 11.00 Uhr)	117
Abb. 67: Vergleich der normierten und der mit Typ A gewichteten Bewertung der CO-Emissionen nach Planfällen mit dem Planfall P0 als Bezugsplanfall	118
Abb. 68: Mittlerer mit der Streckenlänge gewichteter Lärmpegel in db(A) an Bundesautobahnen im Großraum Hannover in Stundenintervallen	119
Abb. 69: Mittlerer mit der Streckenlänge gewichteter Lärmpegel in db(A) an Stadtautobahnen im Großraum Hannover in Stundenintervallen	120
Abb. 70: Mit den mittleren Anwohnerzahlen und Streckenlängen gewichtete mittlere Lärmemissionen (nur>55 db(A)) im Großraum Hannover in Stundenintervallen	121
Abb. 71: Summe der täglichen mit den mittleren Anwohnerzahlen und Streckenlängen gewichtete mittlere Lärmemissionen (nur>55 db(A)) im Großraum Hannover nach Planfällen	122
Abb. 72: Aktivierungslevel der P+R-Plätze in den untersuchten Planfällen	126
Abb. 73: Auslastungsgrad der Parkplätze im Planfall P1	127
Abb. 74: Auslastungsgrad der Parkplätze im Planfall P2	128
Abb. 75: Auslastungsgrad der Parkplätze im Planfall P4	129
Abb. 76: Verkehrsstärken auf dem Streckenabschnitt zwischen der AS Garbsen und der AS Hannover-Herrenhausen in Richtung Berlin (werktags, 370.000 Besucher)	132

Abb. 77: Verkehrsstärken auf dem Streckenabschnitt zwischen der AS Hannover-Bothfeld und der AS Hannover-Lahe in Richtung Berlin (werktags, 370.000 Besucher)	133
Abb. 78: Verkehrsstärken auf dem Streckenabschnitt zwischen der AS Hannover-Herrenhausen und der AS Garbsen in Richtung Dortmund (werktags, 370.000 Besucher)	134
Abb. 79: Verkehrsstärken auf dem Messeschnellweg auf dem Streckenabschnitt zwischen der AS Pferdeturm und der AS Weidetor in Richtung Norden (werktags, 370.000 Besucher) .	135
Abb. 80: Verkehrsstärken auf der A 7 auf dem Streckenabschnitt zwischen der AS Hannover-Anderten und dem AK Hannover-Ost in Richtung Hamburg (werktags, 370.000 Besucher)	136
Abb. 81: Verkehrsstärken auf der B 433 zwischen der AS Laatzen und der Zufahrt zum P+R-Platz Laatzen Süd in Richtung Westen (werktags, 370.000 Besucher)	137
Abb. 82: Verkehrsstärken auf dem Streckenabschnitt zwischen dem Knotenpunkt B 6/B 443 und der Zufahrt zum P+R-Platz Laatzen-Süd in Richtung Osten (werktags, 370.000 Besucher)	138
Abb. 83: Verkehrsstärken auf der B 443 auf dem Streckenabschnitt zwischen der Zufahrt zum P+R-Platz Laatzen-Süd und der AS Laatzen in Richtung Osten (werktags, 370.000 Besucher)	139
Abb. 84: Prinzip der multi-sukzessiven Simultanumlegung im Routensuch- und Umlegungsmodell ROUML	142
Abb. 85: Dynamische Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs	143



Veröffentlichungen des Instituts für
Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Schnüll Universität Hannover

Heft 1 1979	Rolf Hüttmann Planungsmodell zur Entwicklung von Nahverkehrs- netzen liniengebundener Verkehrsmittel	DM 10,--
Heft 2 1980	Bernhard Peschke Kosten- und Angebotsstruktur von Großkabinen- bahnsystemen unter besonderer Berücksichtigung städtebaulicher Bedingungen	DM 18,--
Heft 3 1982	Hartmut Bierschenk Ökonometrisches Verkehrsnachfragemodell mit räumlicher Übertragbarkeit	DM 20,--
Heft 4 1983	Thomas Kortenhaus Bewertung der Verkehrssituation in den Kernbe- reichen niedersächsischer Mittelstädte	DM 15,--
Heft 5 1984	Wolfgang Haller Methodische Untersuchungen zur Quantifizierung von Fahrkomfort in plangleichen Knotenpunkten	DM 20,--
Heft 6 1985	Wolfgang Faber Verkehrsaufkommen kleinerer Selbstbedienungs- betriebe	DM 20,--
Heft 7 1986	Thomas Kortenhaus Akzeptanz der Parkmöglichkeiten in innenstadt- nahen Altbaugebieten durch die Bewohner	DM 25,--
Heft 8 1987	Horst Diekmann, Wolfgang Haller, Jörn Janssen, Edeltraud Straube Neubau von Ortsumgehungen und Rückbau von Ortsdurchfahrten als Maßnahmenbündel	DM 25,--
Heft 9 1988	Hans-Joachim Aumund, Dirk Artschwager, Annette Albers, Hans-Martin Heck Verkehrsentwicklungsplan Delbrück - Ein verkehrs- mittelübergreifendes Konzept zur flächendeckenden Verkehrsberuhigung in einer Stadt im ländlichen Raum	DM 25,--

Heft 10 1990	Horst Diekmann, Jörn Janssen Untersuchung der Lärminderungsmöglichkeiten durch Ortsumgehungen	DM 10,--
Heft 11 1992	Bert Leerkamp Finanzierung des ganzheitlichen Straßenraumentwurfs Heutige Grenzen und neue Ansätze	DM 25,--
Heft 12 1993	Edeltraud Straube Möglichkeiten zur Integration von Bahnkörpern der Stadtbahn/Straßenbahn in Straßenräume von städtischen Hauptverkehrsstraßen mit Wohnbebauung	DM 35,--
Heft 13 1993	Peter Bischoff Entwicklung eines ganzheitlich orientierten Bewertungsverfahrens für den Umbauebedarf von Ortsdurchfahrten	DM 35,--
Heft 14 1994	Carsten-Wilm Müller Auswirkungen der Grenzöffnung zur DDR auf die verkehrlich-städtebauliche Struktur niedersächsischer Klein- und Mittelstädte	DM 35,--
Heft 15 1995	Daniela Georgiewa Anwendbarkeit von Verkehrsmodellen für die Planung regionaler Straßennetze in den Ländern Osteuropas - dargestellt am Beispiel Bulgariens -	DM 25,--
Heft 16 1996	Norbert Handke Kombination von Untersuchungsmethoden bei Sicherheitsanalysen im Straßenverkehr	DM 35,--
Heft 17 1996	Annette Albers Dynamische Straßenraumfreigabe für Nahverkehrsfahrzeuge	DM 40,--
Heft 18 1996	Bert Leerkamp Entwurfselemente des Lieferverkehrs für Hauptverkehrsstraßen	DM 40,--
Heft 19 1998	Anke Wilms Verkehrssicherheitsbelange bei der Bevorrechtigung von Bussen und Bahnen im Stadtverkehr	DM 35,--
Heft 20 1999	Peiguo Zou Untersuchung neuer Betriebs- und Nutzungskonzepte für eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Integration des Automobils in Verkehrssysteme für Mobilitäts-Schwellenländer	DM 40,--

Heft 21 1999	Matthias Kölle Zweckmäßigkeit planfreier Knotenpunkte an zweispurigen Straßen außerhalb bebauter Gebiete	DM 40,--
Heft 22 1999	Stephan Hoffmann Einsatzbereiche betrieblicher Maßnahmen in planfreien Knotenpunkten	DM 35,--
Heft 23 1999	Robert Schnüll, Norbert Handke, Carola Mennicken Verbesserung der Verkehrssicherheit für Kinder in niedersächsischen Kommunen	DM 35,--
Heft 24 1999	Carola Mennicken Sicherheits- und Einsatzkriterien für Fußgängerüberwege	DM 50,--
Heft 25 1999	50 Jahre ivh Wissenschaftliches Kolloquium zum 50. Jahrestag der Gründung des Instituts für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau	DM 35,--
Heft 26 2000	Uwe Kloppe Einsatzbereiche unkonventioneller Bahnkörperformen in Hauptverkehrsstraßen	DM 40,--
Heft 27 2000	Robert Schnüll, Stephan Hoffmann, Uwe Kloppe Innovative Beiträge zum Verkehrsplanungs- und Verkehrsmanagementkonzept für die Weltausstellung EXPO 2000 in Hannover	DM 35,--
Heft 28 2000	Fabian Schütte Dynamische Simulation des werktäglichen motorisierten Individualverkehrs - am Beispiel der EXPO 2000 -	DM 35,--
Heft 29 2000	Solveigh Janssen Flächensparende und kostengünstige Verkehrserschließung von Wohngebieten und Stadtquartieren	DM 35,--

